

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

André Lamounier Caixeta

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D POR FILAMENTO EM  
PLA E PETG NA FABRICAÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA CARREGAMENTO  
DE SACOLAS PLÁSTICAS**

Belo Horizonte – MG

2024

ANDRÉ LAMOUNIER CAIXETA

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D POR FILAMENTO EM PLA E  
PETG NA FABRICAÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA CARREGAMENTO DE  
SACOLAS PLÁSTICAS

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

Orientador: Carlos Eduardo Dos Santos

BELO HORIZONTE

2024

ANDRÉ LAMOUNIER CAIXETA

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D POR FILAMENTO EM PLA E  
PETG NA FABRICAÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA CARREGAMENTO DE  
SACOLAS PLÁSTICAS

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

Aprovado em 09/09/2024

**BANCA EXAMINADORA**

---

Dr. Carlos Eduardo Dos Santos, CEFET-MG

---

Dr. João Paulo Ferreira Santos, CEFET-MG

---

Dr. Wellington Lopes, CEFET-MG

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por iluminar meu caminho ao longo de toda a graduação.

Aos meus pais, Edilson e Conceição, que me apoiaram incondicionalmente e me moldaram na pessoa que sou hoje.

Agradeço também a toda a minha família, que sempre foi um ponto de amparo, especialmente aos meus padrinhos, Afrânio e Elaine, que foram como segundos pais para mim e uma referência em Belo Horizonte.

Minha gratidão à minha namorada, Beatriz, por acreditar em mim, me apoiar com carinho em momentos difíceis e contribuir para o meu crescimento.

Sou profundamente grato ao CEFET-MG, por todas as oportunidades e pelo amadurecimento que obtive ao longo desses anos de estudo.

Agradeço ao Professor Carlos Eduardo, meu orientador, por aceitar minha ideia, orientar-me com dedicação e estar sempre disponível para guiar-me durante esta jornada.

Aos meus amigos de curso, Matheus, Patrick, Ana Leticia e Lívia, que foram meus primeiros contatos na faculdade e tornaram essa caminhada mais significativa.

E, finalmente, aos amigos que construí ao longo da faculdade, Pedro, Marco Tulio, Gabriel Victor e Gustavo, por tornarem essa trajetória mais leve e cheia de momentos memoráveis.

## RESUMO

A manufatura aditiva, é uma tecnologia que cria objetos tridimensionais a partir de modelos digitais, mediante a adição de camadas ao material. Dentre as técnicas disponíveis, o Fused Deposition Modeling (FDM) se destaca pelo uso de filamentos poliméricos, que são aquecidos e extrudados em camadas para formar peças sólidas. O trabalho visa otimizar os parâmetros do processo FDM aplicando aos polímeros PLA e PETG. Os resultados mostraram que o PLA possui maior rigidez e resistência mecânica em comparação ao PETG, que, por sua vez, se destaca pela maior ductilidade. O aumento da porcentagem de preenchimento dos polímeros a amostra demonstrou contribuir significativamente para o aumento da resistência mecânica a tração de aproximadamente 31% em PLA e 20% em PETG, partindo de 20% de preenchimento para 80% nos corpos de prova, embora o aumento do preenchimento esteja relacionado ao aumento de médio de 40% aos custos de produção e de 20 minutos ao tempo de impressão. Já o aumento no número de paredes protegendo o preenchimento da amostra, resultou em uma melhora na resistência mecânica a tração de aproximadamente 34% em PLA e 31% em PETG, com um acréscimo de custo de produção médio de 8%, sendo o melhor resultado nos testes com corpos de prova. As diferentes arquiteturas internas avaliadas mostraram influências variadas sobre a rigidez e a capacidade de deformação, com destaque para as arquiteturas cúbica e giróide em PLA. A partir dos resultados obtidos, que ocasionaram acréscimo da resistência mecânica, resultando em um corpo de prova com os parâmetros de 80% de preenchimento, arquiteturas giróide e cúbica com quatro paredes em sua estrutura, que apresentou um aumento médio de 19,5% no limite de resistência à tração em comparação ao teste inicial mais resistente. Com essa otimização, os testes foram então aplicados a um produto, visando à máxima eficiência mecânica com o mínimo desperdício de material. No entanto, foi observado que o aumento do número de paredes não foi proporcional entre o corpo de prova e o produto, com um aumento de 11% de força de ruptura, diferente do aumento de 34% encontrados nos testes em corpos de prova, sugerindo a necessidade de análises futuras sobre a influência da geometria do corpo de teste em relação ao aumento de número de paredes na estrutura, mudando sua morfologia e resistência. A conclusão do estudo reforça a importância de um planejamento criterioso que considere os parâmetros de impressão, a geometria do objeto e o custo de produção, fornecendo diretrizes claras para a escolha de configurações que maximizem a resistência mecânica e minimizem o desperdício de material, tempo e energia.

**Palavras-chave:** Impressão 3D. FDM. PLA. PETG.

## ABSTRACT

Additive manufacturing is a technology that creates three-dimensional objects from digital models by adding layers of material. Among the available techniques, Fused Deposition Modeling (FDM) stands out for using polymer filaments, which are heated and extruded layer by layer to form solid parts. This work aims to optimize the FDM process parameters applied to PLA and PETG polymers. The results showed that PLA has higher stiffness and mechanical strength compared to PETG, which, in turn, is notable for its greater ductility. Increasing the infill percentage of the polymers significantly contributed to the improvement in tensile strength, with an increase of approximately 31% in PLA and 20% in PETG, going from 20% infill to 80% in the test samples. However, the increase in infill was also associated with a 40% increase in production costs and an additional 20 minutes of print time. Increasing the number of walls protecting the infill resulted in a tensile strength improvement of approximately 34% in PLA and 31% in PETG, with an average increase in production costs of 8%, yielding the best results in the test samples. The different internal architectures evaluated showed varied effects on stiffness and deformation capacity, with cubic and gyroid architectures in PLA standing out. Based on the results, which led to increased mechanical strength, a sample with 80% infill, gyroid and cubic architectures, and four walls in its structure showed an average increase of 19.5% in tensile strength compared to the initial strongest test. With this optimization, tests were applied to a product, aiming for maximum mechanical efficiency with minimal material waste. However, it was observed that the increase in the number of walls was not proportional between the sample and the product, with an 11% increase in breaking force, different from the 34% increase found in the test samples. This suggests the need for future analysis on the influence of test body geometry in relation to the increase in the number of walls in the structure, affecting its morphology and strength. The conclusion of the study highlights the importance of careful planning that takes into account printing parameters, object geometry, and production costs, providing clear guidelines for choosing configurations that maximize mechanical strength while minimizing material, time, and energy waste.

Keywords: 3D printing. FDM. PLA. PETG.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Processo SLS .....                                                        | 14 |
| Figura 2 - Processo Binder Jetting.....                                              | 15 |
| Figura 3 - Processo MJ .....                                                         | 16 |
| Figura 4 - Processo FDM .....                                                        | 17 |
| Figura 5 - Porcentagem de preenchimento .....                                        | 18 |
| Figura 6 - Padrões de preenchimento .....                                            | 19 |
| Figura 7 - Direção de impressão das amostras .....                                   | 21 |
| Figura 8 - Velocidade de impressão <i>UltiMaker Cura</i> .....                       | 22 |
| Figura 9 - Aderência estilo Raft .....                                               | 23 |
| Figura 10 - Aderência estilo Brim .....                                              | 24 |
| Figura 11 - Aderência estilo Skirt.....                                              | 24 |
| Figura 12 - Diferença entre 2 e 4 paredes no corpo de prova.....                     | 25 |
| Figura 13 - <i>Software Ultimaker Cura</i> .....                                     | 29 |
| Figura 14 – Fluxograma do método .....                                               | 31 |
| Figura 15 - Rolo de filamento PLA .....                                              | 32 |
| Figura 16 - Rolo de filamento PETG.....                                              | 33 |
| Figura 17 - Impressora utilizada.....                                                | 34 |
| Figura 18 - Modelo corpo de prova tipo IV.....                                       | 35 |
| Figura 19 - Corpos de prova formato STL .....                                        | 35 |
| Figura 20 - Estimativa de tempo <i>Software Cura</i> .....                           | 37 |
| Figura 21 - Produto retirado do site <i>Thingiverse</i> .....                        | 38 |
| Figura 22 - Dispositivo de carga para sacolas plásticas .....                        | 39 |
| Figura 23 - Shimadzu AG-X 10Kn .....                                                 | 40 |
| Figura 24 - Análise gráfica LRT entre PLA e PETG .....                               | 43 |
| Figura 25 - Tensão versus Deformação convencional parâmetro preenchimento.....       | 47 |
| Figura 26 - Tensão versus Deformação convencional parâmetro arquitetura interna..... | 48 |
| Figura 27 - Tensão versus Deformação convencional parâmetro número de paredes .....  | 50 |
| Figura 28 - Comparação arquitetura giróide com cúbico .....                          | 52 |
| Figura 29 – Ensaio de tração do dispositivo de carga para sacolas plásticas .....    | 53 |
| Figura 30 - Pontos de ruptura do DCSP .....                                          | 55 |
| Figura 31 - DCSP versus CPs em PLA .....                                             | 57 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Propriedades PLA.....                                                                 | 32 |
| Tabela 2 - Propriedades PETG .....                                                               | 33 |
| Tabela 3 - Características da impressora. ....                                                   | 34 |
| Tabela 4 - Composições dos corpos de prova .....                                                 | 36 |
| Tabela 5 - Parâmetros não alterados.....                                                         | 36 |
| Tabela 6 - Custo dos corpos de prova.....                                                        | 41 |
| Tabela 7 - Limite de resistência a tração dos CPs .....                                          | 43 |
| Tabela 8 - Análise numérica LRT entre PLA e PETG .....                                           | 44 |
| Tabela 9 - Deformação dos CPs .....                                                              | 45 |
| Tabela 10 - Informações de produção .....                                                        | 51 |
| Tabela 11 - Valores de resistência e deformação convencional dos CPs de composições ideais ..... | 52 |
| Tabela 12 - Composição entre dispositivo de carga para sacolas plásticas e CPs.....              | 54 |
| Tabela 13 - Informações do dispositivo de carga para sacolas plásticas.....                      | 55 |

## SUMÁRIO

|            |                                              |           |
|------------|----------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                      | <b>10</b> |
| <b>2</b>   | <b>OBJETIVOS .....</b>                       | <b>11</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Objetivo geral.....</b>                   | <b>11</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Objetivos específicos.....</b>            | <b>11</b> |
| <b>3</b>   | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>           | <b>12</b> |
| <b>3.1</b> | <b>História da manufatura aditiva .....</b>  | <b>12</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Modelos de impressão 3D .....</b>         | <b>13</b> |
| 3.2.1      | Sinterização seletiva a laser (SLS) .....    | 14        |
| 3.2.2      | Fabricação de objetos laminados (LOM) .....  | 14        |
| 3.2.3      | <i>Binder Jetting</i> .....                  | 15        |
| 3.2.4      | <i>Material Jetting</i> (MJ) .....           | 16        |
| 3.2.5      | Modelagem por deposição fundida (FDM) .....  | 16        |
| <b>3.3</b> | <b>Parâmetros .....</b>                      | <b>18</b> |
| 3.3.1      | Densidade de preenchimento.....              | 18        |
| 3.3.2      | Padrão de preenchimento .....                | 19        |
| 3.3.3      | Espessura da camada.....                     | 20        |
| 3.3.4      | Orientação de impressão .....                | 20        |
| 3.3.5      | Ângulo de deposição .....                    | 21        |
| 3.3.6      | Velocidade de impressão .....                | 21        |
| 3.3.7      | Temperatura operacional .....                | 22        |
| 3.3.8      | Aderência à mesa.....                        | 22        |
| 3.3.9      | Paredes .....                                | 25        |
| <b>3.4</b> | <b>Polímeros do processo FDM .....</b>       | <b>25</b> |
| 3.4.1      | Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) ..... | 26        |
| 3.4.2      | Poliamida (Náilon).....                      | 26        |
| 3.4.3      | Polietileno Tereftalato (PETG) .....         | 27        |

|       |                                                                  |           |
|-------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.4 | Poliácido láctico (PLA) .....                                    | 27        |
| 3.5   | <b>Programa de Fatiamento .....</b>                              | <b>28</b> |
| 3.6   | <b>Aplicação do processo FDM .....</b>                           | <b>29</b> |
| 4     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                 | <b>31</b> |
| 4.1.1 | Materiais e equipamentos de medição .....                        | 32        |
| 4.1.2 | Filamentos de impressão.....                                     | 32        |
| 4.1.3 | Impressora .....                                                 | 34        |
| 4.2   | <b>Corpos de prova.....</b>                                      | <b>35</b> |
| 3.3   | <b>Ensaio de tração.....</b>                                     | <b>39</b> |
| 4     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                              | <b>41</b> |
| 4.1   | <b>Custo da impressão dos corpos de prova.....</b>               | <b>41</b> |
| 4.2   | <b>Resultados ensaio de tração .....</b>                         | <b>42</b> |
| 4.3   | <b>Limite de resistência à tração .....</b>                      | <b>42</b> |
| 4.3.1 | Deformação na ruptura .....                                      | 45        |
| 4.3.2 | Influência do preenchimento .....                                | 46        |
| 4.3.3 | Influência da arquitetura interna .....                          | 48        |
| 4.3.4 | Influência do número de paredes .....                            | 49        |
| 4.4   | <b>Análise dos CPs A4, A5, A6 e A7 .....</b>                     | <b>51</b> |
| 4.5   | <b>Teste no dispositivo de carga para sacolas plásticas.....</b> | <b>53</b> |
| 5     | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                           | <b>59</b> |
| 6     | <b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>                     | <b>60</b> |
|       | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                         | <b>61</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D, que ganhou relevância significativa a partir de 2010, continua a se expandir rapidamente, com uma taxa de crescimento anual projetada de 18% até 2028 (“*MARKET AND MARKET*”, 2023). Essa tecnologia permite a transformação de projetos digitais em objetos físicos, impactando diversos setores da economia. Entretanto, a impressão 3D ainda enfrenta desafios, especialmente no que diz respeito à configuração dos parâmetros de impressão, que são essenciais para obter peças com alta qualidade e resistência mecânica à quebra ou ruptura.

Este estudo se concentra na otimização de alguns parâmetros da tecnologia de Modelagem por Deposição Fundida (FDM), com o objetivo de aprimorar a eficiência do processo e ampliar suas aplicações. A otimização não só melhora a viabilidade econômica da impressão 3D, mas também contribui para a sustentabilidade, reduzindo o desperdício de material e o consumo de recursos.

A FDM, conhecida por sua versatilidade, envolve a extrusão de filamentos poliméricos aquecidos que são depositados em camadas sucessivas para construir o objeto desejado. Este estudo analisa parâmetros cruciais dessa tecnologia, como a porcentagem de preenchimento interno da amostra, a arquitetura do preenchimento e o número de paredes que protegem o preenchimento da peça, com foco nos polímeros PLA e PETG. Com isso, busca-se uma compreensão do impacto desses parâmetros na resistência mecânica das peças e na eficiência do processo.

A tecnologia FDM possui aplicações em diversos setores da indústria, sendo uma alternativa econômica aos métodos de fabricação convencionais. Na indústria aeroespacial, por exemplo, a Stratasys fabrica geometrias complexas, substituindo conduítes de alumínio fundido por peças de policarbonato impressas em 3D no helicóptero Bell. Já na indústria biomédica, o PLA, um biopolímero, é utilizado para produzir peças específicas (STRATASYS, 2023).

A estrutura deste trabalho inclui uma introdução ao tema e uma análise do estado da arte, com ênfase nos parâmetros de impressão e nos principais polímeros utilizados na FDM. Em seguida, os métodos são detalhados, explicando os procedimentos adotados para a pesquisa. Por fim, são apresentados os resultados dos ensaios, retirados os parâmetros ótimos e testados em um produto, sendo ele denominado de dispositivo de carga para sacolas plásticas, com uma discussão que consolida os resultados e oferece diretrizes para futuros trabalhos na área.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo deste estudo é investigar e otimizar os parâmetros de impressão 3D como a porcentagem de preenchimento, arquitetura interna e números de paredes no processo FDM, variando os materiais PETG e PLA, com foco na maximização da resistência mecânica de tração das peças produzidas e na eficiência do processo, considerando o consumo de material, o tempo de impressão e a variação de arquiteturas internas.

### **2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos necessários para o cumprimento das etapas até a formulação final do objetivo geral do trabalho são os seguintes:

- Avaliar o impacto dos parâmetros de porcentagem de preenchimento, arquitetura interna e número de paredes de impressão sobre a resistência mecânica de tração e deformação na ruptura em peças impressas por FDM utilizando polímeros PLA e PETG;
- Avaliar o custo de impressão com os polímeros PLA e PETG em função do tempo e condições de impressão;
- Modelar e imprimir um produto funcional com as melhores condições de impressão observadas no ensaio de tração;
- Avaliar a resistência mecânica de tração do produto funcional.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 História da manufatura aditiva

A Tecnologia de Manufatura Aditiva (AM- *Additive Manufacturing*), também conhecida como Fabricação Aditiva, onde por adição de materiais em camadas se cria o produto desejado, está destinada a transformar a indústria de produção de objetos, sendo muito importante nos últimos anos devido às suas diversas aplicações em diferentes setores industriais. Embora possa sugerir de ser um desenvolvimento recente, Kastner (2018) descreve em seu estudo a evolução da manufatura aditiva em três fases distintas de sua história: a infância, que ocorreu de 1981 a 1999; a adolescência, que abrangeu o período de 2000 a 2010; e a fase adulta, que se estende desde 2010 até os dias atuais.

A origem da concepção sobre fabricar um objeto tridimensional através da impressão teve seu início em 1981 no Japão com o cientista Hideo Kodama, apresentando uma nova técnica de “prototipagem rápida”, sendo a primeira tecnologia de camada por camada, utilizada na impressão 3D da atualidade. Inicialmente, a proposta de Hideo envolvia a impressão de fotopolímeros, mas, devido ao não cumprimento do prazo estipulado para seu pedido, ele acabou perdendo o direito à patente dessa inovadora tecnologia (SOARES, 2021). Contudo, a revolução começou com Charles 'Chuck' Hull, cofundador da empresa 3D Systems, que ainda hoje é a empresa líder em valor de mercado no mundo na área da tecnologia 3D (KAORI, 2022). Charles obteve a patente da estereolitografia (SLA) e construiu a primeira impressora tridimensional em 1987, conhecida como SLA-1. Ele desempenhou um papel crucial ao introduzir características fundamentais, como o formato SLT e o processo de fatiamento digital. Essas inovações permanecem em uso até os dias de hoje (3DSOURCED, 2023).

O mercado de manufatura aditiva encontrou competitividade desde o início. Apenas dois anos após a construção da primeira impressora em 1987, surgiram duas concorrentes importantes: a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), desenvolvida pelo pesquisador Carl Deckard, e a Modelagem por Fusão e Deposição (*Fused Deposition Modeling* - FDM), que é o principal foco deste trabalho, criada por Scott Crump, cofundador da *Stratasys*. Atualmente, a *Stratasys* desempenha um papel de grande relevância no setor ao oferecer máquinas acessíveis ao mercado, contribuindo assim para a difusão da tecnologia de manufatura aditiva (SOARES, 2021)(STRATASYS, 2023).

A popularização da impressão 3D para o público em geral passou por várias etapas ao longo da história até alcançar a facilidade de acesso hoje em dia. No entanto, um marco crucial

para a democratização desta tecnologia ocorreu por volta de 2009, quando as patentes das tecnologias FDM expiraram. Isso abriu as portas para que novas empresas no mercado pudessem legalmente fabricar impressoras 3D com preços mais acessíveis. Além disso, surgiu a tecnologia conhecida como *RepRap*, que permitia que as próprias impressoras de mesa se autorreplicassem, fazendo a impressão de peças que juntas criam uma impressora, assim tornando essa tecnologia ainda mais disponível para um público mais amplo (3DSOURCED, 2023).

É importante abordar sobre o impacto da impressão 3D nas diversas áreas da medicina. Essa tecnologia inicialmente se destacou na criação de próteses personalizadas, proporcionando maior conforto aos pacientes. Com o tempo, ela evoluiu para abranger a fabricação de dispositivos médicos sob medida e até medicamentos personalizados. Além disso, vislumbra-se um futuro promissor com a tecnologia de bioimpressão, que tem o potencial de criar órgãos funcionais sob medida para transplantes, representando um avanço revolucionário na medicina regenerativa e no tratamento de diversas condições médicas (CALSOLARI, 2023; GURGEL, 2023).

A manufatura aditiva está experimentando um crescimento contínuo e significativo em seu futuro. De acordo com um estudo realizado pela *Market and Market* (2023), uma plataforma de pesquisa de mercado, o volume de recursos envolvidos nessa indústria aumentará de US\$ 15,0 bilhões em 2023 para US\$ 34,5 bilhões em 2028, representando uma taxa de crescimento anual de 18,1% (“MARKET AND MARKET”, 2023). O destino da impressão 3D está entrelaçado com a era da Indústria 4.0, caracterizada pela automação industrial. À medida que o tempo avança, é plausível observar uma presença ainda mais proeminente da impressão 3D no cotidiano das pessoas. Para micro e médios empreendedores, a adoção dessa tecnologia pode se tornar essencial para que se destaquem no mercado (SOARES, 2021).

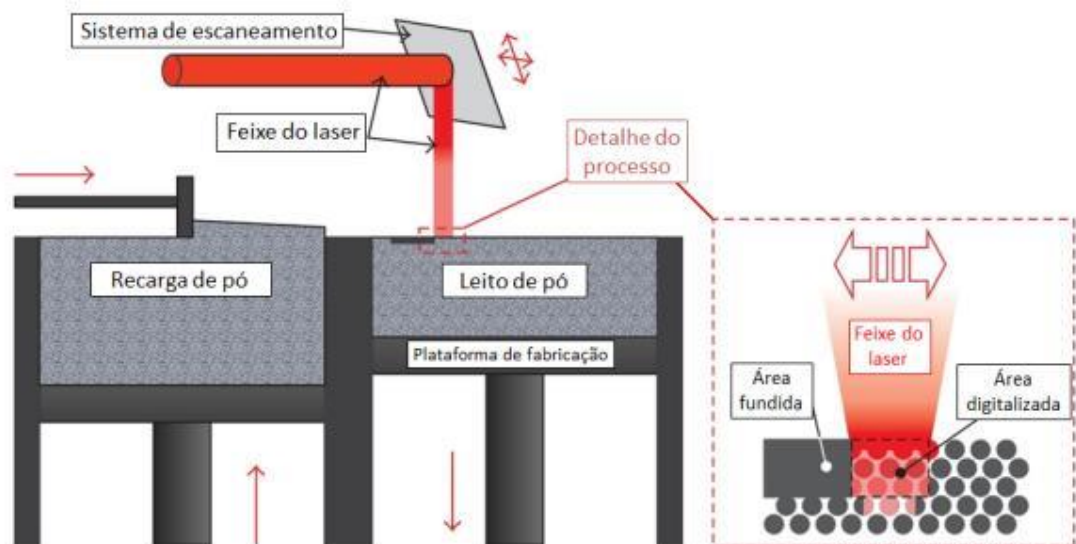
### **3.2 Modelos de impressão 3D**

Desde a década de 1980, iniciando com as concepções pioneiras de Hideo Kodama sobre a impressão 3D, tem havido a proliferação de distintas tecnologias de impressão, cada uma delas contribuindo para a conformação do produto. Entre estas tecnologias destacam-se a Estereolitografia (SLA), a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), a Manufatura de Objetos Laminados (LOM), o *Binder Jetting*, o *Material Jetting* e a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).

### 3.2.1 Sinterização seletiva a laser (SLS)

A Sinterização Seletiva a Laser, introduzida por Carl Deckard e a primeira técnica a se basear na sinterização de pó (Soares, 2021), utiliza um laser para fundir o material em pó, formando uma estrutura sólida na construção da peça. Após a criação da primeira camada, a plataforma é rebaixada para a altura da próxima camada, repetindo-se o processo até a conclusão da produção, representado na Figura 1. No final da fabricação, o excesso de pó que não foi sinterizado é removido, tornando-o pronto para ser reutilizado em futuras produções (HOTZA, 2009).

**Figura 1 - Processo SLS**



Fonte: TSOUKNIDAS, 2011

Essa técnica apresenta uma principal vantagem que é a sua capacidade de dispensar estruturas de suporte. Isso significa que o próprio pó utilizado fornece todo o suporte necessário para a construção das peças. Devido a essa característica, o SLS se destaca na criação de geometrias complexas que seriam difíceis de fabricar com outros métodos de impressão 3D (AMSBRASIL, 2022).

### 3.2.2 Fabricação de objetos laminados (LOM)

A manufatura de objetos laminados é uma técnica que oferece a vantagem de produzir peças rapidamente, variando em tamanho desde milímetros até metros. O processo inicia com

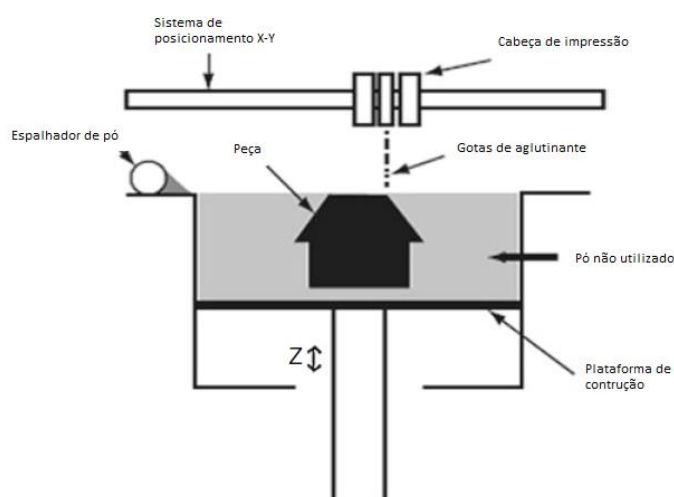
a alimentação contínua de um fio contínuo, que pode ser feito de papel, fita de polímero ou folha de metal, para a máquina. Este fio é então cortado por um laser de dióxido de carbono, com sensores para garantir um posicionamento ideal, formando assim a primeira camada. O material para a segunda camada é adicionado sobre a primeira e pressionado para garantir a adesão entre elas. Após esse passo, o corte a laser continua até a formação da peça desejada (DERMEIK e TRAVITZKY, 2022)

Dermeik e Travitzky (2020) destacam em seus estudos as principais vantagens desta técnica, que incluem a notável diversidade de materiais disponíveis, a capacidade de produção em grande escala de forma rápida e a possibilidade de automatização desse processo. Por outro lado, uma desvantagem identificada é a dificuldade em produzir peças com cavidades internas.

### 3.2.3 *Binder Jetting*

Inventada em Massachusetts em 1993, essa técnica é caracterizada por um processo de impressão 3D no qual um agente de ligação líquida se conecta seletivamente a regiões de um leito de pó. Esse leito de pó é movido por meio de um rolo contra rotativo para formar cada camada do objeto em construção. À medida que as camadas são adicionadas, a plataforma de construção é gradualmente abaixada, como ilustrado na Figura 2, até que a peça seja concluída (ZIANEE; CRANE, 2019).

**Figura 2 - Processo Binder Jetting**



Fonte: Gibson; Rosen; Stucker, 2015

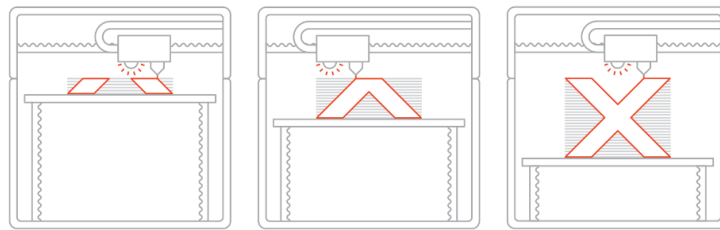
Ziaee e Crane (2019) destacam dentro da tecnologia as vantagens de alta produtividade e baixo custo, além da capacidade de aplicação de diversos materiais. No entanto, uma

difficuldade apontada é a necessidade de um pós-processamento para aprimorar as propriedades mecânicas, já que as peças tendem a ser frágeis após a impressão.

### 3.2.4 *Material Jetting* (MJ)

O método de impressão conhecido como *Material Jetting* se assemelha como adotado pelas impressoras residenciais convencionais, nas quais jatos de tinta polimérica são depositados em uma placa de impressão. No entanto, ao contrário das impressoras residenciais, que produzem uma única camada de tinta, o *Material Jetting* utiliza várias camadas superpostas umas sobre as outras. Para solidificar e curar essas camadas, são empregadas lâmpadas ultravioletas, o que permite que a peça seja finalizada, como ilustrado na Figura 3 (RAJAN *et al.*, 2022).

**Figura 3 - Processo MJ**



Fonte: ENGIPRINTERS, 2023

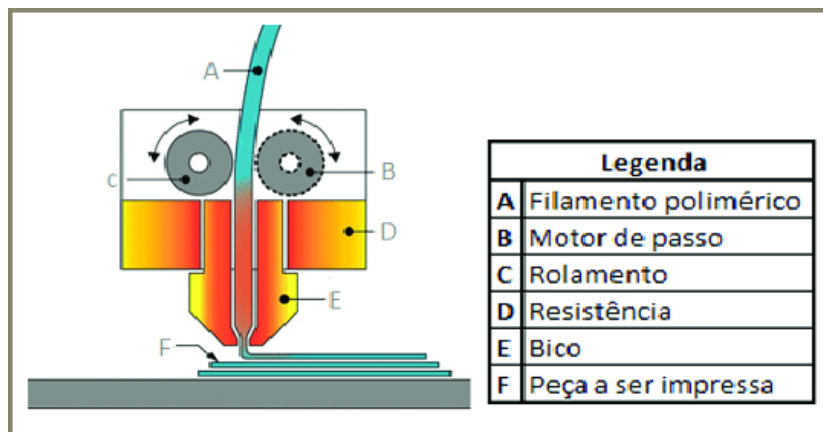
Rajan *et al.* (2022) descrevem essa técnica com a capacidade de produzir várias peças de forma rápida em um único processo, o que é uma vantagem notável. No entanto, eles observam que essa tecnologia envolve custos elevados e as peças resultantes não apresentam boas propriedades mecânicas, muitas vezes exigindo pós-processamentos adicionais para aprimorar sua qualidade.

### 3.2.5 Modelagem por deposição fundida (FDM)

A técnica de modelagem por deposição fundida é a técnica mais conhecida na impressão 3D. Essa tecnologia envolve a extrusão controlada de um material, normalmente um filamento de polímero termoplástico que se diferem pelas características finais desejadas, ele é depositado em pequenas quantidades por meio de um bico extrusor, diretamente sobre a superfície de construção. Essas minúsculas quantidades de material são depositadas em camadas sucessivas,

as quais são fundidas entre si, acumulando para formar a peça finalizada, apresentada na Figura 4.

**Figura 4 - Processo FDM**



Fonte: TRON, 2024

Nesse modelo, é comum empregar um filamento com diâmetro entre 1,75 mm e 3,0 mm. De acordo com Rajan *et al.* (2022), o processo de fabricação é dividido em três fases sequenciais: a primeira envolve o pré-processamento, seguida pela etapa de produção e, por último, o pós-processamento.

O pré-processamento é marcado pelo design do produto e passado para um Software de fatiamento para sua produção. Nesse estágio, os parâmetros de impressão são determinados, desempenhando um papel crucial nas considerações relativas às propriedades mecânicas, tempo de produção e consumo de filamento.

Após todos os parâmetros estarem preparados no programa de fatiamento, inicia a produção, ocorrendo a extrusão do filamento, processando o produto na plataforma de construção. À medida que a peça adquire uma forma específica, a plataforma se move gradualmente para baixo, após a conclusão de cada camada, até que o produto seja completamente finalizado.

Por outro lado, a fase de pós-processamento engloba a remoção do objeto da impressora e sua submissão a um processo de correção de imperfeições. A peça finalizada frequentemente exibe falhas em seu acabamento e requer procedimentos como lixamento e, em alguns casos, aplicação de tinta para aprimorar sua durabilidade e estética (HOTZA, 2009).

No estudo realizado por Rajan *et al.* (2022), são destacadas as principais vantagens do processo FDM, que incluem a acessibilidade facilitada, custos mais baixos de aquisição de máquinas e a capacidade de imprimir produtos multicoloridos. Em comparação com outras técnicas de prototipagem rápida. Esta técnica se destaca por sua maior acessibilidade

econômica. No entanto, é importante mencionar que também apresenta limitações significativas, como a qualidade do acabamento do produto e a necessidade de utilizar estruturas de suporte.

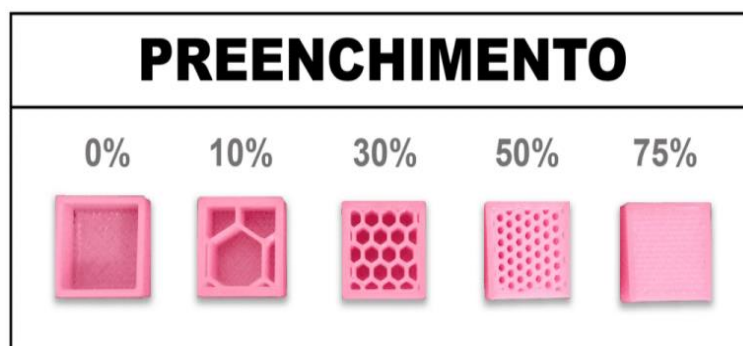
### 3.3 Parâmetros

A partir da concepção discutida sobre a acessibilidade financeira da tecnologia FDM, que também é a técnica mais prevalente, aliada ao estudo que indica seu rápido crescimento, surgiu a ideia de ajustar os parâmetros para fornecer informações ótimas e valiosas para iniciantes que desejam se aventurar nessa técnica. Dentro desse contexto, existem diversos parâmetros que podem ser ajustados e que influenciam diretamente as propriedades da peça produzida, além de afetar o tempo de produção e o consumo de filamento e energia.

#### 3.3.1 Densidade de preenchimento

A densidade de preenchimento é um parâmetro crucial que determina a quantidade de material utilizado na construção da peça. Essa variação pode ir de 0% de massa interna, indicando peças vazias com apenas um contorno, até 100% de massa interna, representando uma peça completamente sólida, conforme apresentado na Figura 5. Conforme o preenchimento aumenta, as propriedades mecânicas da peça são afetadas, tornando-a mais pesada e resistente. No entanto, isso também resulta em um aumento no tempo de produção e no consumo de filamento para sua fabricação (Silva, 2022; RAJAN *et al.*, 2022).

**Figura 5 - Porcentagem de preenchimento**



Fonte: PORTELA, 2023

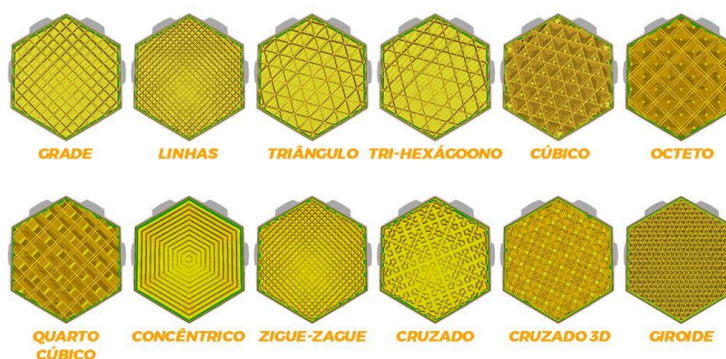
De acordo com o estudo de Ambrós (2019) sobre a impressão FDM, ao manter os parâmetros fixos e variar apenas o preenchimento para 10%, 25% e 50%, observa-se um

aumento na carga máxima que o polímero suportará em tração, conforme esperado, com aumento de densidade dos corpos, maior tende a ser a resistência mecânica.

### 3.3.2 Padrão de preenchimento

O padrão de preenchimento se refere à estrutura interna da peça que está sendo fabricada. Existem várias opções de padrões que podem ser escolhidas durante o processo de impressão, como ilustrado na Figura 6. A escolha do padrão de preenchimento pode ter um impacto significativo nas propriedades da peça, afetando sua resistência à compressão e tração, entre outras características (Cavalcante, 2022; RAJAN *et al.*, 2022).

**Figura 6 - Padrões de preenchimento**



Fonte: VIAU, 2021

No estudo realizado por Jardim (2020), foram analisados vários corpos de prova de resistência mecânica com diferentes padrões de preenchimento, incluindo tri-hexágono, grade, cúbico, triangulo e giróide. Os resultados mostraram que, em termos de tensão de escoamento e tensão máxima, o preenchimento giróide apresentou o maior valor nominal. Em relação à tensão de ruptura e alongamento na ruptura, a amostra com preenchimento triangulo obteve os maiores valores nominais. Já para o módulo de elasticidade, as amostras com preenchimento tri-hexágono e cúbico apresentaram os maiores valores.

Esses resultados demonstram que cada arquitetura interna possui características específicas que influenciam diretamente nos resultados mecânicos, evidenciando a importância de estudar e variar os padrões de preenchimento conforme a aplicação desejada. Assim, o uso pós-fabricação deve levar em consideração essas diferenças para garantir que o material impresso atenda aos requisitos mecânicos específicos de cada aplicação.

### 3.3.3 Espessura da camada

A espessura da camada se refere à altura da camada depositada em cada passagem durante o processo de impressão, e normalmente é determinada pelo diâmetro do bico extrusor. Essa medida pode variar de 0,1 milímetro a 0,3 milímetro, dependendo da configuração da impressora de uso. Esse parâmetro desempenha um papel fundamental na qualidade superficial da peça, bem como no tempo necessário para a produção e nas propriedades de resistência mecânica da peça (Silva, 2022; 3DLAB, 2017).

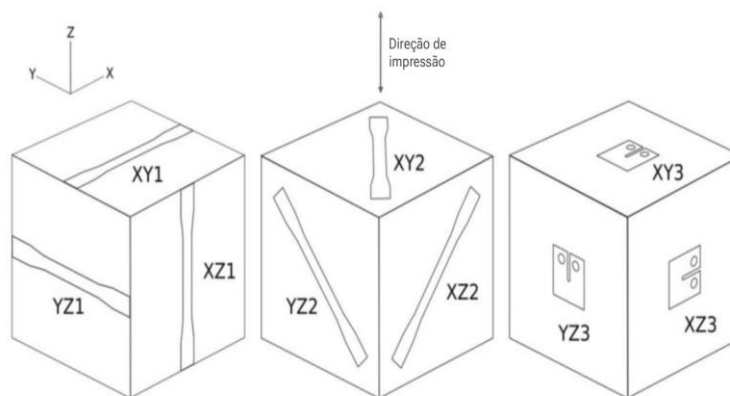
A versão 5.6.0 do software de impressão UltiMaker Cura recomenda o ajuste da altura da camada para otimizar o tempo e a qualidade das impressões. Alturas de camada maiores resultam em impressões mais rápidas, mas com resolução mais baixa, enquanto alturas menores proporcionam maior resolução, porém com impressões mais lentas. O software aconselha manter a altura da camada abaixo de 80% do diâmetro do bico da impressora.

### 3.3.4 Orientação de impressão

A orientação de construção é cuidadosamente planejada durante o desenho do objeto, visando encontrar o ângulo de deposição mais adequado para a impressão. Isso pode incluir a possibilidade de imprimir em relação aos eixos X, Y e Z na plataforma de impressão. Peças criadas nas orientações X e Y são dispostas de forma horizontal em relação à superfície da mesa de impressão, frequentemente não requerendo estruturas de suporte, ao contrário das peças orientadas no eixo Z. (RAJAN *et al.*, 2022).

No trabalho realizado por Bragaglia *et al.* (2023), é abordada a deposição do material, com a constatação de que a orientação horizontal na plataforma de impressão, caracterizada por uma maior área de contato entre a amostra e a plataforma, proporciona um desempenho mecânico superior. A Figura 7 são apresentadas as ideias de direção de impressão realizadas nas amostras do estudo de Bragaglia *et al.* (2023).

**Figura 7 - Direção de impressão das amostras**



Fonte: BRAGAGLIA *et al.* 2023

### 3.3.5 Ângulo de deposição

O ângulo de deposição refere-se à orientação de cada camada durante o processo de impressão. Esse ângulo, geralmente varia de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , influencia o comportamento da peça sob diferentes tipos de esforços aos quais ela será submetida. Portanto, a escolha do ângulo de deposição é determinada pela finalidade e pelo uso pretendido da peça (SILVA, 2022).

### 3.3.6 Velocidade de impressão

A velocidade de impressão refere-se à rapidez com que o bico extrusor se move durante o processo de deposição do material fundido. Quanto maior a velocidade de impressão, menor o tempo necessário para produzir uma peça. Segundo Cavalcante (2022), é comum haver variações na velocidade de deposição entre o perímetro externo e o perímetro interno da peça, sendo o perímetro externo geralmente configurado para ser cerca de 50% mais lento. Isso pode ser observado na Figura 8, retirada do software fatiador *UltiMaker Cura* versão 5.6.0, onde a velocidade de preenchimento interno está configurada de maneira 50% mais lenta que a velocidade da parede. Esse ajuste tem como objetivo alcançar um melhor acabamento e maior precisão dimensional na peça final.

**Figura 8 - Velocidade de impressão *UltiMaker Cura***


| ⌵ Velocidade                  |       |      |
|-------------------------------|-------|------|
| Velocidade de Impressão       | 130.0 | mm/s |
| Velocidade de Preenchimento   | 130.0 | mm/s |
| Velocidade da Parede          | 65.0  | mm/s |
| Velocidade da Parede Exterior | 65.0  | mm/s |
| Velocidade da Parede Interior | 65.0  | mm/s |
| Velocidade Superior/Inferior  | 65.0  | mm/s |
| Velocidade de Percurso        | 250.0 | mm/s |
| Velocidade da Camada Inicial  | 30.0  | mm/s |

Fonte: Produzido pelo autor

### 3.3.7 Temperatura operacional

A temperatura de operação é dividida em duas categorias: a temperatura do bico (também conhecida como temperatura de extrusão) e a temperatura da mesa de impressão. Antes do processo de impressão, o bico deve atingir uma temperatura específica para derreter o filamento e imprimir o produto, normalmente cada polímero apresenta uma temperatura ideal para impressão pelas suas diferenças de composição química. Da mesma forma, durante o processo de impressão, a base da mesa de impressão precisa estar a uma temperatura adequada, para fornecer um resfriamento lento ao material extrudado. Outro fator é uma melhor aderência da primeira camada da peça, não permitindo que ela descole durante o processo (RAJAN *et al.*, 2022; 3DLAB, 2019).

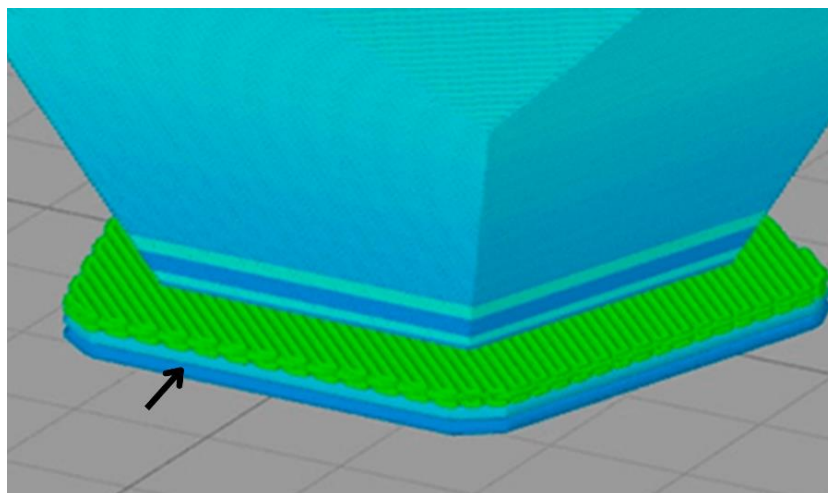
No estudo do comportamento do PLA impresso em 3D conduzido por Bragaglia *et al.* (2023) o autor argumenta que a influência da temperatura do bico é mais significativa em proximidade com as temperaturas de fusão, impactando diretamente nas propriedades mecânicas do produto extrudado.

### 3.3.8 Aderência à mesa

Existem várias maneiras de aprimorar a aderência da impressão à mesa para evitar que a primeira camada se desprenda, prevenindo problemas iniciais. Entre essas técnicas estão o Raft, Brim e Skirt, cada uma com suas especificidades para ser utilizada com o objetivo de evitar o desperdício de filamento e tempo.

O Raft (balsa) é uma camada horizontal descartável adicionada abaixo do objeto a ser impresso, servindo como base para o modelo. O Raft consiste em um número pré-determinado de camadas com uma porcentagem de preenchimento específica e se estende a uma certa distância dos lados do objeto, como pode ser observado pela Figura 9. Isso proporciona uma superfície estável para a impressão, melhorando a aderência à mesa (3DLAB, 2019A).

**Figura 91 - Aderência estilo Raft**

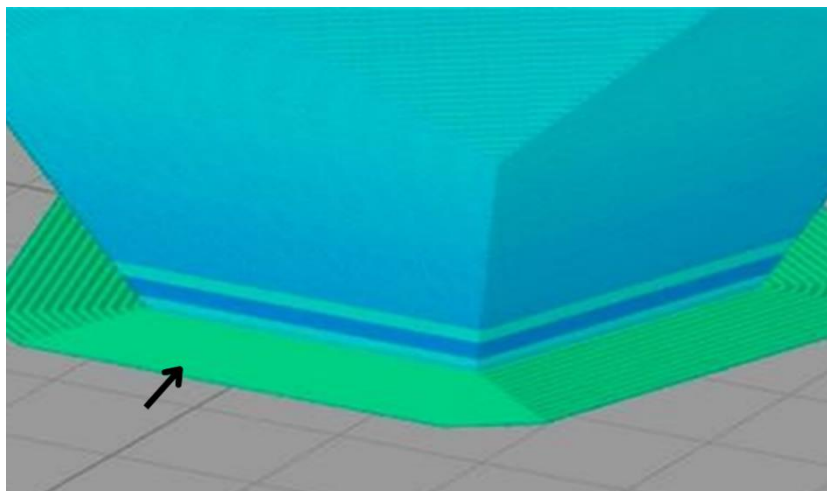


Fonte: 3DLAB 2019A

Essa técnica é especialmente útil ao trabalhar com filamentos ABS, pois ajuda a evitar empenamentos e melhora a aderência da peça à mesa de impressão. Devido à maior área de superfície do Raft em comparação à base da peça, as bordas do Raft são mais propensas a deformações, garantindo que a peça permaneça intacta e livre de problemas.

O Brim (bainha) é uma técnica empregada para manter as bordas da peça fixas, prevenindo o empenamento e auxiliando na adesão à mesa de impressão. Esse método envolve a impressão de vários contornos adicionais, criando um grande anel ao redor da peça, semelhante à borda de um chapéu, se diferenciando pelo Raft pelo apoio não se estender pela peça, apenas pela primeira camada de impressão, como pode ser observado na Figura 10.

**Figura 10 - Aderência estilo Brim**

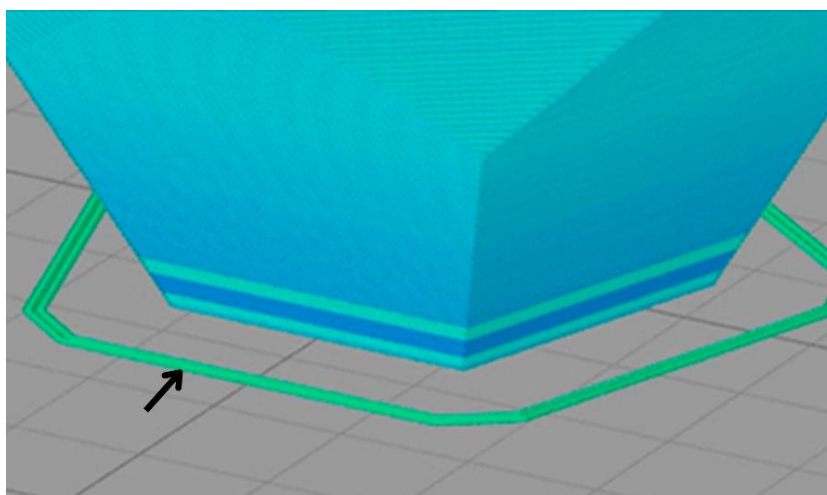


Fonte: 3DLAB 2019A

O Brim é tipicamente utilizado em situações que proporcionam eficiência na impressão e economia de filamento, além de prevenir problemas como o empenamento com filamentos ABS. Embora dispensável para filamentos como o PLA, o Brim facilita a remoção das peças impressas, sendo uma opção recomendada como uma medida preventiva para o sucesso da impressão.

O Skirt é uma linha impressa ao redor do modelo, mas não em contato direto com ele, como pode ser visto na Figura 11. Seu propósito é ajustar o fluxo de filamento e assegurar que a impressão da peça seja realizada de maneira uniforme e precisa.

**Figura 11 - Aderência estilo Skirt**



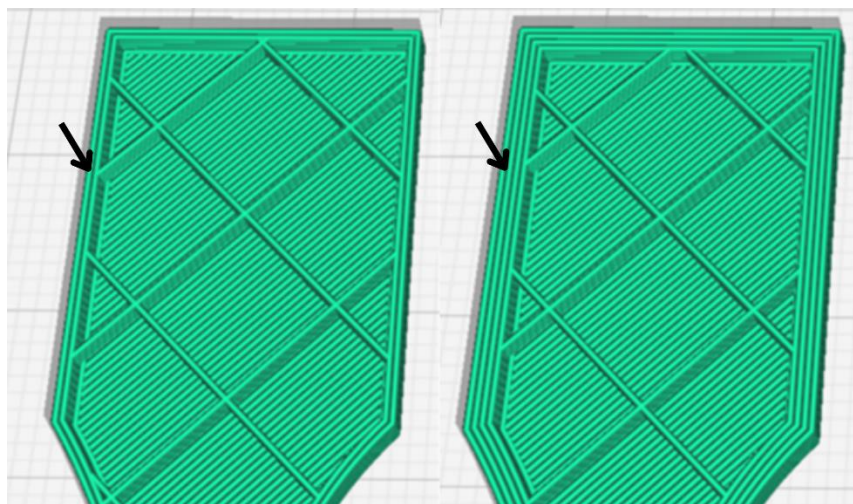
Fonte: 3DLAB 2019A

Esta é a técnica predominante na impressão 3D, ideal para monitorar o desempenho da máquina e o fluxo do material. Um Skirt mal impresso permite detectar problemas desde o início, permitindo ajustes nos primeiros momentos da impressão, economizando tempo e filamento.

### 3.3.9 Paredes

As paredes na impressão 3D são as camadas de contorno que protegem o preenchimento interno da peça. A espessura dessas paredes e o número de filetes que as compõem pode ser configurada conforme necessário. A função principal das paredes é aumentar a durabilidade e melhorar a estética da impressão 3D. Em muitos casos, incrementar uma parede na configuração de fatiamento pode reduzir a porcentagem de preenchimento, resultando em menor uso de material. Isso significa que a peça se torna mais robusta e capaz de suportar maior estresse mecânico sem a necessidade de aumentar a densidade de preenchimento (3DFila, 2018). Como mostrado na Figura 12, o primeiro corpo de prova possui uma parede com duas camadas, enquanto o segundo apresenta uma parede com quatro camadas.

**Figura 12 - Diferença entre 2 e 4 paredes no corpo de prova**



Fonte: Produzido pelo autor

## 3.4 Polímeros do processo FDM

No processo de modelagem por deposição fundida, os principais materiais utilizados são os polímeros. A definição de polímero tem origem no grego, com "poli" significando "muitos" e "meros" significando "unidades". Portanto, um polímero é uma macromolécula formada por

muitas (em geral, dezenas de milhares) unidades de repetição chamadas de meros, as quais estão ligadas por ligações covalentes (CANEVAROLO JR, 2002).

Dentro do processo FDM, os polímeros utilizados são os termoplásticos. De acordo com Canevarolo Jr (2002), “Termoplásticos - plásticos com a capacidade de amolecer e fluir quando sujeitos a um aumento de temperatura e pressão”. Essa característica os torna ideais para o processo de extrusão por filamentos, que é a base da tecnologia FDM, pois permite que o material seja fundido e extrudado de maneira controlada sem mudança na sua estrutura, possibilitando a criação de camadas e construir objetos tridimensionais.

Soares (2021), na impressão 3D, os principais termoplásticos utilizados incluem o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), a Poliamida (Náilon), o Polietileno Tereftalato (PETG) e o Políácido Láctico (PLA). No entanto, o foco de utilização no trabalho em questão recai principalmente sobre o PLA e o PETG. Esses materiais são comumente escolhidos devido às suas propriedades e características específicas que os tornam adequados para diversas aplicações na impressão 3D, variando entre uso de objetos decorativos com a facilidade de impressão a peças biomédicas como biomateriais.

### **3.4.1 Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)**

O ABS é um dos materiais à base de petróleo mais amplamente utilizados na impressão 3D e em diversas outras aplicações, destaca-se por seu preço acessível e por suas excelentes propriedades. Ele é conhecido por sua alta resistência mecânica, resistência à corrosão e resistência ao calor, tornando-o uma escolha popular para a fabricação de peças duráveis e funcionais (RAJAN *et al.*, 2022).

Uma desvantagem do uso do ABS é sua sensibilidade a mudanças abruptas de temperatura, mesmo que sejam de curta duração. Isso pode resultar em retração e, em casos mais severos, em rachaduras durante a fabricação da peça. Portanto, é aconselhável optar por impressoras que sejam fechadas ou que disponham de recursos para controlar a temperatura, a fim de reduzir esses problemas ao imprimir com ABS (RAZGRIZ, 2020).

### **3.4.2 Poliamida (Náilon)**

O náilon é um material conhecido por sua extrema durabilidade e excelente equilíbrio entre resistência e flexibilidade, tornando-se uma alternativa viável ao PLA ou ABS padrão na impressão 3D. Existem três tipos comuns de náilon: náilon 6, náilon 6/6 e náilon 12. Todos eles

compartilham alta resistência e são utilizados para diversas aplicações. No entanto, o náilon 12 se destaca por sua durabilidade e estabilidade quando submetido a temperaturas elevadas e produtos químicos mais agressivos (TREATSTOCK, 2023).

O náilon apresenta algumas aplicações restritas na impressão 3D devido aos desafios associados ao seu uso. Para imprimir com sucesso usando náilon, são necessárias temperaturas de impressão mais elevadas, geralmente na faixa de 220-270°C, diminuindo os números de impressoras disponíveis para o seu uso. Além disso, é comum requerer uma base de impressão aquecida e até mesmo um gabinete aquecido para evitar deformações durante o processo de impressão (RAJAN et al., 2022; TREATSTOCK, 2023).

### **3.4.3 Polietileno Tereftalato (PETG)**

O PETG é fabricado através da combinação do PET (Polietileno Tereftalato) com glicol, o que melhora significativamente as propriedades do PET. Ele é considerado um candidato promissor para substituir o ABS em impressões que demandam boa resistência mecânica. O PETG possui várias vantagens, incluindo facilidade de impressão, excelente adesão à mesa de construção e um menor índice de empenamento em comparação com o ABS. Essas características o tornam uma escolha popular para projetos de impressão 3D que exigem durabilidade e boa qualidade de acabamento (ALL3DP, 2023).

### **3.4.4 Poliláctico (PLA)**

O poliláctico (PLA) apresenta ótimas características ambientais comparado a outros polímeros usados na impressão 3D. O PLA é um biopolímero, obtido da beterraba sacarina e milho, que é biodegradável, o que o torna uma ótima escolha sustentável. Além disso, atende às regulamentações governamentais relacionadas ao uso de termoplásticos não biodegradáveis, tornando-o uma opção mais amigável ao meio ambiente (RAJAN et al., 2022; BRAGAGLIA et al., 2023).

O PLA é um excelente candidato para iniciantes na impressão 3D devido à sua baixa temperatura de extrusão e poucos problemas de impressão, proporcionando uma experiência simples e tranquila. No entanto, suas aplicações são limitadas devido à baixa resistência de fusão e à lenta taxa de cristalização. Por outro lado, o PLA é amplamente utilizado na engenharia biomédica, graças à sua biocompatibilidade e citocompatibilidade, que o tornam adequado para diversas aplicações médicas (RAJAN et al., 2022; BRAGAGLIA et al., 2023).

### 3.5 Programa de Fatiamento

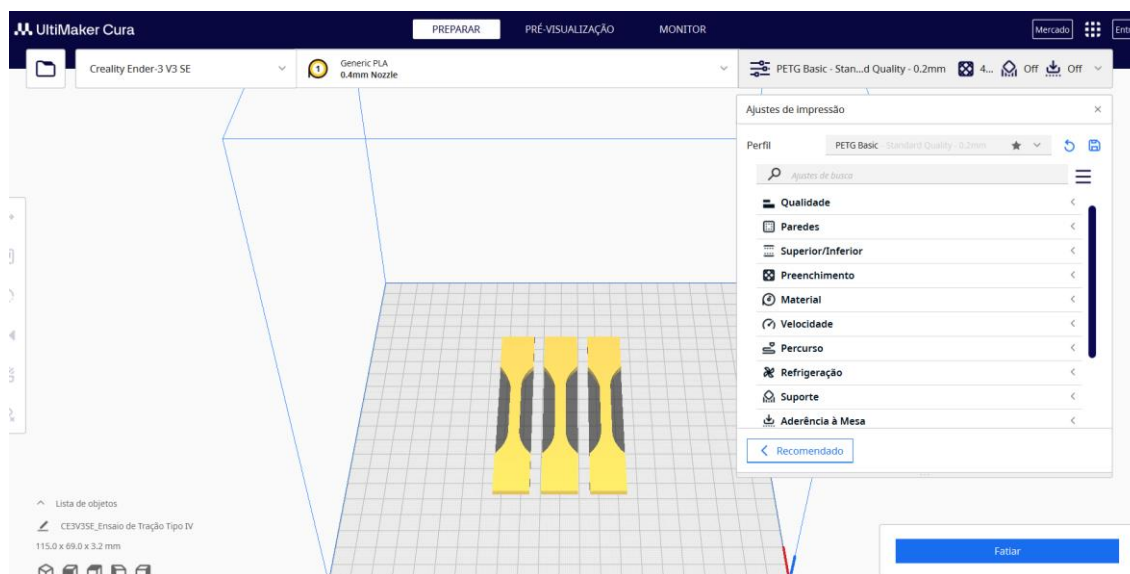
Chuck Hull conhecido como o inventor da tecnologia de impressão 3D e desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento desse campo (DSOURCED, 2023). Os fatiadores 3D são programas essenciais nesse processo, pois transformam um modelo digital de um objeto em um arquivo no formato GCODE, que contém as instruções específicas para a impressora 3D. Basicamente, o fatiador 3D divide a peça digital em uma série de camadas e define as coordenadas precisas que a impressora 3D deve seguir para construir cada camada sucessiva. Esse processo de fatiamento é fundamental para a criação de objetos físicos a partir de modelos digitais (3DLAB, 2019B).

O Ultimaker Cura versão 5.6.0 foi selecionado como o programa fatiador de código aberto gratuito para conduzir esta pesquisa devido à sua frequência de atualização e facilidade de uso. O Cura permite começar no modo “Básico” para uma integração rápida, a partir do qual é possível redefinir as configurações de impressão básicas. Para um controle mais preciso sobre as configurações de impressão, o usuário pode mudar para os modos “Avançado”, “Especialista” ou “Todos”, obtendo acesso a mais de 400 parâmetros de configuração. Esses modos avançados permitem ajustes detalhados para alcançar os melhores resultados.

Sendo um dos fatiadores de impressão 3D mais populares e utilizados no mercado, o Cura oferece suporte para várias marcas de impressoras, com perfis de impressão já configurados para muitos modelos. Isso facilita o uso imediato do software, pois os usuários podem selecionar o perfil adequado para sua impressora sem a necessidade de ajustes adicionais. Caso não haja um perfil disponível, é possível baixar e importar um perfil criado por outro usuário (ALL3DP, 2024).

De acordo com um estudo realizado por Carmo e Kovaliuk (2022) sobre a análise de tempo e acabamento dos softwares de manufatura aditiva, tanto o Cura quanto o PrusaSlicer apresentaram os melhores resultados no que diz respeito ao acabamento das peças impressas, fator muito importante para a perfeição da formação da arquitetura interna e acabamento externo das peças impressas. A interface do software pode ser visualizada na figura 13.

**Figura 23 - Software Ultimaker Cura**



Fonte: Produzido pelo autor

### 3.6 Aplicação do processo FDM

A tecnologia FDM tem uma ampla gama de aplicações na impressão 3D, oferecendo diversos benefícios. De acordo com Rajan *et al.* (2022), essa tecnologia se destaca por sua capacidade de imprimir peças com interiores ocos e formas irregulares, resultando em geometrias com design diferentes. Além disso, os principais benefícios do uso da tecnologia FDM em vários setores incluem a capacidade de imprimir produtos leves, a flexibilidade de impressão multimatérias, tempos de produção reduzidos, custos de investimento em ferramentas mais baixos e uma utilização eficiente de materiais.

Essa técnica é especialmente valiosa para prototipagem e fabricação rápida, sendo uma alternativa econômica em comparação com os métodos de fabricação convencionais, que muitas vezes envolvem máquinas caras. Diversos setores, como aeroespacial, automobilístico, eletrônico, biomédico e construção, têm potencial para aplicar peças produzidas por FDM em suas operações devido às vantagens oferecidas por essa tecnologia (RAJAN *et al.*, 2022).

Conforme um estudo apresentado por Souza (2019), os investimentos na tecnologia de impressão 3D estão distribuídos em diferentes segmentos da seguinte forma: 39% destinados à prototipagem, com foco no desenvolvimento de produtos; 30% voltados para a manufatura, incluindo a integração de impressoras 3D nos processos de produção; 12% alocados no setor de ferramental e moldes; e os 19% restantes direcionados para diversas aplicações, abrangendo áreas como lazer e entretenimento. Isso demonstra a diversidade de aplicações e o potencial de crescimento dessa tecnologia em vários setores da indústria e do mercado de consumo.

A indústria aeroespacial historicamente enfrentou desafios na fabricação de componentes com geometrias complexas que não são viáveis por meio de outros métodos de manufatura. A produção desses componentes tradicionalmente envolve custos elevados e é um processo demorado. No entanto, devido à necessidade de atender a pedidos específicos sob demanda, surgiu a solução da técnica FDM (RAJAN *et al.*, 2022; STRATASYS, 2023).

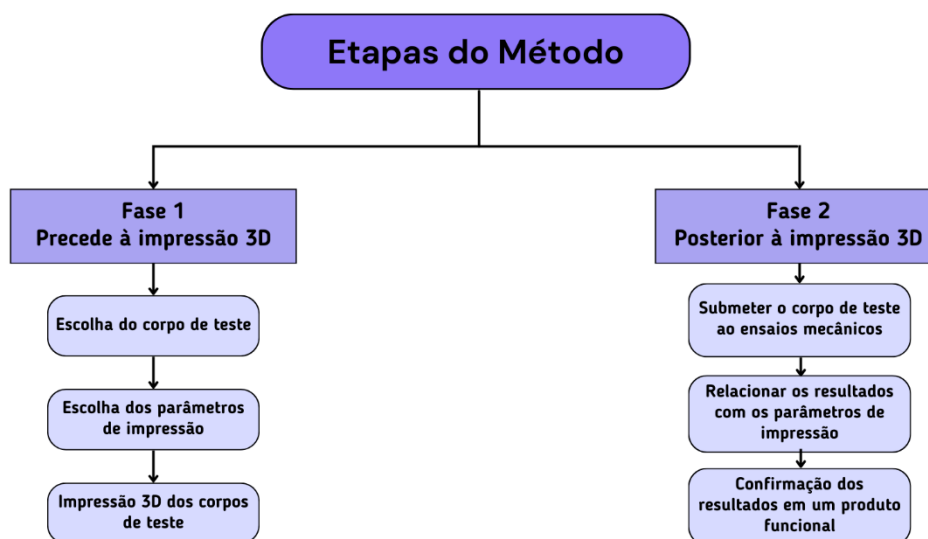
A *Stratasys* desempenhou um papel fundamental na substituição dos conduítes de alumínio fundido por peças de policarbonato impressas em 3D no helicóptero Bell. Essa mudança proporcionou uma vantagem significativa, reduzindo o tempo necessário para produzir esses componentes de seis semanas, no caso do alumínio fundido, para apenas dois dias e meio no processo FDM. Além da economia de tempo, essa alteração também resultou em custos consideravelmente mais baixos (HIEMENZ, 2013).

Rajan *et al.* (2022) conduziram estudos que exploram a aplicação da tecnologia FDM na área da eletrônica. Esses estudos envolveram a impressão de diversos compósitos poliméricos que foram utilizados como materiais elétricos, destacando o potencial dessa tecnologia na fabricação de componentes e dispositivos eletrônicos de forma inovadora e eficaz. Um dos estudos foi a impressão de eletrodos feitos de PLA com grafeno, que demonstrou ser bem-sucedido na sua aplicação para detecção eletroquímica. Esse resultado ressalta a capacidade da tecnologia FDM de criar componentes elétricos avançados e funcionais com materiais inovadores, como o grafeno, para aplicações específicas na área da eletrônica e análise eletroquímica.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na figura 14 detalha os métodos empregados para o desenvolvimento desta pesquisa, estruturada em duas fases distintas.

**Figura 14 – Fluxograma do método**



Fonte: Produzido pelo autor

Na primeira fase, que precede a etapa de impressão 3D, foram selecionados corpos de prova dos materiais PLA e PETG, além dos parâmetros iniciais de impressão, configurados para criar múltiplas opções de objetos de teste para impressão.

Na segunda fase, as peças impressas foram submetidas a ensaios de tração em uma máquina universal de ensaios. Esses ensaios possibilitaram uma análise e comparação dos dados obtidos com os parâmetros escolhidos, resultando em uma relação resistência mecânica de tração com a variação da composição dos corpos de prova. Após o primeiro teste, foi produzido mais corpos de prova, agora com parâmetros de maior resistência em sua composição, relacionando o fator custo de produção aos parâmetros de impressão.

Para validar os dados encontrados nos corpos de prova, foi aplicado os conceitos dos testes em um produto, comparando suas composições e realizando o ensaio de tração. O produto foi obtido pela plataforma *Thingiverse*, um site onde usuários compartilham designs gratuitos de uso artístico e funcional em formatos para impressão 3D, que após modelagem foi nominado como dispositivo de carga para sacolas plásticas.

#### 4.1.1 Materiais e equipamentos de medição

#### 4.1.2 Filamentos de impressão

Os materiais escolhidos para o projeto foram o filamento de PLA e PETG obtidos pela empresa 3DLAB. O PLA é amplamente utilizado na impressão 3D devido à sua facilidade de impressão e excelente desempenho na manutenção da qualidade dimensional das peças, além de suas propriedades como biopolímero. Na figura 15, é possível observar o filamento de PLA em rolo.

**Figura 15 - Rolo de filamento PLA**



Fonte: 3DLAB 2023

Na Tabela 1 são apresentadas algumas características técnicas de impressão que o fornecedor 3DLAB disponibiliza do filamento PLA.

**Tabela 1 – Propriedades PLA**

| Propriedade                      | Valor        |
|----------------------------------|--------------|
| Filamento peso líquido           | 1 Kg         |
| Diâmetro                         | 1,75 mm      |
| Temperatura de impressão         | 190 a 220 °C |
| Temperatura da mesa de impressão | Até 60 °C    |
| Cor                              | Branco       |

Fonte: 3DLAB 2023

É importante ressaltar a temperatura de impressão 190 a 220 °C, e de mesa de impressão até 60 °C, do PLA que irá relacionar com o tempo de impressão do corpo de teste, já que a

impressora precisa de tempo e energia para chegar na temperatura de trabalho. Já a escolha do PETG, foi escolhido devido à sua facilidade de impressão, excelente adesão à mesa de construção, facilidade de impressão comparado ao ABS e boa resistência mecânica. Essas características o tornam ideal para projetos de impressão 3D que exigem durabilidade e alta qualidade de acabamento. Na Figura 16, é possível observar o filamento de PLA em rolo.

**Figura 16 - Rolo de filamento PETG**



Fonte: 3DLAB 2023

Na Tabela 2 é apresentado algumas características técnicas de impressão que o fornecedor 3DLAB disponibiliza do filamento PETG.

**Tabela 2 - Propriedades PETG**

| Propriedade                      | Valor        |
|----------------------------------|--------------|
| Filamento peso líquido           | 1 Kg         |
| Diâmetro                         | 1,75 mm      |
| Temperatura de impressão         | 235 a 255 °C |
| Temperatura da mesa de impressão | Até 85 °C    |
| Cor                              | Branco       |

Fonte: 3DLAB 2023

A temperatura de impressão 235 a 255 °C, e mesa de impressão até 85 °C do PETG por sua vez apresenta temperaturas de trabalho maiores que o PLA, 190 a 220 °C e mesa até 60 °C, assim consumindo mais tempo e energia, resultando em maiores custos para produção dos objetos de teste.

4.1.3 Impressora

A impressora utilizada para este trabalho foi a Ender 3 V3 SE, uma impressora de entrada da marca Creality, lançada em 2021, Figura 17. Esta impressora possui mesa com movimento nos eixos X e Y, e o cabeçote de impressão com movimento no eixo Z, modelo Direct Drive.

Figura 17 - Impressora utilizada



Fonte: Produzido pelo autor

Assim, o modelo se destaca em comparação a outras impressoras similares, oferecendo facilidade de montagem e, principalmente, o nivelamento automático, que com sensor de pressão simplifica a etapa inicial da impressão e elimina a necessidade de ajustes manuais. A Ender 3 V3 SE é capaz de imprimir materiais como PLA, PETG e TPU. Suas configurações estão apresentadas na Tabela 3 (CREALITY, 2024).

Tabela 3 - Características da impressora.

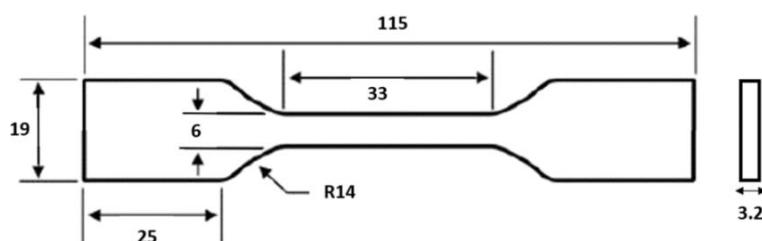
| Características           | Valor           |
|---------------------------|-----------------|
| Largura de impressão      | 220 mm          |
| Profundidade de impressão | 220 mm          |
| Altura de impressão       | 250 mm          |
| Potência                  | 350 Watt        |
| Velocidade de impressão   | máximo 250 mm/s |
| Temperatura de impressão  | máximo 260 °C   |
| Temperatura da mesa       | máximo 100 °C   |

Fonte: Creality 2024

## 4.2 Corpos de prova

O estudo sobre a produção dos corpos de prova foi realizado conforme a norma ASTM D638-14 que delimita os dados sobre propriedades de tração, sendo essencial para o controle e a especificação de materiais plásticos. A norma abrange cinco modelos de corpos de prova com diferentes geometrias. A Figura 18 é apresentado o esboço do modelo de corpo de prova tipo IV, utilizado como referência nos testes sendo produzidos três corpos de prova para cada variação, para garantir a consistência dos resultados e evitar erros causados por defeitos nas amostras (ASTM, 2022).

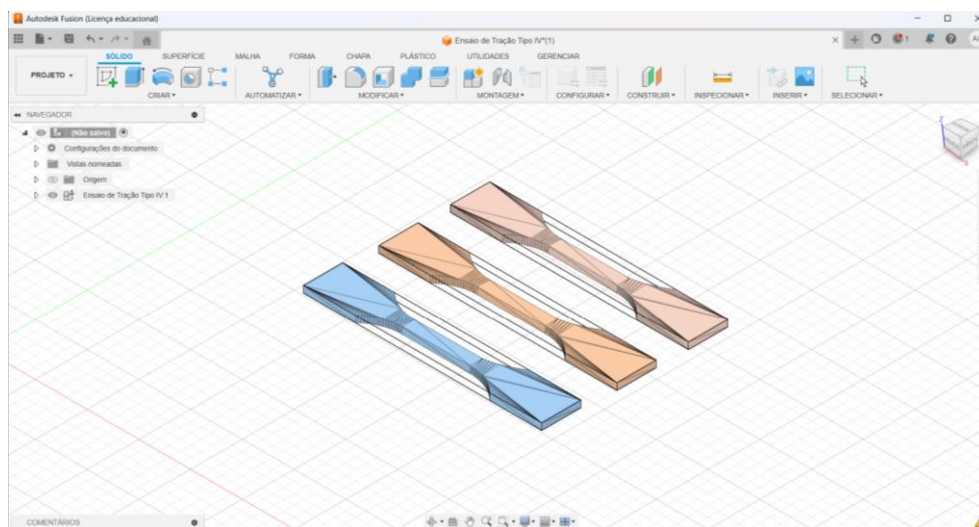
**Figura 3 - Modelo corpo de prova tipo IV**



Fonte: ASTM 2022

Após a modelagem, o corpo de prova tipo IV foi desenvolvido no *software Fusion 360* e convertido para o formato STL, conforme ilustrado na Figura 19.

**Figura 19 - Corpos de prova formato STL**



Fonte: Produzido pelo autor

A definição do planejamento experimental foi realizada com foco na otimização do uso de filamento e resistência mecânica de tração. Para isso, foram selecionados os seguintes parâmetros: porcentagem de preenchimento, arquitetura interna e número de paredes em PLA e PETG. As combinações foram formadas mantendo alguns parâmetros fixados e variando apenas um valor de cada vez. Assim, foram produzidos 18 corpos de prova (CP), com três unidades para cada variação. A distribuição final dessas combinações está apresentada na Tabela 4.

**Tabela 4 - Composições dos corpos de prova**

| Corpo de prova | Preenchimento (%) | Arquitetura interna | Número de paredes | Materiais |
|----------------|-------------------|---------------------|-------------------|-----------|
| A1             | 20                | Grade               | 2                 | PLA       |
| A2             | 40                | Grade               | 2                 | PLA       |
| A3             | 60                | Grade               | 2                 | PLA       |
| A4             | 80                | Grade               | 2                 | PLA       |
| A5             | 20                | Giróide             | 2                 | PLA       |
| A6             | 20                | Cúbico              | 2                 | PLA       |
| A7             | 20                | Grade               | 4                 | PLA       |
| A8             | 20                | Grade               | 2                 | PETG      |
| A9             | 40                | Grade               | 2                 | PETG      |
| A10            | 60                | Grade               | 2                 | PETG      |
| A11            | 80                | Grade               | 2                 | PETG      |
| A12            | 20                | Giróide             | 2                 | PETG      |
| A13            | 20                | Cúbico              | 2                 | PETG      |
| A14            | 20                | Grade               | 4                 | PETG      |

Fonte: Produzido pelo autor

O detalhamento dos parâmetros que não foram alterados em todos os testes de impressão está apresentado na Tabela 5, os quais foram alternados de acordo com cada característica do material utilizado.

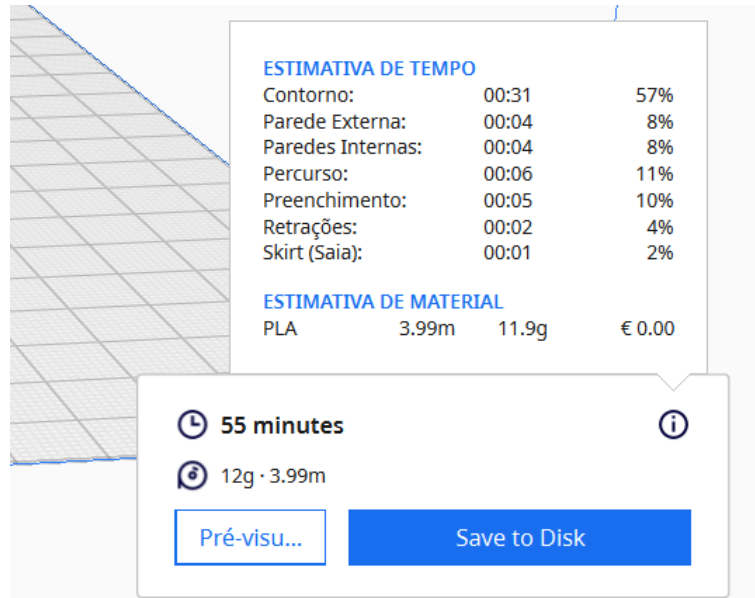
**Tabela 5 - Parâmetros não alterados**

| Parâmetros               | Valor    |          |
|--------------------------|----------|----------|
| Material                 | PLA      | PETG     |
| Altura de camada         | 0,2 mm   | 0,2 mm   |
| Fluxo                    | 100 %    | 100 %    |
| Temperatura de impressão | 217 °C   | 247,5 °C |
| Temperatura da mesa      | 60 °C    | 70 °C    |
| Espessura da parede      | 0,4 mm   | 0,4 mm   |
| Distância de retração    | 1,0 mm   | 2,5 mm   |
| Velocidade de impressão  | 135 mm/s | 135 mm/s |
| Ângulo de deposição      | 45°/-45° | 45°/-45° |
| Aderência a mesa         | Skirt    | Skirt    |

Fonte: Produzido pelo autor

Durante o processo de fatiamento dos corpos de prova no software de impressão *Ultimaker Cura*, foi possível obter estimativas de tempo de impressão e consumo de filamento em gramas, conforme ilustrado na Figura 20.

**Figura 20 - Estimativa de tempo Software Cura**



Fonte: Produzido pelo autor

Com base nos dados de tempo de impressão ( $T_i$ ) fornecidos pelo software, na potência de impressão ( $P_i$ ), que é de 350 Watts conforme indicado na Tabela 3 que apresenta as especificações da impressora utilizada, e na tarifa de energia elétrica vigente ( $T_e$ ), é possível calcular o consumo energético da produção de cada corpo de prova. Para Minas Gerais, no mês de junho de 2024, a tarifa de energia da concessionária CEMIG foi de R\$ 0,9838 por kWh. A estimativa de consumo de energia ( $C_e$ ) pode ser calculada utilizando a equação 1:

$$C_e (R\$) = \frac{\left(\frac{T_i}{60}\right) * P_i * T_e}{1000} \quad (1)$$

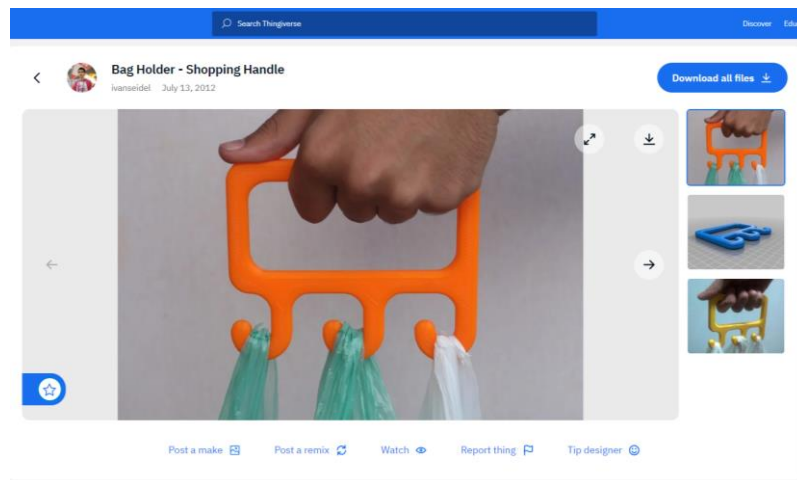
Além disso, com o consumo de filamento em gramas (G) informado pelo Cura e os preços de compra de filamento de PLA (R\$ 108,90 por kg) e PETG (R\$ 118,90 por kg), foi possível calcular o custo de filamento ( $C_f$ ) para cada impressão, utilizando a equação 2:

$$Cf (R\$) = \frac{G * P}{1000} \quad (2)$$

Após a impressão e testes dos corpos de prova, foi possível identificar a influência de cada parâmetro de impressão, foi determinado o corpo de prova de composição de parâmetros ideais, o que resulta em maior resistência mecânica de tração, assim realizando novos testes de tração e relacionando os resultados.

Em seguida, os resultados dos corpos de provas foram aplicados a um objeto de teste, selecionado no site *Thingiverse*, que permite filtrar por classificações e examinar os itens mais populares e frequentemente utilizados pelos usuários. Assim, foi escolhido um objeto considerado útil e amplamente empregado por essa comunidade, com mais de treze mil *downloads* do arquivo SLT pronto para impressão, conforme visualizado na Figura 21.

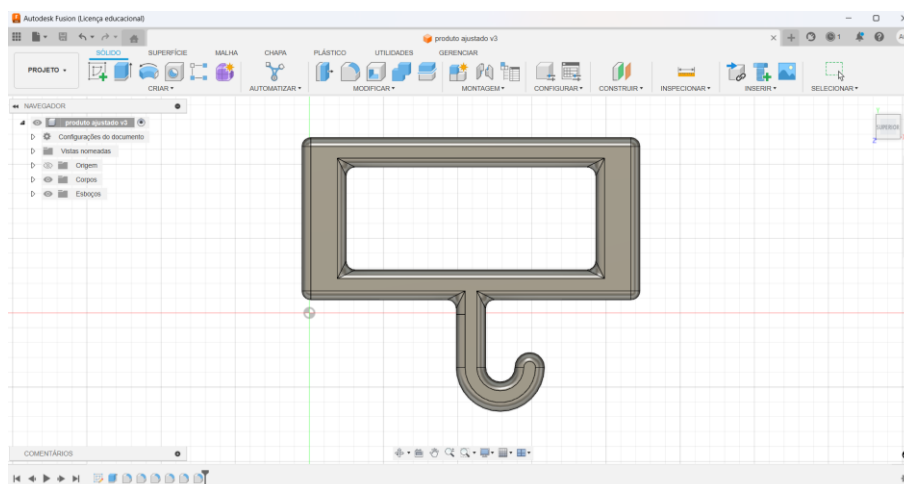
**Figura 21 - Produto retirado do site *Thingiverse***



Fonte: SEIDEL 2012

O desenho acima foi remodelado utilizando o software de modelagem, design e montagens *Fusion 360*, com o objetivo de reduzir o tempo de impressão e o consumo de filamento, sem alterar a funcionalidade do produto. O resultado desse processo é o design do dispositivo de carga para sacolas plásticas (DCSP), apresentado na Figura 22.

**Figura 22 - Dispositivo de carga para sacolas plásticas**



Fonte: Produzido pelo autor

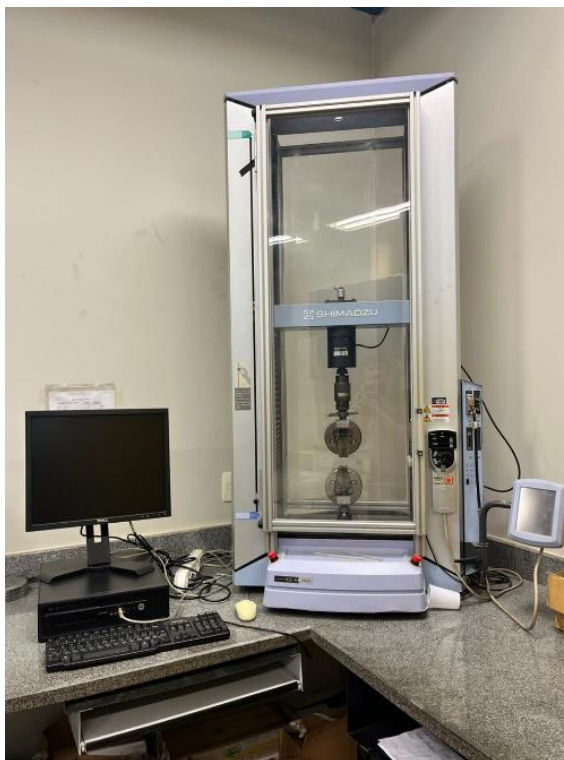
### 3.3 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado no Laboratório de Polímeros do CEFET-MG, campus Nova Suíça, conforme as especificações da norma ASTM D638-14, que regula testes de tração em polímeros. A partir desse ensaio, foi possível obter os dados de força (N) e deslocamento (mm) e, dessa forma, determinar as propriedades mecânicas. A resistência à tração, expressa em MPa, foi calculada pela equação 3, dividindo-se a força pela área (mm<sup>2</sup>), enquanto a deformação convencional em porcentagem, foi obtida pela equação 4, que relaciona comprimento útil do corpo de prova em qualquer ponto do ensaio pelo seu comprimento inicial.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

$$\epsilon e = \frac{(\Delta L)}{L0} \quad (4)$$

O ensaio foi realizado com uma velocidade de 2 mm/min, utilizando uma máquina universal de ensaios, a Shimadzu AG-X 10kN, conforme ilustrado na Figura 23. A partir desses dados, foram construídas curvas de tensão versus deformação convencional utilizando o *software* SciDAVis, o que facilitou a análise e interpretação dos resultados.

**Figura 23 - Shimadzu AG-X 10Kn**

Fonte: Produzido pelo autor

Os métodos de interpretação dos resultados basearam-se inicialmente na análise das composições dos corpos de prova, variando os parâmetros e comparando a influência do aumento do preenchimento interno, das diferentes arquiteturas e do aumento no número de paredes nos materiais PETG e PLA, considerando suas curvas tensão-deformação convencionais. Após essa análise, com os resultados obtidos, foi possível realizar testes em corpos de prova com composições de parâmetros ideais, comparando os valores de tensão e deformação. Finalmente, todos os resultados foram comparados com o ensaio de tração feito com o produto DCSP.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Custo da impressão dos corpos de prova

Utilizando as equações 1 e 2, dispostas no item 4.2 da metodologia foi possível fazer a previsão do custo necessário à obtenção dos corpos de prova de tração, fórmulas para calcular os dois custos mencionados anteriormente, podemos somá-los para obter o custo total de impressão de cada corpo de prova empregado neste estudo, conforme apresentado na Tabela 7.

**Tabela 6 - Custo dos corpos de prova**

| Corpo de prova | Tempo de impressão (min) | Consumo de energia (R\$) | Consumo de material (g) | Custo do filamento (R\$) | Custo total (R\$) |
|----------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------|
| A1             | 55                       | 0,31                     | 11,9                    | 1,30                     | 1,61              |
| A2             | 63                       | 0,36                     | 13,5                    | 1,47                     | 1,83              |
| A3             | 69                       | 0,40                     | 15,0                    | 1,63                     | 2,03              |
| A4             | 75                       | 0,43                     | 16,5                    | 1,80                     | 2,23              |
| A5             | 59                       | 0,33                     | 11,9                    | 1,30                     | 1,63              |
| A6             | 55                       | 0,31                     | 11,9                    | 1,30                     | 1,61              |
| A7             | 58                       | 0,34                     | 12,9                    | 1,40                     | 1,74              |
| A8             | 62                       | 0,36                     | 11,9                    | 1,41                     | 1,77              |
| A9             | 70                       | 0,40                     | 13,4                    | 1,59                     | 1,99              |
| A10            | 76                       | 0,43                     | 15,0                    | 1,79                     | 2,22              |
| A11            | 82                       | 0,47                     | 16,5                    | 1,96                     | 2,43              |
| A12            | 66                       | 0,38                     | 11,9                    | 1,41                     | 1,79              |
| A13            | 62                       | 0,36                     | 11,9                    | 1,41                     | 1,77              |
| A14            | 63                       | 0,37                     | 12,9                    | 1,53                     | 1,90              |

Fonte: Produzido pelo autor

Com base nos dados de consumo de cada variável e no custo total calculado, foi possível identificar que os corpos de prova A1 e A6 se destacam por serem as impressões mais rápidas e de menor custo de produção. Essa economia se deve à impressão em PLA com 20% de preenchimento, utilizando uma estrutura interna do tipo grade e cúbica, com duas paredes de 0,4 mm de espessura, resultando em um custo total de R\$ 1,61. Em comparação, a arquitetura giróide, com as mesmas características e consumo de material, apresentou um tempo de impressão quatro minutos mais longo, elevando o custo para R\$ 1,63.

As impressões em PETG, por outro lado, requerem um tempo de impressão maior devido às características do material, como a necessidade de uma maior distância de retração e temperaturas mais elevadas na mesa e no bico de extrusão. Essas demandas prolongam o tempo

de operação da impressora em comparação ao PLA. Embora o consumo de material seja semelhante entre PETG e PLA quando utilizados os mesmos parâmetros, o custo dos corpos de prova em PETG é mais alto devido ao preço mais elevado do filamento no mercado. O maior valor de impressão foi observado no corpo de prova A11, que custou R\$ 2,43, devido à combinação de PETG com 80% de preenchimento, o que resultou em um grande consumo de filamento e tempo de impressão.

Dessa forma, maiores porcentagens de preenchimento resultam em tempos de impressão maiores e em maiores custos de produção, conforme aumenta a deposição de material no corpo de prova, o consumo de energia e de filamento acompanham proporcionalmente. O aumento no número de paredes também impacta o tempo de impressão e o consumo de filamento, embora de forma mais sutil. Por exemplo, no caso do PLA, ao comparar o corpo de prova A1 com duas paredes e o A7 com quatro paredes, observou-se uma diferença de três minutos e uma grama de filamento, resultando em uma diferença de R\$ 0,13.

Portanto, de modo geral, a impressão com PLA é mais econômica do que com PETG. A combinação de duas paredes de espessura e as arquiteturas internas de grade e cúbica mostraram-se as mais eficientes em termos de tempo de impressão e custo, porém a diferença de custo será relacionada aos resultados dos ensaios mecânicos para encontrar um balanço entre resistência e consumo.

## **4.2 Resultados ensaio de tração**

O ensaio de tração permitiu obter dados essenciais para análise, como as informações de força e alongamento ao longo do tempo em que o material foi submetido à tração. A partir desses dados, foi possível elaborar tabelas de valores comparativos e os gráficos de tensão versus deformação convencional.

## **4.3 Limite de resistência à tração**

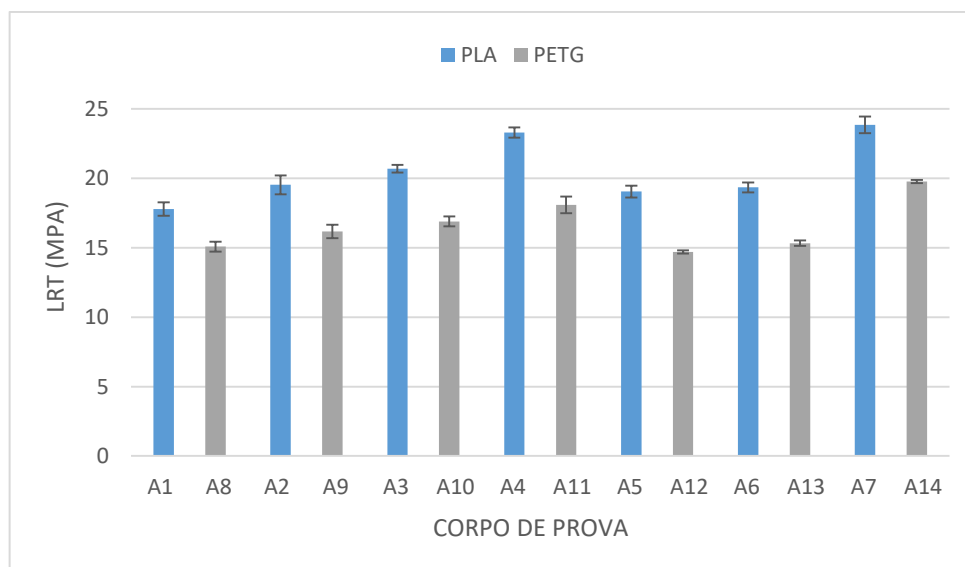
Na Tabela 8 são apresentados os valores do limite de resistência à tração (LRT) a cada variação de parâmetros dos corpos de prova (CPs).

**Tabela 7 - Limite de resistência a tração dos CPs**

| Corpo de prova | Preenchimento (%) | Arquitetura interna | Número de paredes | Materiais | LRT (MPa)  |
|----------------|-------------------|---------------------|-------------------|-----------|------------|
| A1             | 20                | Grade               | 2                 | PLA       | 17,8 ± 0,5 |
| A2             | 40                | Grade               | 2                 | PLA       | 19,5 ± 0,7 |
| A3             | 60                | Grade               | 2                 | PLA       | 20,7 ± 0,2 |
| A4             | 80                | Grade               | 2                 | PLA       | 23,3 ± 0,4 |
| A5             | 20                | Giróide             | 2                 | PLA       | 19,0 ± 0,4 |
| A6             | 20                | Cúbico              | 2                 | PLA       | 19,3 ± 0,4 |
| A7             | 20                | Grade               | 4                 | PLA       | 23,8 ± 0,6 |
| A8             | 20                | Grade               | 2                 | PETG      | 15,1 ± 0,4 |
| A9             | 40                | Grade               | 2                 | PETG      | 16,2 ± 0,5 |
| A10            | 60                | Grade               | 2                 | PETG      | 16,9 ± 0,4 |
| A11            | 80                | Grade               | 2                 | PETG      | 18,1 ± 0,6 |
| A12            | 20                | Giróide             | 2                 | PETG      | 14,7 ± 0,1 |
| A13            | 20                | Cúbico              | 2                 | PETG      | 15,3 ± 0,2 |
| A14            | 20                | Grade               | 4                 | PETG      | 19,8 ± 0,1 |

Fonte: Produzido pelo autor

A partir da tabela de resultados, é possível identificar os melhores desempenhos em cada variação de parâmetro. O primeiro parâmetro relevante a ser avaliado é o material PLA, que apresentou um limite de resistência à tração superior ao do PETG em todas as comparações de parâmetros, onde a única variável alterada foi o material. Um exemplo disso é a comparação entre as combinações A1 e a combinação A8, em que o único fator de diferença é o material utilizado. A Figura 24 em conjunto com a Tabela 9, ilustra essas comparações e destaca algumas semelhanças entre os resultados entre os ensaios de PLA e PETG.

**Figura 24 - Análise gráfica LRT entre PLA e PETG**

Fonte: Produzido pelo autor

**Tabela 8 - Análise numérica LRT entre PLA e PETG**

| CPS PLA | LRT(MPa)   | CPS PETG | LRT(MPa)   |
|---------|------------|----------|------------|
| A1      | 17,8 ± 0,5 | A8       | 15,1 ± 0,4 |
| A2      | 19,5 ± 0,7 | A9       | 16,2 ± 0,5 |
| A3      | 20,7 ± 0,2 | A10      | 16,9 ± 0,4 |
| A4      | 23,3 ± 0,4 | A11      | 18,1 ± 0,6 |
| A5      | 19,0 ± 0,4 | A12      | 14,7 ± 0,1 |
| A6      | 19,3 ± 0,4 | A13      | 15,3 ± 0,2 |
| A7      | 23,8 ± 0,6 | A14      | 19,8 ± 0,1 |

Fonte: Produzido pelo autor

A partir da análise da figura 24 e da Tabela 9, é possível comparar os corpos de prova de PLA (A1 a A7) com os de PETG (A8 a A14), que possuem a mesma composição, diferenciando-se apenas pelo material utilizado. Esses dados evidenciam que o PLA apresenta valores de limite de resistência à tração superiores aos do PETG, suportando cargas mais elevadas antes de romper quando submetido à tração. Outro aspecto relevante demonstrado pelo gráfico é a consistência nos parâmetros entre os dois materiais; à medida que os valores de LRT do PLA variam, os do PETG seguem um padrão semelhante. Um exemplo disso são as composições com os maiores valores de LRT: os CPs A5 e A11, que possuem 80% de preenchimento interno e os CPs A7 e A14.

Com os resultados do ensaio de tração, foi possível identificar que o aumento da porcentagem de preenchimento interno dos corpos de prova leva a um aumento na resistência. Isso ocorre porque uma maior deposição de filamento no interior do corpo de prova aumenta sua massa, permitindo que ele suporte uma carga maior antes de se romper. As comparações revelam que, no PLA, o CP A1 com 20% de preenchimento, ao passar para o CP A5, com 80% de preenchimento, apresentou um aumento de aproximadamente 31% em LRT. No caso do PETG, o CP A8 com 20% de preenchimento, para o CP A11, com 80% de preenchimento, resultou em um aumento de cerca de 20%.

Essa tendência é similar ao estudo de Ambrós (2019), que observou um aumento na tensão máxima de tração de 18,60 MPa para 30,93 MPa ao elevar o preenchimento de 10% para 50%.

O parâmetro de arquitetura interna resultou em diferentes valores de resistência à tração para cada material. Para o PLA, as arquiteturas cúbica e giróide, os CPs A5 e A6, registraram valores médios de LRT próximos respectivamente, com valores aproximadamente 19,5% maiores que a arquitetura em grade, representada pelo CP A1. Já no PETG, as arquiteturas em

grade e cúbica, nos CPs A8 e A12, mostraram valores médios semelhantes respectivamente, enquanto a arquitetura giróide, no CP A13, apresentou o menor valor médio de LRT.

O número de paredes é o parâmetro que mais contribui para um maior limite de resistência à tração. Os corpos de prova de PLA A7 e PETG A14, com quatro paredes de 0,4 mm em comparação aos corpos de prova PLA A1 e PETG A8, com duas paredes de 0,4 mm, mostraram um aumento significativo nos valores de resistência, resultando em aumentos de aproximados de 34% e 31%, respectivamente. Os resultados apresentaram similaridade aos estudos de Abrão (2023) e Alves *et al.* (2021), que mostraram em seus testes que os parâmetros de números de paredes e porcentagem de preenchimento interno na produção das amostras foram os que mais influenciaram nas propriedades mecânicas.

#### 4.3.1 Deformação na ruptura

A Tabela 9 apresenta os valores de deformação na ruptura para cada variação de parâmetros dos corpos de prova.

**Tabela 9 - Deformação dos CPs**

| Corpo de prova | Preenchimento (%) | Arquitetura interna | Número de paredes | Materiais | Deformação na ruptura (%) |
|----------------|-------------------|---------------------|-------------------|-----------|---------------------------|
| A1             | 20                | Grade               | 2                 | PLA       | 4,5 ± 0,3                 |
| A2             | 40                | Grade               | 2                 | PLA       | 5,4 ± 0,5                 |
| A3             | 60                | Grade               | 2                 | PLA       | 4,7 ± 0,3                 |
| A4             | 80                | Grade               | 2                 | PLA       | 5,0 ± 0,3                 |
| A5             | 20                | Giróide             | 2                 | PLA       | 5,1 ± 0,4                 |
| A6             | 20                | Cúbico              | 2                 | PLA       | 5,1 ± 0,7                 |
| A7             | 20                | Grade               | 4                 | PLA       | 5,6 ± 0,1                 |
| A8             | 20                | Grade               | 2                 | PETG      | 8,5 ± 0,5                 |
| A9             | 40                | Grade               | 2                 | PETG      | 8,5 ± 0,9                 |
| A10            | 60                | Grade               | 2                 | PETG      | 7,6 ± 0,1                 |
| A11            | 80                | Grade               | 2                 | PETG      | 6,1 ± 0,3                 |
| A12            | 20                | Giróide             | 2                 | PETG      | 9,6 ± 0,4                 |
| A13            | 20                | Cúbico              | 2                 | PETG      | 9,0 ± 0,7                 |
| A14            | 20                | Grade               | 4                 | PETG      | 10,7 ± 0,8                |

Fonte: Produzido pelo autor

Com os resultados da tabela de deformação, é possível observar que o material PETG apresentou valores de deformação superiores em todas as amostras em comparação ao PLA, suportando uma maior deformação antes de sua ruptura. O maior valor registrado foi na combinação CP A14, que utilizou PETG com 20% de preenchimento, arquitetura interna de

grade e quatro paredes. Em contrapartida, a combinação CP A1, feita com PLA com 20% de preenchimento, arquitetura interna de grade e duas paredes, apresentou o menor valor médio de deformação ruptura.

No estudo de Santana *et al.* (2018) sobre a caracterização de PETG e PLA processados por injeção e impressão 3D, foi encontrado que, no ensaio de tração, o PLA é aproximadamente 1,8 vezes, ou 79%, mais rígido que o PETG. O estudo identificou o PETG como um polímero flexível e o PLA como um polímero rígido, sugerindo que a maior flexibilidade do PETG pode estar relacionada à sua estrutura amorfa.

Os valores de deformação na ruptura para os diferentes preenchimentos não seguiram um padrão claro, variando conforme o material utilizado. Nos corpos de prova de PLA, o maior valor de deformação na ruptura foi observado no CP A2, com 40% de preenchimento. No caso do PETG, os maiores valores foram registrados nos CPs A8, com 20% de preenchimento, e A9, com 40% de preenchimento. Esses resultados divergem das expectativas, onde maior preenchimento, com maior deposição de material, resultando em valores mais altos de LRT como já visto, consequentemente, em maior deformação na ruptura.

Além disso, verificou-se que as arquiteturas internas cúbica e giróide proporcionaram maior deformação em ambos os materiais em comparação com a arquitetura de grade. No teste com PLA, as arquiteturas giróide e cúbica (A5 e A6) valores de deformação na ruptura superiores à arquitetura de grade (A1). Já no PETG, as arquiteturas giróide e cúbica (A12 e A13) registraram valores médio também superiores à arquitetura de grade (A8).

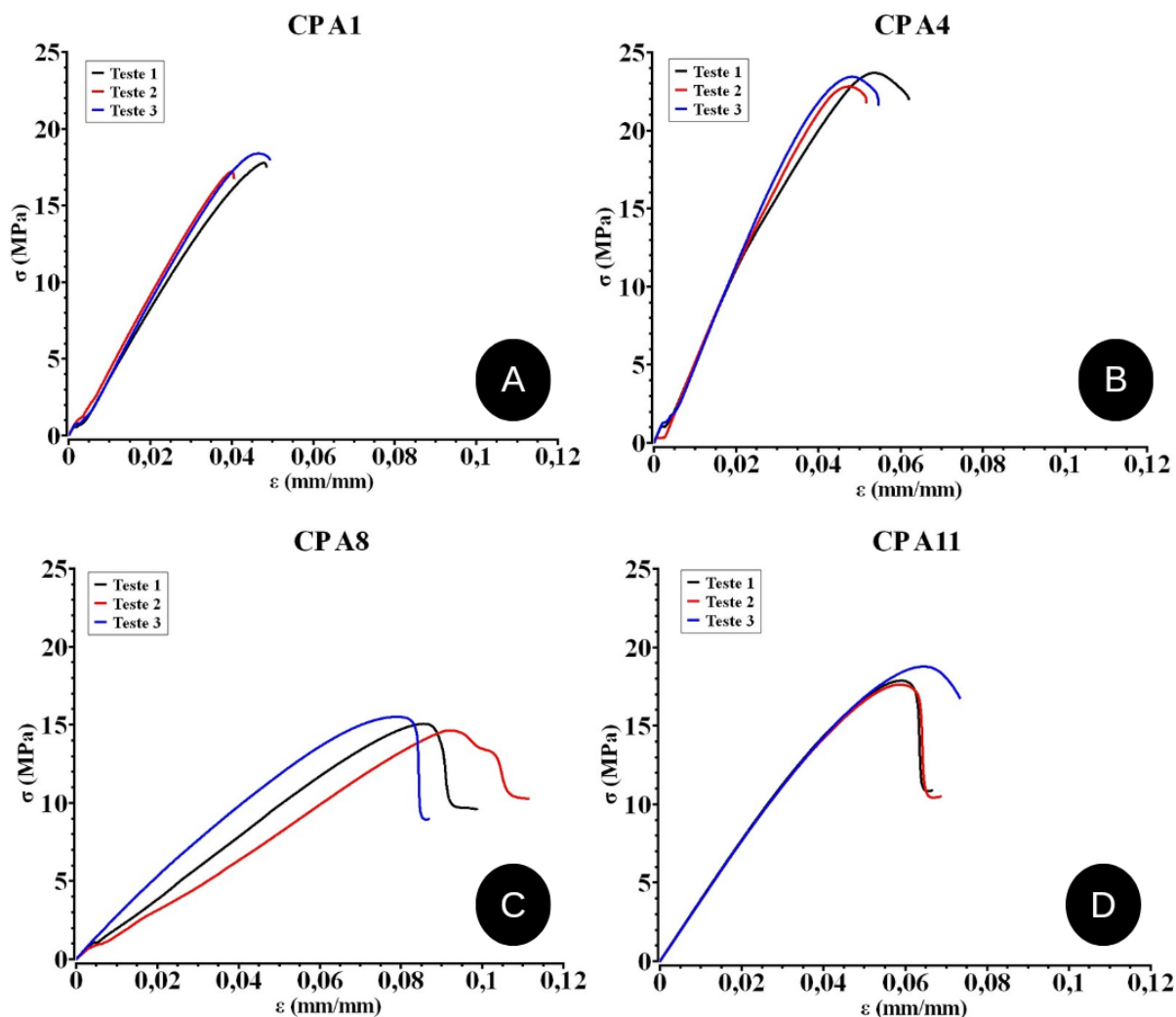
Os valores de deformação na ruptura aumentaram com o número de paredes em ambos os materiais. No PLA, o corpo de prova CP A7, com quatro paredes apresentou um aumento de aproximadamente 24% ao CP A1, com duas paredes. Para o PETG, o CP A14, com quatro paredes, representou um aumento de cerca de 26% em comparação ao CP A8, com duas paredes. Este foi um dos parâmetros mais consistentes observados na análise da deformação na ruptura.

#### **4.3.2 Influência do preenchimento**

Os resultados observados em tração indicam que o aumento da deposição de material nos corpos de prova resulta em uma melhoria nas suas propriedades mecânicas, proporcional ao incremento do custo. Para realizar uma análise completa do ensaio, é crucial observar o gráfico de tensão versus deformação convencional. A figura 25 ilustra as combinações de

corpos de prova PLA A1 e PETG A8 com 20% de preenchimento interno e PLA A4 e PETG A11 com 80% de preenchimento interno, oferecendo uma visão abrangente dos resultados.

**Figura 25 - Tensão versus Deformação convencional parâmetro preenchimento**



Fonte: Produzido pelo autor

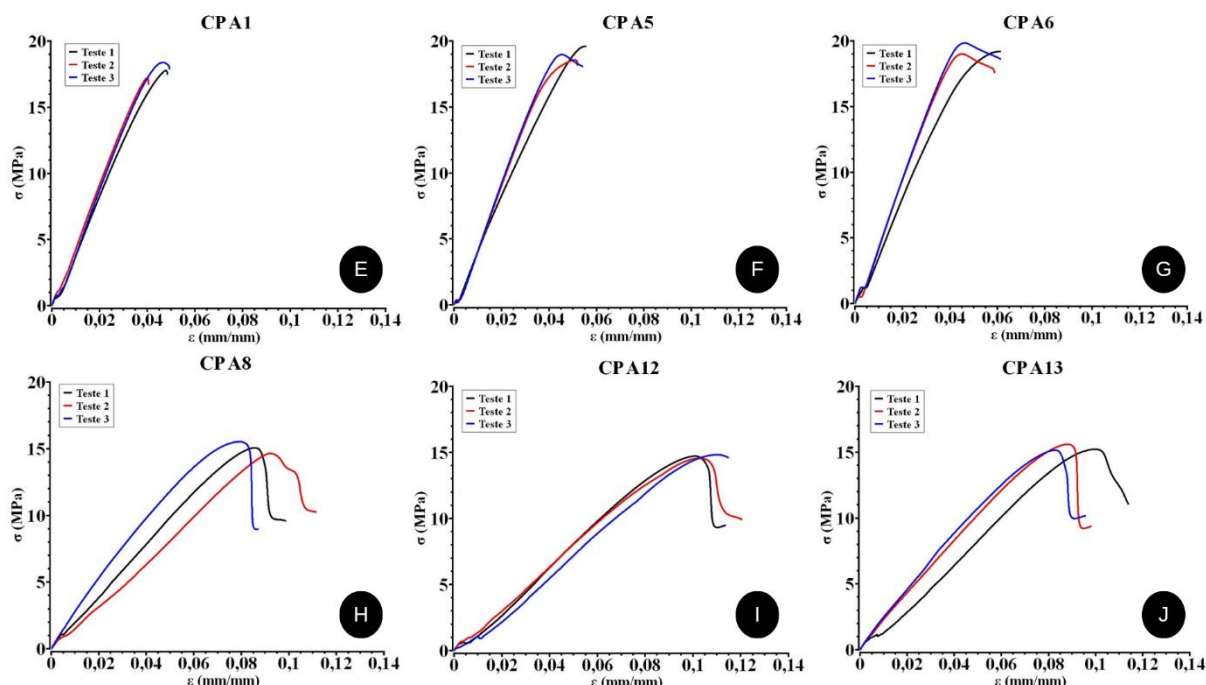
A partir dos gráficos acima, observa-se a maior rigidez do PLA (gráficos A e B) em comparação com a ductilidade superior do PETG (gráficos C e D). O PLA demonstra uma ruptura mais frágil, com o ponto de escoamento ocorrendo próximo à fratura, exibindo quase exclusivamente um regime elástico com baixa deformação no corpo de prova. Em contrapartida, o PETG mostra maior deformação em ambas as fases e um módulo de elasticidade menor, como indicado pelo ângulo de inclinação nas linhas do gráfico C. Esses resultados corroboram o estudo de Santana *et al.* (2018), que identificaram o PLA como um material rígido e o PETG como um material mais dúctil.

Conforme apontado nos estudos de Souza (2022), que analisaram corpos de prova com 50% e 100% de preenchimento, a quantidade de material depositado é um fator determinante para aumentar a resistência e a capacidade de deformação das peças. Em geral, quanto maior a densidade do material, maior a carga que o objeto pode suportar antes de fraturar e maior a deformação que pode ocorrer sem ruptura. No entanto, os resultados de deformação na ruptura obtidos neste estudo diferem dessa tendência, uma vez que o maior valor de deformação foi observado no CP A9, com apenas 40% de preenchimento.

### 4.3.3 Influência da arquitetura interna

A arquitetura interna desempenha um papel crucial tanto no consumo de filamento e tempo de impressão quanto nos resultados de limite de resistência à tração e deformação convencional máxima dos corpos de prova. Assim, para uma análise completa é importante investigar o efeito das diferentes arquiteturas internas utilizadas no estudo, tanto para PLA quanto para PETG na resistência mecânica desses materiais como exibido pela Figura 26.

**Figura 46 - Tensão versus Deformação convencional parâmetro arquitetura interna**



Fonte: Produzido pelo autor

Assim como demonstrado antes, os gráficos em PLA, identificados pelas letras E, F e G, indicam que este material é mais rígido em comparação com o PETG, representado pelas

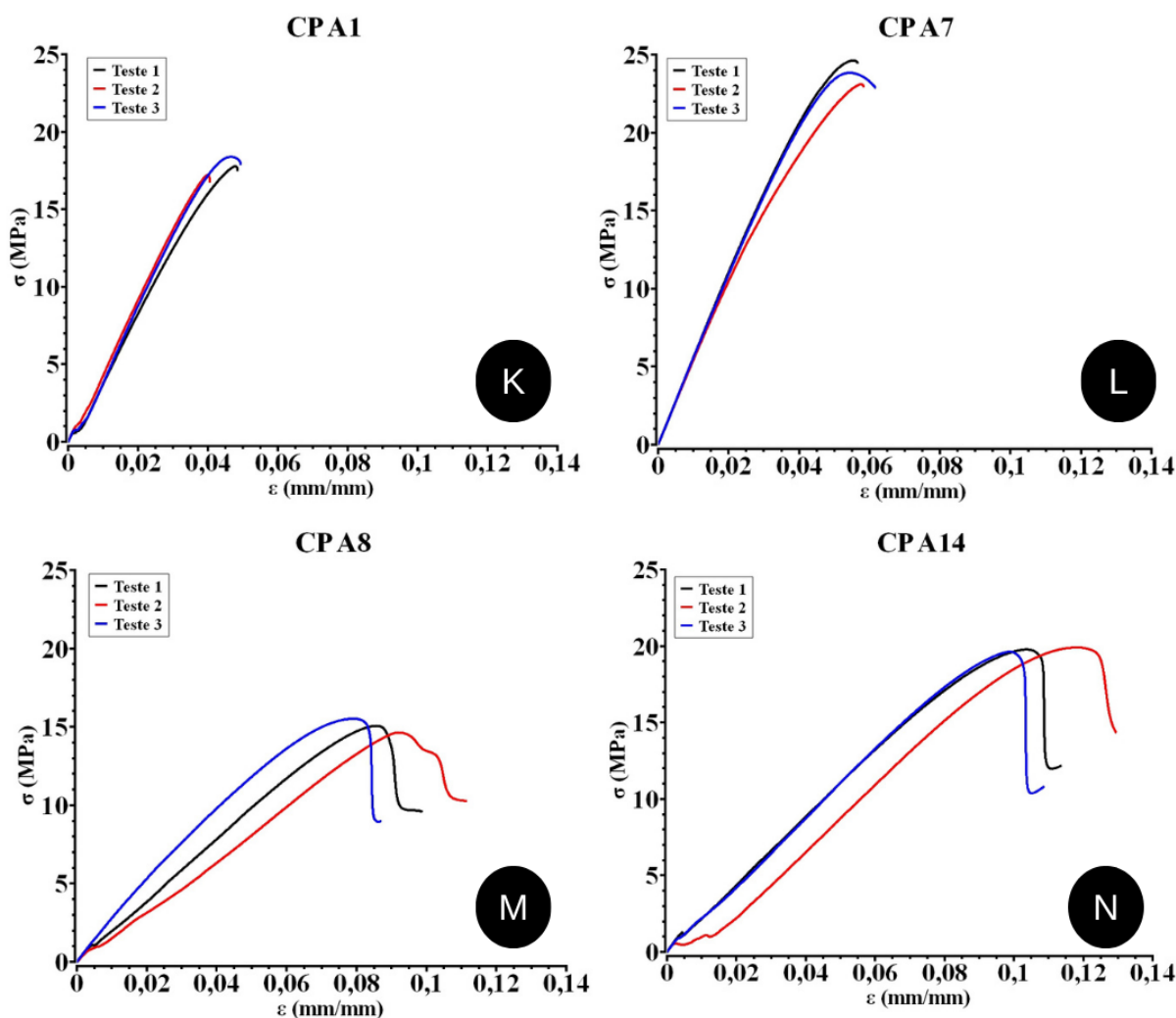
letras H, I e J, o que reflete as características observadas no parâmetro de aumento de porcentagem de preenchimento. Nota-se também uma semelhança gráfica entre as arquiteturas giróide e cúbica em PLA, nas letras F e G, onde os valores de LRT e deformação na ruptura são bastante próximos. Já no PETG, representado pelas letras H, I e J, as diferentes arquiteturas apresentam valores de LRT semelhantes, mas as arquiteturas cúbica e giróide mostram maiores valores de deformação na ruptura.

No estudo de Jardim (2020) sobre as influências da arquitetura de preenchimento em peças impressas em 3D, a arquitetura giróide mostrou a maior tensão máxima no ensaio de resistência à tração, alcançando 20,59 MPa, enquanto a arquitetura cúbica apresentou o menor valor, com 19,18 MPa. Esses resultados diferem da média obtida no presente estudo, onde as resistências máximas encontradas para as arquiteturas giróide e cúbica em corpos de prova de PLA foram próximas. Ainda, no estudo de Jardim, a deformação na ruptura foi maior na arquitetura de grade e menor na cúbica, contrastando com os achados deste trabalho, em que a arquitetura de grade resultou na menor deformação em ambos os materiais, assim sendo necessário para maior compreensão da análise dos pontos de deformação das arquiteturas internas um estudo futuro.

#### **4.3.4 Influência do número de paredes**

Conforme discutido anteriormente, o aumento no número de paredes foi um fator crucial para a melhoria do limite de resistência à tração e da deformação na ruptura em ambos os materiais. A Figura 27 são exibidos os gráficos comparativos de PLA e PETG com duas e quatro paredes, proporcionando uma análise detalhada desses resultados.

**Figura 57 - Tensão versus Deformação convencional parâmetro número de paredes**



Fonte: Produzido pelo autor

Com os gráficos em PLA (K e L) e PETG (M e N), observa-se que, em todos os testes realizados, os gráficos de PLA demonstraram maior rigidez em comparação aos testes com PETG. Vale destacar a relevância do aumento no número de paredes, pois, em ambos os materiais, esse acréscimo resultou em um aumento significativo tanto no valor de LRT quanto na deformação na ruptura, reforçando a resistência mecânica dos corpos de prova. Esse comportamento é consistente com o estudo de Ambrós (2019), onde o aumento no número de paredes, sem alterar outros parâmetros, levou a um aumento de 38,5% na resistência à tração, de 18,60 MPa com duas paredes para 25,76 MPa com quatro paredes. Este resultado é comparável ao aumento de 34% e 31% observado nos corpos de prova de PLA e PETG com duas e quatro paredes neste estudo.

#### 4.4 Análise dos CPs A4, A5, A6 e A7

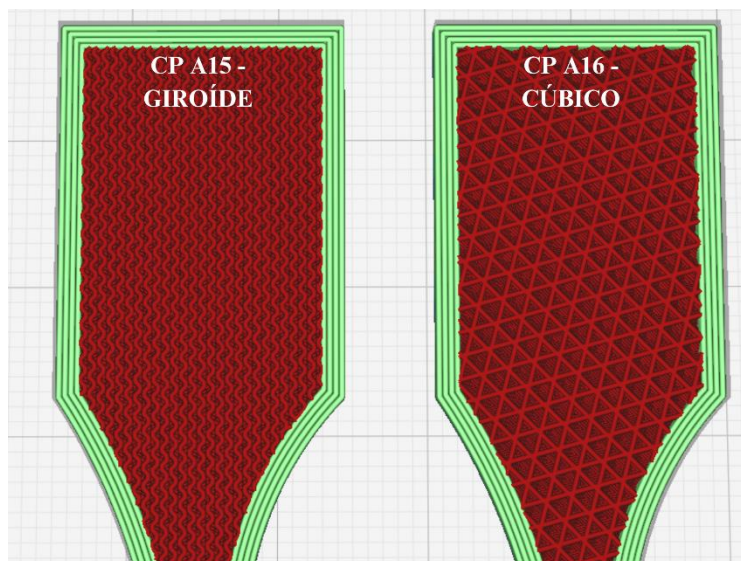
Após a análise da influência de cada parâmetro de impressão, foi determinado o corpo de prova de composição ideal para obter maior resistência mecânica. A combinação selecionada foi o material PLA com 80% de preenchimento CPA4, com arquitetura interna cúbica ou giróide, CPs A5 e A6, uma vez que esses dois tipos de arquitetura apresentaram resultados semelhantes em termos de resistência no estudo em PLA e quatro paredes de impressão, CP A7. O tempo de impressão e os custos associados a essa configuração foram feitos a partir do cálculo de custo de energia e consumo de material equação 1 e 2 e registrados na Tabela 10.

**Tabela 10 - Informações de produção**

| Corpo de prova | Tempo de impressão (min) | Gasto energia (R\$) | Consumo de material (g) | Custo do material (R\$) | Total custo (R\$) |
|----------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
| A15            | 108                      | 0,62                | 16,7                    | 1,82                    | 2,44              |
| A16            | 76                       | 0,44                | 16,8                    | 1,83                    | 2,27              |

Fonte: Produzido pelo autor

Com base nos dados de consumo de cada variável e no custo total calculado, foi possível identificar que o corpo de prova A15, com 80% de preenchimento e arquitetura giróide, levou 32 minutos a mais para ser impresso do que o corpo de prova A16, cuja única diferença foi em sua arquitetura, sendo cúbica. Isso demonstra que a arquitetura giróide, ao ser combinada com um alto percentual de preenchimento, torna-se significativamente mais complexa, o que aumenta o tempo de impressão. Esse aumento no tempo ocorre porque a impressora precisa dedicar mais atenção aos detalhes da arquitetura, como ilustrado no CP A15 da Figura 28 retirado do fatiador Cura.

**Figura 28 - Comparação arquitetura giróide com cúbico**

Fonte: Produzido pelo autor

No final, o custo adicional devido ao detalhamento da arquitetura giróide com alta porcentagem de preenchimento foi de R\$ 0,17 em comparação à arquitetura cúbica. Isso torna necessária a realização de um ensaio de tração para uma análise completa do investimento em relação à resistência mecânica, conforme detalhado na Tabela 11.

**Tabela 11 - Valores de resistência e deformação convencional dos CPs de composições ideais**

| Corpo de prova | Preenchimento (%) | Arquitetura interna | Número de paredes | Materiais | LRT (MPa)      | Deformação Máxima (%) |
|----------------|-------------------|---------------------|-------------------|-----------|----------------|-----------------------|
| A15            | 80                | Giróide             | 4                 | PLA       | $28,3 \pm 1,0$ | $5,8 \pm 0,4$         |
| A16            | 80                | Cúbica              | 4                 | PLA       | $28,5 \pm 0,4$ | $6,0 \pm 0,5$         |

Fonte: Produzido pelo autor

Os ensaios realizados nos corpos de prova CP A15 e CP A16 mostraram valores próximos de LRT e deformação na ruptura. Esses valores foram cerca de 19,5% maiores em comparação com o melhor resultado obtido no ensaio anterior, o CP A7, que apresentava uma composição de 20% de preenchimento, arquitetura grade e quatro paredes. Essa diferença indica que a combinação de parâmetros ideais elevou a resistência mecânica dos corpos de prova de forma significativa.

Além disso, ao comparar os corpos de prova A5 e A6, que apresentavam a mesma porcentagem de preenchimento (20%) e quatro paredes, mas com arquiteturas internas

diferentes (giróide e cúbica), observou-se uma resistência mecânica semelhante, esses resultados foram consistentes com os obtidos nos CPs A15 e A16 apresentando valores próximos de LRT e deformação na ruptura, reforçando a confiabilidade dos dados e a similaridade no desempenho mecânico entre as diferentes arquiteturas testadas.

Com base na consistência dos resultados, pode-se concluir que o CP A16, com arquitetura cúbica, é mais vantajoso, pois oferece um custo de produção menor e um desempenho mecânico equivalente ao do CP A15, que possui arquitetura giróide.

#### **4.5 Teste no dispositivo de carga para sacolas plásticas**

Por fim, os resultados obtidos dos testes anteriores com todos os corpos de prova de PLA foram utilizados para desenvolver o dispositivo de carga para sacolas plásticas com os parâmetros já conhecidos. O design do produto já havia sido definido conforme descrito no item 4.2 da metodologia, e foi implementado o ensaio a máquina universal no modo tração, com a fixação com velocidade de 2mm/min, conforme mostrado na Figura 29.

**Figura 29 – Ensaio de tração do dispositivo de carga para sacolas plásticas**



Fonte: Produzido pelo autor

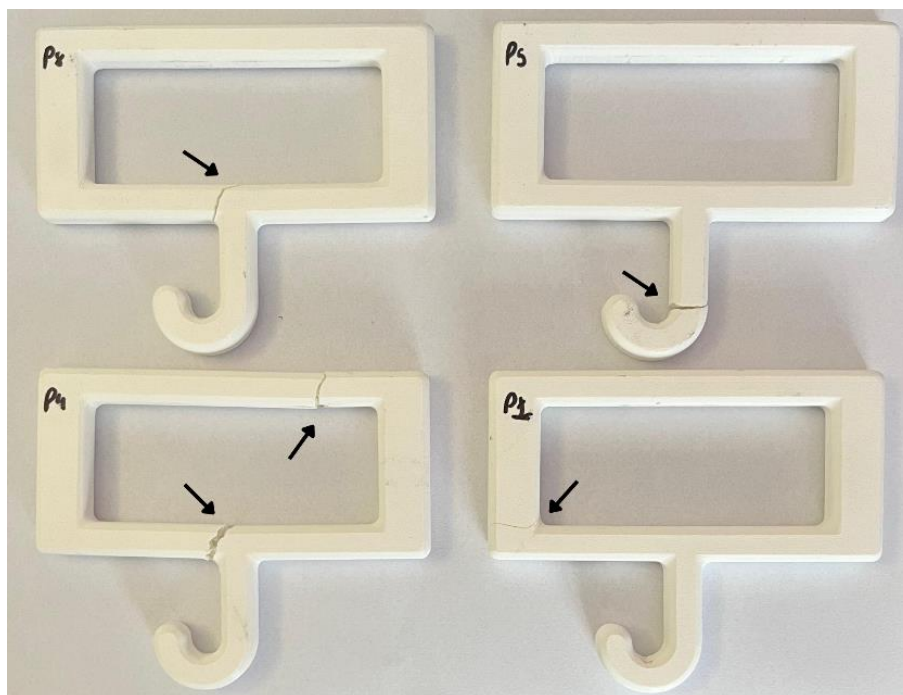
Assim, foi elaborada a Tabela 12, que detalha o produto desenvolvido com base nos testes anteriores em PLA. A tabela apresenta as informações dos testes realizados, juntamente com o nome correspondente do dispositivo de carga para sacolas plásticas (DCSP), nominados de P1 a P9, mantendo as variações de parâmetros em comparação aos corpos de prova, nominados A1 ao A16. Essa organização facilita a comparação futura dos resultados obtidos.

**Tabela 12 - Composição entre dispositivo de carga para sacolas plásticas e CPs**

| Corpo de prova | DCSP | Preenchimento (%) | Arquitetura interna | Número de paredes | Materiais |
|----------------|------|-------------------|---------------------|-------------------|-----------|
| A1             | P1   | 20                | Grade               | 2                 | PLA       |
| A2             | P2   | 40                | Grade               | 2                 | PLA       |
| A3             | P3   | 60                | Grade               | 2                 | PLA       |
| A4             | P4   | 80                | Grade               | 2                 | PLA       |
| A5             | P5   | 20                | Giróide             | 2                 | PLA       |
| A6             | P6   | 20                | Cúbico              | 2                 | PLA       |
| A7             | P7   | 20                | Grade               | 4                 | PLA       |
| A15            | P8   | 80                | Giróide             | 4                 | PLA       |
| A16            | P9   | 80                | Cúbica              | 4                 | PLA       |

Fonte: Produzido pelo autor

Os resultados dos testes foram representados em um gráfico de força versus deslocamento, que permitiu identificar a força máxima de ruptura. Diferentemente dos gráficos de tensão versus deformação utilizados nos corpos de prova, não foi possível determinar o limite de resistência à tração (LRT) e a deformação na ruptura para os DCSP. Isso ocorreu porque a geometria do produto modelado não foi destinada para força de tração, possuindo momentos de flexão e pontos de concentração de tensão, não apresentando a modelagem ideal para o resultado, como os corpos de prova possuem, resultando em rupturas irregulares sem um ponto claro de estricção. Dessa forma, a seção transversal dos dispositivos de carga para sacolas plásticas variou, comprometendo a precisão dos valores de LRT e deformação na ruptura. A Figura 30 ilustra os locais de ruptura, indicados pelas setas pretas.

**Figura 60 - Pontos de ruptura do DCSP**

Fonte: Produzido pelo autor

Assim, para estudos futuros, é necessário adaptar a modelagem do dispositivo de carga para sacolas plásticas de maneira que a força de tração seja distribuída uniformemente, possibilitando a utilização dos resultados de tensão e deformação. O resultado do ensaio foi detalhado na Tabela 13.

**Tabela 13 - Informações do dispositivo de carga para sacolas plásticas**

| DCSP | Força máxima (N) | Tempo de impressão (min) | Gasto energia (R\$) | Consumo de material (g) | Custo do material (R\$) | Custo total (R\$) |
|------|------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
| P1   | 387              | 90                       | 0,52                | 19,5                    | 2,12                    | 2,64              |
| P2   | 406              | 121                      | 0,69                | 26,3                    | 2,86                    | 3,56              |
| P3   | 515              | 144                      | 0,83                | 33,1                    | 3,60                    | 4,43              |
| P4   | 623              | 169                      | 0,97                | 33,9                    | 4,35                    | 5,31              |
| P5   | 432              | 106                      | 0,61                | 19,7                    | 2,15                    | 2,75              |
| P6   | 469              | 91                       | 0,52                | 19,6                    | 2,13                    | 2,66              |
| P7   | 428              | 97                       | 0,56                | 23,2                    | 2,53                    | 3,08              |
| P8   | 879              | 324                      | 1,86                | 40,3                    | 4,39                    | 6,25              |
| P9   | 884              | 169                      | 0,97                | 40,7                    | 4,43                    | 5,40              |

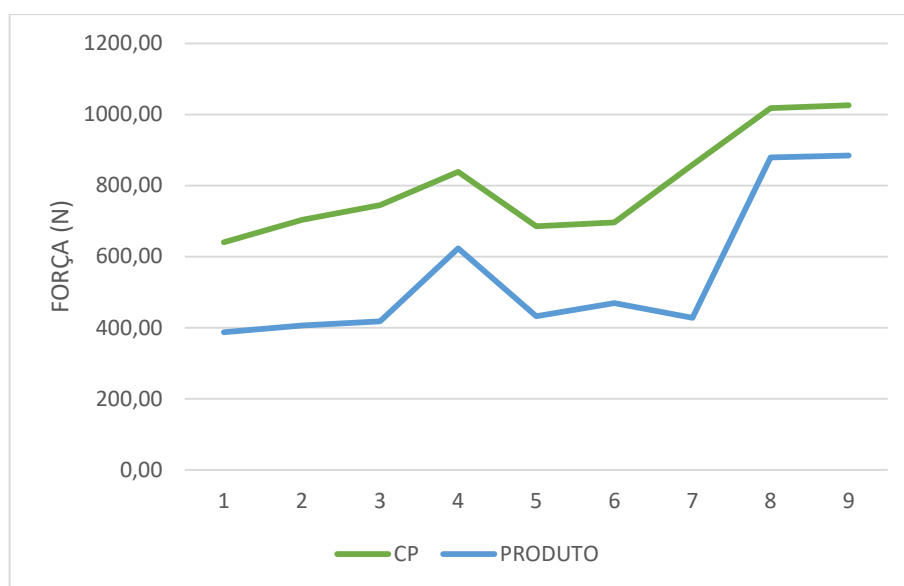
Fonte: Produzido pelo autor

Analisando os DCSP com variações de parâmetros (P1 a P7), observou-se que o P4 suportou a maior força de ruptura, com uma composição de 80% de preenchimento, arquitetura grade e duas paredes. Esse dispositivo de carga para sacolas plásticas também apresentou o maior custo de produção, totalizando R\$ 5,31. No entanto, os testes com corpos de prova anteriores indicaram que o CP A7, com 20% de preenchimento, arquitetura grade e quatro paredes, apresentou a maior resistência. Além disso, o menor valor de resistência foi identificado no DCSP P1, com 20% de preenchimento, arquitetura grade e duas paredes, que foi o mais rápido de produzir e o mais barato.

Quanto aos DCSP com parâmetros ideais, P8 e P9, foi possível observar valores de resistência similares. Isso demonstra que as arquiteturas cúbica e giróide não apresentam uma grande diferença em termos de resistência. Contudo, uma diferença significativa foi identificada no custo de produção, semelhante ao observado nos CPs A15 e A16. O aumento do tempo de impressão devido à complexidade da arquitetura giróide resultou em um tempo de 324 minutos, um aumento de quase 92% em relação aos 169 minutos necessários para a arquitetura cúbica. Esse aumento de tempo impacta diretamente o custo, que passou de R\$ 5,40 para a arquitetura cúbica para R\$ 6,25 para a arquitetura giróide, representando um aumento de 15,74%.

Além do custo adicional, o tempo extra de impressão deve ser considerado, já que poderia ser utilizado para produzir outros dispositivos de carga para sacolas plásticas. Mesmo com o DCSP P8 de arquitetura giróide apresentar um custo total de R\$ 1,25 ao DCSP P9 de arquitetura cúbica é necessário observar que o DCSP P9 consumiu mais filamento (43 gramas) em comparação ao DCSP P8 de arquitetura giróide (41 gramas), é importante avaliar qual aspecto é mais relevante no momento da impressão. Se o objetivo é economizar filamento e obter uma resistência semelhante, o DCSP P8, com arquitetura giróide, pode ser a melhor escolha, apesar do custo maior. No entanto, se a prioridade for o custo total e o tempo de produção, o DCSP P9, com arquitetura cúbica, pode ser mais vantajoso, proporcionando uma resistência comparável com um uso ligeiramente maior de filamento.

Para análise de resultados entre os corpos de provas e os dispositivos de carga para sacolas plásticas em PLA, na Figura 31 é observado a comparação de força em newtons conforme as informações que a Tabela 13 trouxe acima.

**Figura 31 - DCSP versus CPs em PLA**

Fonte: Produzido pelo autor

Os resultados obtidos nos dispositivos de carga para sacolas plásticas mostraram-se consistentes com os ensaios anteriores realizados nos corpos de prova em PLA, demonstrando que a evolução dos parâmetros de impressão afeta de maneira semelhante tanto os dispositivos de carga para sacolas plásticas quanto os corpos de prova. Observou-se que os DCSPs apresentaram valores de força inferiores devido à sua geometria, que não foi projetada para ensaios de tração, ao contrário dos corpos de prova que seguiram as especificações da norma ASTM D638-14. Essa consistência reforça a confiabilidade dos resultados, uma vez que os testes reproduziram os valores obtidos anteriormente.

Entretanto, houve uma variação notável entre o corpo de prova A7 e o DCSPs P7, ambos com 20% de preenchimento, arquitetura grade e quatro paredes. O A7 registrou uma resistência de aproximadamente 24,86 % maior ao valor de A1, sendo o maior valor entre os corpos de prova com apenas um parâmetro variável, enquanto o P7 com quatro paredes, apresentou um aumento de 11,71% ao valor de P1 com duas paredes, sendo o terceiro menor valor entre os DCSPs. Essa discrepância se deve ao efeito das paredes adicionais no corpo de prova de menor área, onde cada parede de deposição contribui para uma maior resistência interna, reduzindo proporcionalmente a área da arquitetura interna, que nessa composição foi de 20% de preenchimento, uma estrutura mais frágil.

Em contraste, em um produto de maior área de preenchimento, o acréscimo de paredes tem uma influência menor em termos de proporção, resultando em um aumento de resistência proporcional à área do produto, mas sem o impacto significativo observado nos corpos de prova

menores. Portanto, torna-se evidente a necessidade de estudos futuros que explorem a relação entre as geometrias dos corpos e sua área em conjunto com o acréscimo de paredes, para entender como essas variáveis impactam a resistência mecânica. A identificação de um ponto de equilíbrio, onde a área e o número de paredes otimizam a resistência, será crucial. Além disso, será importante comparar esses resultados com o custo de produção, já que o aumento no número de paredes pode reduzir a porcentagem de arquitetura interna, afetando a escolha do preenchimento pelo usuário.

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo explorou detalhadamente a influência dos diferentes parâmetros de impressão 3D na resistência mecânica de corpos de prova e dispositivos de carga para sacolas plásticas fabricados em PLA e PETG. A análise dos valores de produção, junto com os resultados do ensaio de tração, revelou que o aumento do número de paredes e do preenchimento são cruciais na definição das propriedades mecânicas dos materiais e variam o custo.

O estudo dos parâmetros que influenciam a resistência mecânica, como porcentagem de preenchimento, arquitetura interna, e número de paredes, revelou que a deposição de material afeta a durabilidade das peças. Foi observado que o aumento da densidade de preenchimento e o número de paredes elevam significativamente os valores de resistência à tração (LRT) e deformação na ruptura, especialmente em PLA.

Os resultados indicaram que o PLA, em geral, apresenta maior resistência à tração em comparação com o PETG, enquanto este último demonstrou maior deformação antes da ruptura, corroborando a caracterização do PETG como um material dúctil. Além disso, foi observado que arquiteturas internas mais complexas, como a giróide, tendem a aumentar significativamente o tempo e o custo de produção, sem oferecer melhorias proporcionais na resistência mecânica quando comparadas às arquiteturas mais simples, como a cúbica.

A análise comparativa entre corpos de prova e dispositivos de carga para sacolas plásticas destacou a importância de ajustar a geometria e os parâmetros de impressão para otimizar tanto a resistência quanto o custo de produção. Assim, é necessário adequar a necessidade do usuário para a escolha dos melhores parâmetros, tanto para resistência mecânica, quanto para rapidez ou gasto de filamento, de maneira que com o estudo auxilie a redução de desperdícios. Em particular, verificou-se que a adição de paredes em corpos de prova de menor tamanho tende a aumentar a resistência, enquanto em produtos de maiores, essa adição se mostrou menos eficaz.

Dessa forma, este estudo reforça a necessidade de um equilíbrio cuidadoso entre os parâmetros de impressão, a geometria do objeto e o custo de produção, fornecendo diretrizes claras para a escolha de parâmetros que maximizam a resistência mecânica e minimizem o desperdício de material, tempo e energia.

## **6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para estudos futuros, sugere-se uma investigação aprofundada sobre a modelagem do produto, dispositivos de carga para sacolas plásticas, com foco no aprimoramento do design para otimizar a funcionalidade durante os ensaios de tração, possibilitando uma ampliação dos estudos nessa área. Além disso, recomenda-se explorar a relação entre a variação do número de paredes e a área do corpo de teste em relação à resistência mecânica, com o objetivo de identificar o ponto ótimo que maximize a resistência ao menor custo possível. Por fim, seria relevante conduzir pesquisas sobre a deformação em diferentes tipos de arquiteturas internas, visando a uma compreensão mais aprofundada dos resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS

- 3D SYSTEMS. **Estereolitografia**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://br.3dsystems.com/stereolithography>. Acesso em: 4 out. 2023.
- 3DFILA (Brasil). **Otimizando a impressora 3D com melhores parâmetros de Infill e Shell**. [S. l.], 25 jul. 2018. Disponível em: <https://blog.3dfila.com.br/otimizando-a-impressora-3d-com-melhores-parametros-de-infill-e-shell/>. Acesso em: 21 set. 2023.
- 3DLAB (Brasil). **Raft 3D, Brim e Skirt: entenda as diferenças entre esses recursos!**. [S. l.], 8 out. 2019A. Disponível em: [https://3dlab.com.br/diferencas-entre-raft-3d-brim-e-skirt/?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=20562938358&utm\\_term=&utm\\_content=&adgroupid=&feeditemid=&targetid=&loc\\_interest\\_ms=&loc\\_physical\\_ms=1001566&matchtype=&network=x&device=c&devicemodel=&placement=&target=&adposition=&gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjwy8i0BhAkEiwAdFaeGPDChtkuN56i-dl2Kvnqms2Dz9cMr5uUl9iyq2Kirs84Xd0bIqZoLhoC-OIQAvD\\_BwE](https://3dlab.com.br/diferencas-entre-raft-3d-brim-e-skirt/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=20562938358&utm_term=&utm_content=&adgroupid=&feeditemid=&targetid=&loc_interest_ms=&loc_physical_ms=1001566&matchtype=&network=x&device=c&devicemodel=&placement=&target=&adposition=&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwy8i0BhAkEiwAdFaeGPDChtkuN56i-dl2Kvnqms2Dz9cMr5uUl9iyq2Kirs84Xd0bIqZoLhoC-OIQAvD_BwE). Acesso em: 20 set. 2023.
- 3DLAB. **Fatiadores 3D: conheça os 3 softwares mais utilizados do mercado**. [S. l.], 15 out. 2019B. Disponível em: <https://3dlab.com.br/fatiadores-3d/>. Acesso em: 4 out. 2023.
- 3DLAB. **FILAMENTO PARA IMPRESSORA 3D**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://3dlab.com.br/categoria-produto/filamento-para-impressora-3d/>. Acesso em: 13 set. 2023.
- 3DLAB. **Qual é a influência da altura da camada em suas peças 3D?**. [S. l.], 10 set. 2017. Disponível em: <https://3dlab.com.br/altura-da-camada-na-impressao-3d/>. Acesso em: 4 out. 2023.
- 3DSOURCED. **The Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2023**. [S. l.], 17 jul. 2023. Disponível em: <https://www.3dsourced.com/guides/history-of-3d-printing/>. Acesso em: 20 set. 2023.
- ABRÃO, Ana Carolina Campos. **EFEITOS DE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D FDM NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE POLI(ÁCIDO LÁTICO) PARA ÓRTESES DE MEMBROS SUPERIORES**. 2022. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário FEI, [S. l.], 2023. Disponível em: <https://repositorio-api.fei.edu.br/server/api/core/bitstreams/ed7429e4-32c6-4226-b6e2-df05cd6d1c7a/content>. Acesso em: 15 ago. 2023.
- ALL3DP (Brasil). **Os melhores softwares para impressoras 3D em 2024**. [S. l.], 28 mar. 2024. Disponível em: <https://all3dp.com/pt/1/programa-impressora-3d-gratuito-fatiamento-modelagem/>. Acesso em: 24 abr. 2024.
- ALVES, T.; DE JESUS, A. V. S.; PINTO, G. V. S.; RIBEIRO, R. R. M.; RODRIGUES, L. K. O., **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 Lático (PLA) a partir de Impressão 3D**. Desafios, v. 08, n.01, pp. 97-103, 2021.

AMBRÓS, G. S.; **Influência dos parâmetros de impressão 3D na resistência à tração de corpos de prova impressos em PLA utilizando modelagem por fusão e deposição.** 2019. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 638 - 14. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. United States, 2014.

AMS BRASIL. **Você sabe o que é impressão 3D por Sinterização Seletiva a Laser?**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://amsbrasil.com.br/voce-sabe-o-que-e-impressao-3d-por-sinterizacao-seletiva-a-laser>. Acesso em: 21 set. 2023.

BRAGAGLIA, Mario *et al.* Modeling the fracture behavior of 3D-printed PLA as a laminate composite: Influence of printing parameters on failure and mechanical properties. **Composite Structures**, [S. l.], v. 322, p. 1-12, 15 out. 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117379>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822323007250?via%3Dihub>. Acesso em: 21 set. 2023.

CALSOLARI, Beatriz. **A impressão 3D e o seu impacto na saúde: conheça o presente e o futuro dessa tecnologia que está revolucionando a medicina.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://hackmed.com.br/blog/impressao-3d-na-saude/#:~:text=A%20impress%C3%A3o%203D%20tem%20tido,para%20planejamento%20cir%C3%BArgico%2C%20entre%20outros>. Acesso em: 4 out. 2023.

CARMO, Luiz Pimenda do; KOVALIUK, Yargo Kian. **Análise comparativa de tempo e acabamento entre os softwares de planejamento de processo para manufatura aditiva RP3, CURA e PrusaSlicer.** Orientador: Tiago Rodrigues Weller. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/32217>. Acesso em: 21 set. 2023.

COELHO, A. W. F. *et al.* Manufatura aditiva por estereolitografia: análise da geometria da peça e da influência da posição e orientação de fabricação. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, ed. 4, p. 1101 – 1113, 2018. DOI <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0600>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/sqSrvrKyZztCfLhN67LQHMq/>. Acesso em: 21 set. 2023.

CREALITY. **Ender-3 V3 SE.** [S. l.], 2024. Disponível em: [https://www.creality.com/br/products/creality-ender-3-v3-se?spm=..index.products\\_tab\\_1.1](https://www.creality.com/br/products/creality-ender-3-v3-se?spm=..index.products_tab_1.1). Acesso em: 16 jul. 2024.

DERMEIK, Benjamin; TRAVITZKY, Nahum. Laminated Object Manufacturing of Ceramic-Based Materials. **Advanced Engineering Materials**, Erlangen, v. 22, n. 9, p. 1-24, 22 set. 2020. DOI <https://doi.org/10.1002/adem.202000256>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adem.202000256>. Acesso em: 21 set. 2023.

ENGIPRINTERS. **Os tipos de Tecnologia de Impressão 3D.** [S. l.], 2019. Disponível em: <https://engiprinters.com.br/os-tipos-de-tecnologia-de-impressao-3d/>. Acesso em: 15 set. 2023.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies**. 2. ed. Berlim: [s. n.], 2015.

GURGEL, Yasmin. **Órgãos 3D: como funciona tecnologia que pode substituir transplantes?**: A impressão de órgãos 3D é uma das promessas de inovação para zerar as filas de pacientes à espera de transplante. [S. l.], 15 mar. 2023. Disponível em: <https://www.metropoles.com/saude/orgaos-3d-como-funciona-tecnologia-que-pode-substituir-transplantes>. Acesso em: 4 out. 2023.

HIEMENZ, Joe. **Additive Manufacturing Trends In Aerospace**. [S. l.], 2013. Disponível em: <https://www.sys-uk.com/wp-content/uploads/2016/10/White-Paper-Additive-Manufacturing-Trends-in-Aerospace-Leading-the-W....pdf>. Acesso em: 4 out. 2023.

HOTZA, Dechamir. Prototipagem rápida de pilhas a combustível de óxido sólido. **Revista Matéria**, Florianópolis, v. 14, ed. 4, p. 1101 – 1113, 2009. DOI <https://doi.org/10.1590/S1517-70762009000400003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/NL9LkVsnkVFCFN6NmD5jMHQ/?lang=pt>. Acesso em: 21 set. 2023.

JARDIM, Ana Paula Nascimento. **Efeito do padrão de preenchimento em impressão 3D nos resultados de resistência à tração do polímero acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS)**. Orientador: Prof. Dr. André Canal Marques. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, 2020. Disponível em: <https://repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/12135/Ana%20Paula%20Nascimento%20Jardim.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 jul. 2024.

TRON, JON. **3D Printing Guide**. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://www.instructables.com/member/JON-A-TRON/>. Acesso em: 23 ago. 2023.

KAORI, Danielle. **Maiores empresas de impressão 3D no mundo**. [S. l.], 28 nov. 2022. Disponível em: <https://www.printit3d.com.br/post/maiores-empresas-de-impress%C3%A3o-3d-no-mundo#:~:text=A%203D%20Systems%20%C3%A9%20a,design%20digital%2C%20e%20muito%20mais>. Acesso em: 21 set. 2023.

KASTNER, Guilherme Alfredo. **História e conceitos da Impressão 3D**. [S. l.], 6 maio 2018. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/artigos/16688-%20historia-e-conceitos-da-impressao-3d>. Acesso em: 15 set. 2023.

KONDO, Hironori. **PETG vs ABS: The Main Differences**. [S. l.]: ALL3DP, 14 set. 2023. Disponível em: <https://all3dp.com/2/petg-vs-abs-3d-printing-filaments-compared/#:~:text=For%20most%20people%2C%20there%20really,to%20be%20glued%20and%20painted>. Acesso em: 21 set. 2023.

LOURENÇO, Lucas. **Série Neo® Estereolitografia**. [S. l.]: LWT SISTEMAS, 17 mar. 2023. Disponível em: <https://www.lwtsistemas.com.br/2023/03/17/serie-neo-blog/>. Acesso em: 20 set. 2023.

MARKETS AND MARKETS. **3D Printing Market**: 3D Printing Industry worth \$34.5 billion by 2028. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/3d-printing.asp>. Acesso em: 15 set. 2023.

RAJAN, Kumaresan *et al.* Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 129, n. 5-6, 26 fev. 2022. 120, p. 1531–1570. DOI <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08860-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-08860-7>. Acesso em: 21 set. 2023.

RAZGRIZ, Guilherme. **Trabalhando com filamento ABS**. [S. l.]: Makerhero, 5 ago. 2020. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/trabalhando-com-filamento-abs/>. Acesso em: 20 set. 2023.

SANTANA, L. et al.. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 4, p. e12267, 2018.

SEIDEL, Ivan. **Bag Holder - Shopping Handle**. [S. l.], 13 jul. 2012. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:26767>. Acesso em: 14 nov. 2023.

SILVA, MILENA FONTOURA. **Relação dos parâmetros de impressão com propriedades mecânicas de peças poliméricas obtidas por impressão 3D pela técnica FDM**. Porto Alegre. 2022. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

SOARES. **História da Impressão 3D - saiba como tudo começou**. [S. l.]: 3D data, 22 jul. 2021. Disponível em: <https://3ddata.com.br/historia-da-impressao-3d>. Acesso em: 20 set. 2023.

SOUZA, Hellen. **A impressão 3D como processo industrial**. [S. l.]: Aranda, 16 maio 2019. Disponível em: [https://www.arandanet.com.br/revista/mm/materia/2019/05/19/a\\_impressao\\_3d\\_como\\_processo\\_industrial.html](https://www.arandanet.com.br/revista/mm/materia/2019/05/19/a_impressao_3d_como_processo_industrial.html). Acesso em: 21 set. 2023.

STRATASYS. **Tecnologia FDM™**: A tecnologia FDM é o processo de produzir objetos físicos através da construção de camadas sucessivas de material com um filamento termoplástico extrudado. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.stratasys.com/br/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/fdm-technology>. Acesso em: 20 set. 2023.

TERMINOLOGIA. In: CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros**: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. rev. São paulo: Artiber Editora Ltda, 2006. cap. 4, p. 23-30. ISBN 85-88098-10-5. Disponível em: [http://www.ifba.edu.br/professores/iarasantos/QUI%20541\\_Qu%C3%ADmica%20de%20pol%C3%ADmeros/Livros/Cie%C3%82ncia%20dos%20polimeros%20-%20Canevarolo%20Jr.,%20Sebastiao%20V.pdf](http://www.ifba.edu.br/professores/iarasantos/QUI%20541_Qu%C3%ADmica%20de%20pol%C3%ADmeros/Livros/Cie%C3%82ncia%20dos%20polimeros%20-%20Canevarolo%20Jr.,%20Sebastiao%20V.pdf). Acesso em: 21 set. 2023.

TREATSTOCK. **Nylon (FDM 3D printing)**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.treatstock.com/material/nylon-fdm>. Acesso em: 20 set. 2023.

TSOUKNIDAS, A. Friction induced wear of rapid prototyping generated materials: a review. **Advances in Tribology**, 2011.

VIAU, Kimberly. **Tipos de preenchimento no Cura! Veja como configurar o infill neste software**. [S. l.]: 3DLAB, 7 maio 2021. Disponível em: <https://3dlab.com.br/tag/preenchimento/>. Acesso em: 21 set. 2023.

ZIAEE, Mohsen; CRANE, Nathan B. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. **Additive Manufacturing**, [s. l.], v. 28, p. 781-801, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418310078>. Acesso em: 21 set. 2023.