



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LEONARDO KLISMAM RABELO CHAGAS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NA
RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DE CORPOS DE PROVAS PRODUZIDOS EM PLA**

RUSSAS

2023

LEONARDO KLISMAM RABELO CHAGAS

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NA
RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DE CORPOS DE PROVAS PRODUZIDOS EM PLA

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

Orientador: Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira

RUSSAS

2023

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

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

- C424i Chagas, Leonardo Klismam Rabelo.
Influência dos parâmetros de impressão 3d na resistência a tração de corpos de provas produzidos em pla / Leonardo Klismam Rabelo Chagas. – 2023.
96 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2023.
Orientação: Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira.
1. Manufatura Aditiva. 2. Impressão 3D. 3. Fusão e deposição de material. 4. PLA. 5. Parâmetros de impressão. I. Título.

CDD 620.1

LEONARDO KLISMAM RABELO CHAGAS

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NA
RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS PRODUZIDOS EM PLA

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

Aprovada em 11/07/2023.

BANCA EXAMINADORA

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

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

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

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por ter me permitido de realizar esse sonho, dando forças durante os momentos de adversidades fazendo com que meus objetivos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudos.

Aos meus pais, Aristonio e Liduina, que ao longo da minha vida sempre me apoiaram nos momentos difíceis, ensinando a ser perseverante em busca dos meus sonhos.

A minha esposa, Adriana, pelo companheirismo e compreensão que durante toda jornada acadêmica esteve do meu lado incentivando nos momentos difíceis, colaborando para que pudesse está realizando mais um sonho.

Aos meus irmãos, Thiago, Junior e Neto, que cada um com sua forma contribuíram na minha formação com incentivos, conselhos e experiencias, tornando a trajetória com grandes aprendizados e lições.

Ao professor Dr. George Luiz, pela orientação, dedicação, paciência e suporte durante a elaboração desse trabalho.

Aos meus professores, pela dedicação em desempenhar da melhor forma ensinamentos, que foram fundamentais na minha formação profissional ao longo do curso.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), essencial no meu processo de formação profissional, pela dedicação, e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso.

RESUMO

A manufatura aditiva (MA) surge como uma grande alternativa aos processos de fabricações tradicionais, pois abre possibilidades de fabricar peças complexas com menores custos e tempo, ganhando destaque no setor de engenharia e projetos das empresas, possibilitando a produção de protótipos com menores custo. Dentro da MA o principal método usado é o de fusão e deposição de material (FDM), sendo de baixo custo, fácil utilização e uma gama enorme de aplicações. Diante disso surge uma grande necessidade sobre o estudo dos parâmetros de impressão e suas implicações no resultado final da peça. O objetivo geral do presente trabalho é analisar a influência dos parâmetros: altura da camada, nível de preenchimento e tipo de preenchimento na resistência a tração dos corpos de provas (CPs) produzidos em Poli Ácido Lático (PLA). A partir da norma ASTM D638-14a definiu-se a geometria do CP e os processos padrões para o ensaio. O trabalho seguiu com a realização dos ensaios e então a partir dos dados obtidos foram analisados a influência da variação dos parâmetros de altura da camada, nível de preenchimento e tipo de preenchimento afetava na resistência a tração, alongamento, tempo de impressão e massa aplicados ao filamento em PLA. A análise dos dados foi feita a partir do software Minitab, usando a ferramenta de Análise de variância (ANOVA), onde é possível determinar quais parâmetros apresentam influência significativa dentro do que foi proposto. Como resultado temos que a altura da camada teve influência significativa sobre o alongamento e o tempo de impressão, o nível de preenchimento influenciou significativamente o LTR, alongamento e massa, no entanto o tempo de impressão sofreu influência, mas não ao o nível de significância da ANOVA, por fim o tipo de preenchimento não afetou significativamente nenhum dos pontos abordados.

Palavras-chave: manufatura aditiva; impressão 3d; fusão e deposição de material; pla; parâmetros de impressão; anova.

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) emerges as a great alternative to traditional manufacturing processes, as it opens up possibilities for manufacturing complex parts with lower costs and time, gaining prominence in the engineering and design sector of companies, allowing the production of projects with lower costs. Within AM, the main method used is the melting and deposition of material (FDM), being low cost, easy to use and a huge range of applications. In view of this, there is a great need for the study of printing parameters and their projections in the final result of the part. The general objective of this work is to analyze the influence of the parameters: layer height, filling level and type of filling on the tensile strength of specimens (PCs) produced in Poly Lactic Acid (PLA). Based on the ASTM D638-14a standard, the CP geometry and standard testing processes are defined. The work continued with the carrying out of the tests and then from the data obtained, the influence of the variation of the parameters of layer height, filling level and type of filling was analyzed, which affected the tensile strength, elongation, printing time and mass. applied to the PLA filament. Data analysis was performed using the Minitab software, using the Analysis of variance (ANOVA) tool, where it is possible to determine which parameters have a significant influence within what was proposed. As a result, layer height had a significant influence on elongation and printing time, filling level significantly influenced LTR, elongation and mass, however depression time was influenced, but not at the ANOVA significance level, finally, the type of filling did not significantly affect any of the considered points.

Keywords: additive manufacturing; 3d printing; melting and deposition of material; pla; print parameters; anova.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variações de termos para Manufatura Aditiva	21
Figura 2 - Etapas do processo de impressão 3D	22
Figura 3 - Princípio do processo FDM.....	23
Figura 4 - Estratégias de preenchimento das camadas do processo FDM	24
Figura 5 - Exemplo de impressora cartesiana	26
Figura 6 - Impressora Core XY.....	27
Figura 7 - Impressora Delta.....	28
Figura 8 - Níveis de preenchimento da impressão 3D	30
Figura 9 - Tipos de preenchimentos	31
Figura 10 – Efeito da Altura de camada em uma impressão 3D na superfície da peça	32
Figura 11 – Tipos de orientações de preenchimento: a) 0°; b) 45°; c) 90°; d) - 45°...32	
Figura 12 - Diâmetro dos bicos de extrusão.....	35
Figura 13 - Gráfico de tensão x deformação de um ensaio de tração.....	37
Figura 14 - Tensão x deformação de polímeros	37
Figura 15 - Gráficos tensão x deformação de PLA e ABS	38
Figura 16 - Nível de preenchimento x resistência dos polímeros	39
Figura 17 - Impressora 3D.....	42
Figura 18 - Especificações Técnicas impressora Core H5	43
Figura 19 - Filamento PLA.....	43
Figura 20 - Especificações Técnicas PLA	44
Figura 21 - Adesivo fixador para impressora 3D	44
Figura 22 - Paquímetro Digital Zaas.....	45
Figura 23 - Balança Digital de Precisão	45
Figura 24 - Máquina ensaio de tração EMIC	46
Figura 25 - Fluxograma	47
Figura 26 - Desenho 3D do CP no Solidwork.....	50
Figura 27 - Desenho 2D corpo de prova com as dimensões.....	50
Figura 28 - Corpos de provas no Ultimaker Cura 5.3	51
Figura 29 - Painel da impressora em processo de impressão.....	52
Figura 30 - Corpos de prova impressos	52
Figura 31 - Fixação do CP na garra	53
Figura 32 - Gráfico dispensão da larguras dos CPs com os limites máximos e mínimos	

.....	55
Figura 33 - Gráfico em barras da espessura dos CPs com os limites máximos e mínimos.....	55
Figura 34 - Gráfico dispessão da massa dos CPs	57
Figura 35 - Gráfico efeito do nível de preenchimento sobre a massa	58
Figura 36 - Gráfico diferença de médias para massa em IC de 95% Tukey.....	59
Figura 37 - Gráfico efeito da altura da camada sobre a massa.....	60
Figura 38 - Gráfico efeito do tipo de preenchimento sobre a massa	61
Figura 39 - Gráfico dispessão do tempo de impressão dos corpos de provas	62
Figura 40 - Gráfico efeito do nível de preenchimento sobre o tempo de preenchimento	63
Figura 41 Gráfico efeito da altura da camada sobre o tempo de impressão	64
Figura 42 - Gráfico diferença de médias para tempo de impressão em IC de 95% Tukey	65
Figura 43 - Gráfico efeito do tipo de preenchimento sobre o tempo de impressão ...	66
Figura 44 - Tensão x deformação do corpo de prova	67
Figura 45 - Corpos de provas 1 a 9 após o ensaio.....	68
Figura 46 - Corpos de provas 10 a 18 após o ensaio.....	68
Figura 47 - Gráfico dispessão do LRT dos CPs	70
Figura 48 - Efeito do nível de preenchimento sobre o LRT	71
Figura 49 - Gráfico diferença de médias para LRT em IC de 95% Tukey.....	72
Figura 50 - Gráfico Tensão-Deformação variando o nível de preenchimento.....	73
Figura 51 - Efeito da altura da camada sobre o LRT	74
Figura 52 - Gráficos tensão - deformação das alturas da camadas	75
Figura 53 - Efeito da tipo de preenchimento sobre o LRT	76
Figura 54 - Gráfico tensão - deformação do tipo de preenchimento	76
Figura 55 - Gráfico dispessão do alongamento dos CPs	78
Figura 56 - Gráfico efeito do nível de preenchimento sobre alongamento	79
Figura 57 - Gráfico diferença de médias para Alongamento em IC de 95% Tukey. ..	80
Figura 58 - Gráfico efeito da altura de camada sobre alongamento.....	81
Figura 59 - Gráfico diferença de médias para Alongamento em IC de 95% Tukey. ..	83
Figura 60 - Gráfico efeito do tipo de preenchimento sobre alongamento	84
Figura 61 - Gráficos de Intervalos LRT comparando parâmetros e trabalhos	85
Figura 62 - Gráficos de Intervalos de alongamento comparando parâmetros e	

trabalhos.....	87
----------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperatura de impressão de filamentos	33
Tabela 2 - Temperatura da mesa de impressão dos filamentos	34
Tabela 3 - Tabela ANOVA.	40
Tabela 4 - Parâmetros Fixos de impressão	48
Tabela 5 - Parâmetros Definitivos.....	48
Tabela 6 - Matriz experimento	49
Tabela 7 - Dimensões dos corpos de prova.	54
Tabela 8 - Média das massas dos corpos de provas.....	56
Tabela 9 - ANOVA do nível de preenchimento sobre a massa	57
Tabela 10 - Agrupamento pelo método de Tukey 95% confiança.....	58
Tabela 11 - Testes Simultâneos de Tukey para Diferenças de Médias.....	58
Tabela 12 - ANOVA da altura da camada sobre a massa.....	59
Tabela 13 - ANOVA do tipo de preenchimento sobre a massa	60
Tabela 14 - Tempo de impressão dos corpos de provas	61
Tabela 15 - ANOVA do nível de preenchimento sobre o tempo de impressão	63
Tabela 16 - ANOVA da altura da camada sobre o tempo de impressão	64
Tabela 17 - Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança	64
Tabela 18 - Testes Simultâneos de Tukey para Diferenças de Médias	65
Tabela 19 - ANOVA do tipo de preenchimento sobre o tempo de impressão	66
Tabela 20 - Matriz resultado LRT	69
Tabela 21 - Análise de variância sobre o efeito do nível de preenchimento tem na LRT	70
Tabela 22 - Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança	72
Tabela 23 - Testes Simultâneos de Tukey para Diferenças de Médias	72
Tabela 24 - Análise de variância sobre o efeito da altura da camada tem na LRT	73
Tabela 25 – Análise de variância sobre o efeito do tipo de preenchimento tem na LRT	75
Tabela 26 - Alongamento máximo experimental.....	77
Tabela 27 - ANOVA Alongamento sobre nível de preenchimento.....	78
Tabela 28 - Agrupamento pelo método de Tukey 95% confiança.....	80
Tabela 29 - Testes Simultâneos de Tukey para Diferenças de Médias	80
Tabela 30 - ANOVA da altura de camada sobre alongamento.....	81

Tabela 31 - Agrupamento pelo método de Tukey 95% confiança.....	82
Tabela 32 - Testes Simultâneos de Tukey para Diferenças de Médias	82
Tabela 33 - ANOVA Alongamento sobre tipo de preenchimento.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bi-Dimensional
3D	Tri-Dimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society For Testing And Materials
CAD	Computer-Aided Design
CPs	Corpos de prova
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição de Materiais
FFF	Fused Filament Fabrication
LRT	Limite de Resistência à Tração
MA	Manufatura Aditiva
min	Minuto
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
PC	Policarbonato
PET	Poli Tereftalato de Etileno
PETG	Poli Tereftalato de Etileno Glicol
PLA	Ácido Poli Láctico
PR	Prototipagem Rápida
STL	Surface Tessellation Language
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Objetivo geral	19
1.2. Objetivos específicos	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. Manufatura Aditiva	20
2.2. Impressão FDM	23
2.2.1. Vantagens da impressão FDM	24
2.2.2. Desvantagens da impressão FDM	25
2.3. Tipos de Impressora 3D	25
2.3.1. Cartesiana	25
2.3.2. Core XY	26
2.3.3. Delta	27
2.4. Tipos de materiais	28
2.4.1. Filamento PLA	28
2.4.2. Filamento ABS	29
2.4.3. Filamento PETG	29
2.5. Parâmetros de Impressão	29
2.5.1. Nível de preenchimento	30
2.5.2. Tipo de preenchimento	30
2.5.3. Altura de camada	31
2.5.4. Orientação do preenchimento	32
2.5.5. Temperatura de impressão	33
2.5.6. Temperatura da mesa de impressão	33
2.5.7. Diâmetro do bico	34
2.5.8. Velocidade de impressão	35
2.6. Ensaio de tração para materiais poliméricos	36

2.7.	Análise estatística	39
2.7.1.	Análise de variância	39
2.7.2.	Teste de Tukey	41
3.	MATERIAIS E METODOLOGIA	42
3.1.	Materiais	42
3.1.1.	Impressora 3D	42
3.1.2.	Filamento	43
3.1.3.	Adesivo Fixador liquido	44
3.1.4.	Equipamentos de medições	44
3.1.5.	Equipamento para ensaio de tração	45
3.2.	Metodologia	46
3.2.1.	Parâmetros de impressão 3D	47
3.2.2.	Matriz experimento	48
3.2.3.	Geometria dos corpos de provas	49
3.2.4.	Processo de impressão dos CPs	51
3.2.5.	Processo de medição	52
3.2.6.	Ensaio de tração	53
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1.	Análise dimensional dos corpos de provas	54
4.1.1.	Massa do corpo de prova	55
4.1.2.	Tempo de impressão	61
4.2.	Análise do ensaio de tração	67
4.2.1.	Ruptura dos corpos de provas	67
4.2.2.	Limite de resistência à tração	68
4.2.3.	Alongamento máximo de ruptura	77
4.3.	Comparação dos resultados	84
5.	CONCLUSÃO	88

6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIAS	91

1. INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação tradicionais utilizados para a fabricação de peças são em sua maioria fundamentados em vários princípios mecânicos, como por exemplo, na moldagem e remoção do material obtendo assim a geometria desejada, processos de conformação plástica, além desses processos, temos também o processo de soldagem, no qual, o produto final é resultado da união de diferentes componentes (VOLPATO, 2017).

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, tem revolucionado a indústria e a sociedade como um todo. Essa tecnologia inovadora permite a criação de objetos tridimensionais a partir da adição de camadas sucessivas de material, tendo uma ampla gama de aplicações nas áreas de engenharia, medicina e arquitetura. Entre os diversos processos de impressão 3D existentes, o que mais se destaca é o *Fused Deposition Modeling* (FDM).

O FDM é uma técnica de impressão 3D amplamente utilizada devido à sua simplicidade, versatilidade e de baixo custo. Nesse processo, o material em estado sólido em forma de filamento é inserido a uma extrusora aquecida, fundindo e depositando camada por camada, formando o objeto desejado. Esse processo permite a criação de peças complexas de várias geometrias.

O PLA é um dos materiais mais utilizados na impressão 3D FDM, além de ser um polímero biodegradável e derivado de recursos renováveis, como amido de milho ou cana-de-açúcar, sendo ecologicamente correto. Apresenta boa resistência mecânica, com uma alta resistência a tração e baixa resistência a flexão.

No entanto, para garantir a resistência mecânicas das peças impressas em PLA utilizando o FDM, é fundamental compreender e controlar os parâmetros de impressão. Os parâmetros de impressão analisados incluem, nível de preenchimento, altura da camada e tipo de preenchimento, cada um desses parâmetros afeta diretamente as propriedades mecânicas das peças impressas, como resistência à tração, alongamento de ruptura e afetando também tempo de impressão e massa.

Sabendo que os parâmetros de impressão podem ser alterados para se adequar à diferentes aplicações, seja ela onde se necessite melhor qualidade

superficial e/ou melhor propriedade mecânica suportando cargas sem ser danificadas (SOUSA, 2022).

A partir da grande relevância do processo FDM no cenário atual, é entendido a importância do estudo dos parâmetros de impressão, onde abre a possibilidade para a otimização dos recursos usados, como também a propriedade mecânica da peça de acordo com a aplicação do modelo, permitindo a redução de custos e tempo de impressão.

Diante disso, com o estudo dos parâmetros de impressão como o nível de preenchimento, altura de camada e tipo de preenchimento, será analisado suas influências sobre a propriedade mecânica dos corpos de provas produzidos em PLA.

1.1. Objetivo geral

Analisar a influência dos parâmetros da impressão 3D, altura da camada, nível de preenchimento e tipo de preenchimento representa na resistência a tração dos corpos de provas (CPs) produzidos em PLA.

1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos para que possamos atingir como meta o objetivo geral são:

1. Produzir os CPs seguindo o padrão ASTM D638-14a, para diferentes níveis de preenchimento, altura de camada e tipo de preenchimento;
2. Efetuar o ensaio de tração dos CPs;
3. Realizar análise dimensional da largura e espessura e de massa dos CPs;
4. Avaliar a influência dos parâmetros de impressão sobre o LTR;
5. Avaliar a influência dos parâmetros de impressão sobre o alongamento;
6. Avaliar a influência dos parâmetros de impressão sobre a massa dos;
7. Avaliar a influência dos parâmetros de impressão sobre os o tempo de impressão;
8. Avaliar qual parâmetro predomina como maior influência sobre os resultados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Manufatura Aditiva

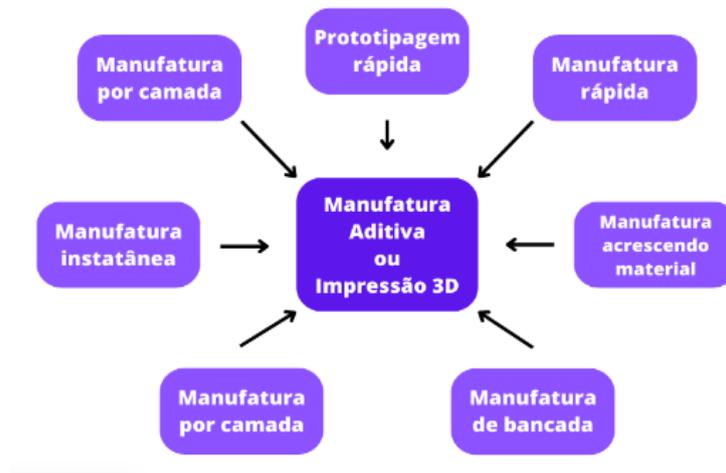
A manufatura aditiva (MA) é um método diferente para criar peças, definindo-se pela adição do material em sua constituição, ao invés da remoção. Esse processo ocorre em uma impressora 3D, e envolve a construção de um produto em camadas pela deposição de um pó, muito fino, ou de um material líquido, o qual então é fundido ou solidificado (DOMINGUES, 2020).

Pelo fato de a Manufatura Aditiva ser um processo de adição de material, e também utilizar de um modelo computacional, é uma ótima opção para desenvolver protótipos e peças mais complexas, sendo que tradicionalmente são feitas por usinagem CNC, eletroerosão ou até mesmo manualmente. Dado esses processos, todos são caros e demorados, o que torna a implementação de técnicas de prototipagem rápida muito bem-vindas. Estima-se que esta técnica permita economizar 75% do tempo e custos envolvidos na fabricação de ferramentas (SENHORAS, 2022).

Conforme explicado acima, a Manufatura Aditiva é naturalmente utilizada para realizar a prototipagem das ferramentas, tanto que existe um termo chamado prototipagem rápida, utilizadas por diversas indústrias que buscam testar ou obter a peça ou ferramenta de maneira mais ágil.

Não existe somente prototipagem rápida como um termo alternativo para Manufatura Aditiva, percebe-se abaixo a Figura 1 com as várias nomenclaturas.

Figura 1 - Variações de termos para Manufatura Aditiva



Fonte: (VOLPATO, 2021) adaptado.

Conforme Neri Volpato (2007), o termo prototipagem rápida tem sido incoerente, tanto pela existência de novos termos mais adequados, como também aos processos que vem se tornando ainda mais aprimorados, ao ponto de serem utilizados em produtos finais. O autor deixa claro, que embora tal nomenclatura não seja mais apropriada, o nome original foi aderido, já que foi mais aceito popularmente.

Conforme mencionado pelo autor, a prototipação rápida foi essencialmente utilizada para obter peças e ferramentas de forma mais ágil, em compensação sua resistência e constituição não são equiparáveis a como é feito tradicionalmente, porém, podendo criar mais facilmente formas mais complexas, com baixo custo. Dado tal fato, é inegável que esse processo provou ao longo do tempo que tem um grande potencial, já que há prototipações que chegam a ser usados em produtos finais. "[...], o aparecimento da prototipação rápida pode ser considerado um marco em termos de tecnologias de manufatura" (VOLPATO, 2007, p. 3).

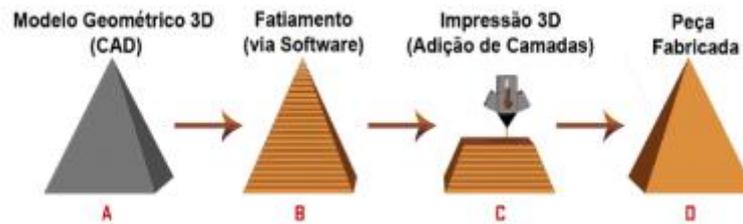
Dada a explicação acima, a prototipação rápida é um marco importante na indústria de manufaturas. De acordo com Givanildo (2020) a adoção desse processo causa um impacto positivo no sistema de produção e atendimento de demanda, os estoques acabam mais rápido, além da entrega que também é mais ágil, por exemplo, em projetos, ou mais especificamente em desenvolvimento de produtos, onde foram feitas as primeiras aplicações dessa tecnologia.

O processo de impressão 3D é dividido em etapas, em que primeiramente

é feita uma modelagem 3D em um programa de computador, onde vai realizar o fatiamento do modelo em camadas. Após isso é efetuado a impressão, onde a impressora 3D confecciona o produto, camada por camada, vai adicionando o material de acordo com a modelagem 3D, e por fim, o produto final é completamente impresso.

Este processo de impressão está ilustrado na figura abaixo:

Figura 2 - Etapas do processo de impressão 3D



Fonte: (STUDIO LEÃO 3D, 2022).

De acordo com Volpato (2021, p. 17 - 18):

Em virtude de seu princípio, a MA possui um enorme potencial para fabricar geometria complexas, uma vez que transforma uma geometria 3D em uma sequência de geometrias 2D (Camadas) mais simples. Em função do impacto causado na manufatura, o seu aparecimento tem sido considerado um marco em termos de processos de fabricação. Nesse sentido, a AM foi descrita pela revista *The Economist*, em sua edição de 21 de abril de 2012, como a terceira revolução industrial [1].

O autor deixa claro na citação acima, que a manufatura aditiva se tornou uma enorme evolução nos processos de fabricação. Com base nisso, mostra que tal tecnologia possui grande impacto nas indústrias, tanto nas de engenharia e automobilismo como até em medicina e artes, pois tal método trás liberdade e autonomia para quem for usar.

Fica evidente, diante desses dados que a manufatura aditiva se tornou uma tecnologia muito essencial e vantajosa, desde seu começo, sofrendo vários e vários aprimoramentos, chegando ao ponto de várias áreas de indústrias requisitarem o uso de tal método, suprimindo necessidades de maneira mais rápida, econômica e inclusiva. Por fim, é válido ressaltar que, com a crescente fama das impressoras 3D, principalmente as de custo mais baixos, surge um campo de aplicação mais popular e doméstico, e com um treinamento básico, qualquer pessoa poderá fazer o que lhe convém.

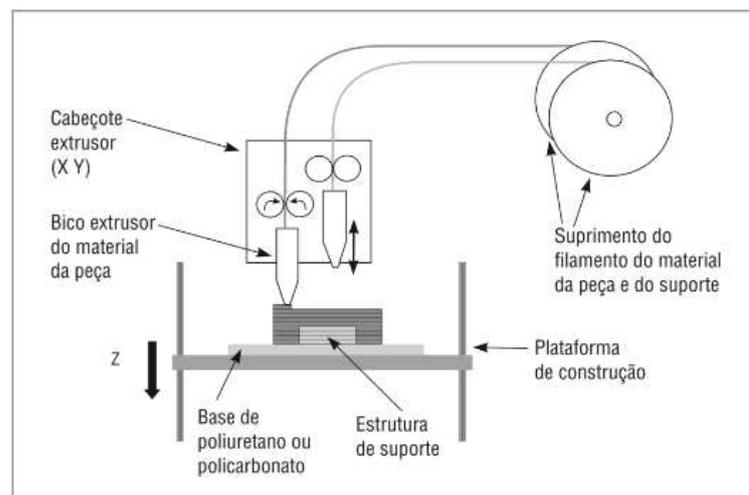
2.2. Impressão FDM

Fusion Deposition Modeling (FDM) é uma tecnologia aplicada a impressoras 3D, em que consiste no uso de filamentos como material, e tais quais possuem vários tipos, e cada serve mais adequadamente a certo tipo de objeto ou ferramenta a ser impressa. O filamento é aquecido a uma temperatura que ultrapasse seu ponto de fusão, a fim de aplicar o material sobre a camada, baseado na fatia do molde 3D. Essa tecnologia sem dúvidas é a mais difundida e acessível, e possui uma grande versatilidade dos materiais que compensa o baixo custo para peças de usos gerais (RAZGRIZ, 2020).

De acordo com Volpato (2007), a cabeça de extrusão expelle o material realizando os movimentos nos eixos X e Y, enquanto ao eixo Z, realizado pela mesa onde será feita a impressão, funciona como um elevador, definindo a camada na qual será trabalhada no momento, e no instante em que uma camada se encerra, a mesa realiza o movimento no eixo Z, para que seja iniciada a confecção da nova camada. Nesse processo, o objeto a ser impresso vai tomando forma, e será finalizado quando a última camada ser concluída.

Na ilustração abaixo é apresentado o esquema de funcionamento da tecnologia FDM conforme explicado acima.

Figura 3 - Princípio do processo FDM.



Fonte: (VOLPATO, 2007).

Para Rodrigues et al. (2017) apud Hopkinson et al. (2006), embora o processo de FDM tenha uma velocidade mais limitada, isso pois o cabeçote extrusor precisa percorrer toda a área de cada camada, porém, é compensado pela facilidade

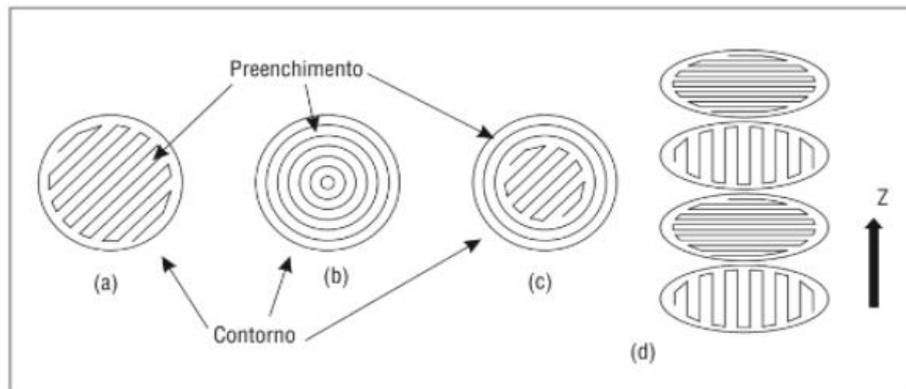
de montagem, tanto que pode ser utilizado em escritórios. O autor deixa claro que essa tecnologia trouxe autonomia para vários tipos de setores e indústrias, evitando gastos extras.

2.2.1. Vantagens da impressão FDM

Baseado nos dados anteriormente mostrados, o FDM é inegavelmente um grande avanço nas tecnologias de impressão 3D, principalmente o fator custo e disponibilidade. A principal vantagem que essa tecnologia possui é uma boa variedade de materiais, dessa maneira é possível utilizar a mais adequada dependendo do uso do objeto a ser impresso, sendo elas a PLA a mais usada, principalmente em impressoras FDM desktop (3D FILA, 2023).

De acordo com Volpato (2007), a tecnologia FDM possui estratégias de preenchimento, evitando mais gastos com materiais e economizando tempo de impressão. Existem alguns tipos de preenchimento que varia de acordo com o objetivo da peça, por exemplo, preenchimento raster e contour, como segue a Figura 4 abaixo.

Figura 4 - Estratégias de preenchimento das camadas do processo FDM



Fonte: (VOLPATO, 2007, p. 68).

(a) raster; (b) contour; (c) raster e contour; (d) alternância da direção do raster.

É importante destacar na Figura 4 que ocorre variação na direção do tipo de preenchimento, principalmente do preenchimento raster, e isso acontece para aumentar a resistência do objeto, em que a cada nova camada a direção muda 90°.

De acordo com Ambrós (2019) apud Kaftanoglu (2009), dentre as vantagens desse processo, uma que se destaca bastante é a possibilidade de utilizar essa tecnologia em locais mais simples de trabalho, pois é uma tecnologia de fácil

manuseio e silenciosa. Diante disso, é possível afirmar que essa tecnologia é uma ótima opção para aqueles que buscam autonomia para obter peças e objetos de maneira fácil e independente.

2.2.2. Desvantagens da impressão FDM

O processo FDM também possui suas desvantagens, e uma das principais é sua baixa resolução em comparação aos outros tipos de impressão 3D, por isso que em áreas como odontologia, modelos de joias ou outras áreas que exigem alta resolução, esse processo torna-se inviável (3D FILA, 2023). Com base nisso, os objetos impressos em impressoras FDM podem não atender as vezes certas exigências quanto a formas geométricas complexas e certas resistências específicas.

Com base no que já foi falado sobre necessidade de suporte na impressão FDM, isso causa um problema no quesito complexidade do material, pois não é possível confeccionar objetos com uma alta complexidade, além de que são necessárias as vezes realizar algum tipo de acabamento do objeto, justamente por causa dos suportes.

É comum que ocorra uma falha na estrutura e outras partes, isso decorre devido a oscilação de temperatura do material, que esquentando ou esfriando rápido ou devagar demais, ocorrido principalmente por causa do filamento termoplástico (PRINTIT3D, 2015). Por conta disso, não é raro as ocasiões em que se perde o objeto, sendo necessário refazer a impressão, dessa forma perdendo material e tempo.

2.3. Tipos de Impressora 3D

Conforme o desenvolvimento do processo FDM, as empresas buscaram a fabricação dessa tecnologia, e atualmente existem alguns modelos de impressoras 3D, e embora exista diferença entre elas, todas compartilham do processo FDM. Abaixo segue os tópicos que citam alguns tipos de impressoras FDM.

2.3.1. Cartesiana

Dos tipos de impressoras 3D FDM, uma das mais populares é a cartesiana, na qual é a que está mais presente no mercado. Ela é baseada no sistema de

coordenadas cartesianas, na qual, realiza o movimento nos eixos X, Y e Z, para que possa ser possível realizar os movimentos nas direções necessárias para a impressão. É natural que o cabeçote realize apenas os movimentos do eixo X e Y, enquanto a mesa onde o objeto é impresso é responsável pelo eixo Z (MARTEL, 2022). Segue abaixo a Figura 5 com uma impressora 3D cartesiana.

Figura 5 - Exemplo de impressora cartesiana



Fonte: Absoluciojona (2023).

É importante destacar na Figura 5 que dependendo da empresa, o cabeçote realiza os movimentos dos 3 eixos, X e Y com 4 direções possíveis, e o Z, com mais duas direções possíveis.

2.3.2. Core XY

Possuindo uma semelhança com as impressoras cartesianas, as Core XY também apresentam volume cúbico de impressão, no entanto, neste modelo existem motores nos eixos X e Y, trabalhando em conjunto para que o sistema de extrusão possa ser posicionado, enquanto o eixo Z está presente na plataforma que se movimenta para baixo enquanto ocorre a impressão (THOMAZETTI, 2019). Segue abaixo a Figura 6 com uma impressora modelo Core XY.

Figura 6 - Impressora Core XY



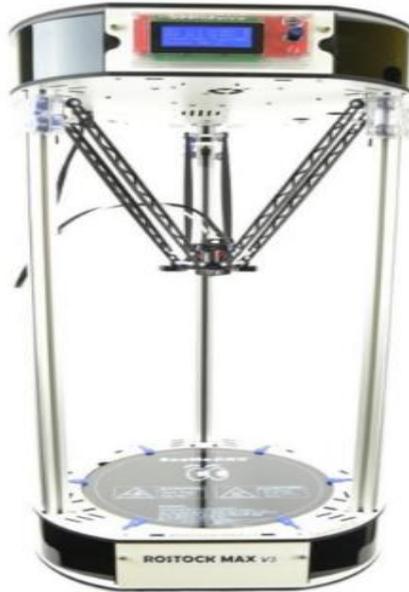
Fonte: (RAZGRIZ, 2020).

Um diferencial a impressoras cartesianas, se impressoras CoreXY forem bem calibradas, a velocidade de impressão pode ser maior, além de aumentar a estabilidade (RAZGRIZ, 2020).

2.3.3. Delta

A principal particularidade de impressoras Delta, está na presença de 3 motores, que trabalham em conjunto para movimentar o cabeçote para as coordenadas dentro do volume de trabalho, onde o tempo de reação de um motor depende da posição de outro motor. Além disso, possui 3 colunas que representam os eixos para a movimentação, e que o ponto inicial está alinhado ao centro e localizado no topo (THOMAZETTI, 2019; RAZGRIZ, 2020). Segue a figura 7 abaixo com uma impressora Delta.

Figura 7 - Impressora Delta



Fonte: (RAZGRIZ, 2020).

É importante destacar na

Figura 7 que embora seja visualmente bonito, esse tipo de modelo é terrível para calibrar, já que não possui pontos de referência, podendo gerar um imprevisto que coloca tudo a perder (RAZGRIZ, 2020).

2.4. Tipos de materiais

Existem diversos materiais de filamentos para a impressão 3D FDM, no entanto, as mais comuns são PLA, ABS e PETG, cada uma com suas propriedades e composições, e dependendo da finalidade da impressão, certo material pode ser mais adequado. Esses materiais citados são termoplásticos, ou seja, precisam ser aquecidos para poder tomar forma, e embora esses três tipos de filamentos possuam essa mesma característica, é importante saber a individualidade de cada um.

2.4.1. Filamento PLA

O filamento feito de PLA, um dos mais utilizados dentre os três citados, que pode ser confeccionado a partir de matéria orgânica, dessa maneira é um material biodegradável, portanto, é compostável e reciclável. Em comparação a outros filamentos, em geral, o PLA é mais rígido e possui temperatura de fusão mais baixa, possui menor probabilidade de deformação, além de ser um material de fácil uso geral para impressões 3D. É comum utilizar esse tipo de filamento para confeccionar peças maiores, e peças que irão sofrer atrito, porém, não é indicado para usos onde será

exposto a temperaturas um pouco mais elevadas, por conta de seu ponto de fusão ser baixo (WISHBOX, 2015).

2.4.2. Filamento ABS

O filamento de ABS é um ótimo tipo de filamento, e comumente utilizado por empresas automotivas, tanto que algumas partes do carro são feitas desse material, por conta de sua propriedade que permite uma boa resistência mecânica. O ABS é obtido a partir do petróleo, e seus filamentos, bastante utilizado na impressão 3D, juntamente com PLA, possui maior resistência térmica e facilidade de fazer um acabamento. O ponto negativo é que não é um material fácil de usar na impressão 3D, já que precisa de altas temperaturas para poder ser moldado, portanto, precisa de uma impressora 3D e um ambiente bem preparado, pois não é difícil de ocorrer deformações durante a impressão (PORTELA, 2017).

2.4.3. Filamento PETG

O filamento PETG possui propriedades semelhantes aos plásticos de garrafas PET, a diferença é que o PETG possui em sua composição o glicol, que elimina as propriedades frágeis que as garrafas PET possuem, além de ser reciclável. Na impressão 3D é bastante utilizado para criar peças onde precisa ser flexível e resistente às tensões externas e altas temperaturas. Embora seja flexível e tenha um nível de funcionalidade parecido com ABS, é um material confiável assim como PLA, portanto, seu uso é relativamente fácil. Apesar de ótimos pontos positivos, o PETG é mais propenso a escorrer, dessa forma pode haver a necessidade de mais pós-processamento, pois podem surgir manchas, além disso, se não for armazenada num local seco, o material poderá absorver a água, tornando-se mais quebradiço (ADMTECHCD, 2021; R3DY, 2021).

2.5. Parâmetros de Impressão

Os parâmetros de impressão são de grande importância para o processo de confecção do objeto a ser impresso, pois tais parâmetros influenciam diretamente para o resultado da impressão, definindo tanto as características estéticas como as mecânicas. Além disso, os parâmetros de impressão devem ser estabelecidos, pois também afetam no tempo de confecção e no custo de produção, como também acima

de tudo, suas propriedades mecânicas (MEDEIROS et al., 2020).

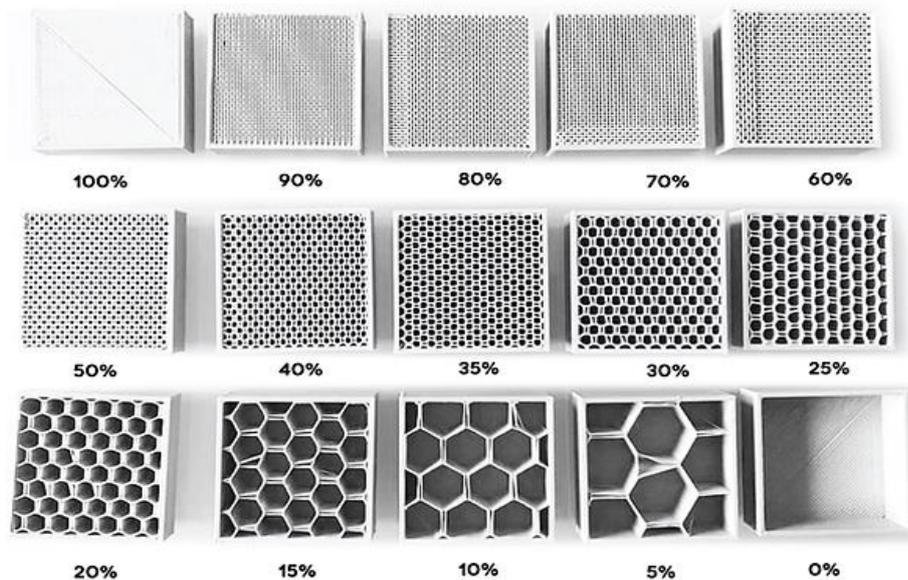
2.5.1. Nível de preenchimento

O nível de preenchimento da peça é de suma importância em relação a resistência mecânica, e para que a peça não seja oca e nem maciça, há parâmetros que estabelecem o preenchimento da peça, sempre visando a otimização do tempo de impressão, custo e da resistência mecânica.

Segundo Fernandes (2016), no momento da modelagem 3D, ao invés de preencher o interior do objeto, o software cria estruturas, preenchendo uma certa porcentagem do espaço vazio da peça, em que 0% indica o objeto oco, e 100% indica que o objeto está totalmente preenchido.

A utilização dessas estruturas, não servem apenas para que não haja alto consumo de material na impressão, como também para diminuir o tempo de impressão, e dependendo da utilização do objeto, o nível de preenchimento, que define a densidade do objeto, e a orientação da estrutura em relação a borda devem ser cuidadosamente selecionadas (FERNANDES, 2016). A Figura 8 demonstra os níveis de preenchimento de um objeto.

Figura 8 - Níveis de preenchimento da impressão 3D



Fonte: (IMPRIMALAB, [s.d.]).

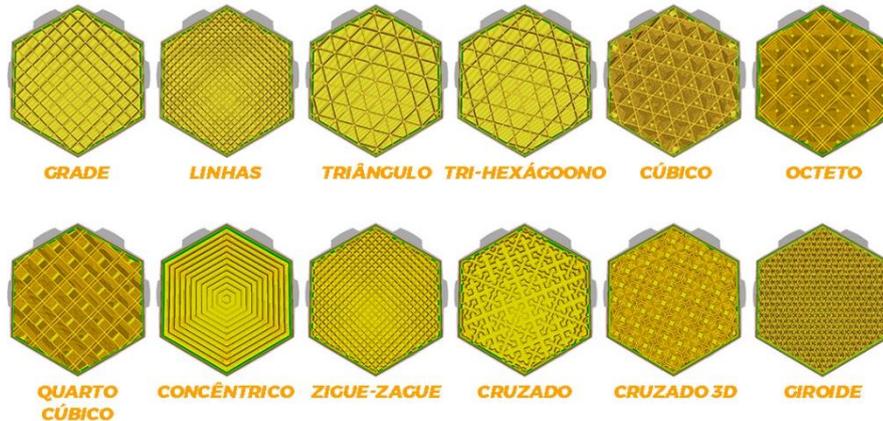
2.5.2. Tipo de preenchimento

O tipo de preenchimento é também um parâmetro importante, já que está

ligado principalmente a resistência da peça. Existem vários tipos de preenchimento, como hexagonal, grade, triângulos, linhas e concêntrico, porém, dentre elas a mais utilizadas é a hexagonal e grade, sendo a hexagonal a que oferece maior resistência (LOPES et al., 2018).

Abaixo segue a Figura 9, com os tipos de preenchimentos.

Figura 9 - Tipos de preenchimentos



Fonte: (PORTELA; VIAU; WEBMASTER, 2023).

É importante destacar na Figura 9 que dependendo da finalidade da peça a ser confeccionada, pode ser determinada o tipo de preenchimento, além também do nível de preenchimento, caso seja requerido que a peça seja mais resistente, ou que seja mais flexível, por isso é importante fazer uma escolha coerente ao objetivo final da impressão.

2.5.3. Altura de camada

A altura da camada refere-se à espessura do filamento que será aplicado durante a impressão, quanto mais fina a camada, mais camadas serão necessárias para que a impressão seja completada. De acordo com Pereira et al. (2021), não só o padrão de preenchimento, mas também a altura da camada influencia no resultado final da peça, e baseado em experimentos, a peça com altura de camada com 0,35mm possui mais deformações do que a peça com 0,1mm de altura de camada. Com base nisso, é possível afirmar que quanto menor a altura da camada, mais detalhada e menor taxa de defeitos a peça possui.

É importante ressaltar que a tensão de ruptura do material está ligada à altura da camada, em que quanto menor a altura, maior será a tensão de ruptura do material, e vice-versa, tal efeito é acentuado pela menor altura da camada

(CHRISTIYAN; CHANDRASEKHAR; VENKATESWARLU, 2016). Segue abaixo a Figura 10 com exemplificações de altura de camadas.

Figura 10 – Efeito da Altura de camada em uma impressão 3D na superfície da peça



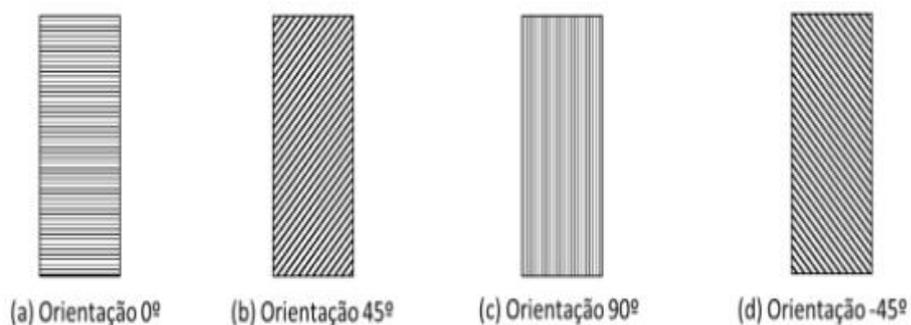
Fonte: Moustá (2018).

2.5.4. Orientação do preenchimento

A orientação de preenchimento se refere basicamente a direção em que segue o preenchimento da peça, que dependendo do ângulo, mesmo utilizando do mesmo tipo de preenchimento, pode modificar a qualidade final da peça. Tal parâmetro define em qual direção as linhas de preenchimento vão seguir durante toda impressão, e deve ser tratada com cuidado, já que influencia nas características mecânicas da peça (SOUSA, 2022).

Baseado nos estudos de Cabreira (2018), os testes efetuados no grupo onde a orientação de preenchimento era de -45° , 45° e 90° possuem desvios padrões muito superior ao do grupo com 0° , além disso foi notado que as médias e desvios padrões do grupo com 45° e -45° são praticamente idênticos, o que era de se esperar, já que um é espelho do outro. Segue abaixo a Figura 11, com as peças e suas orientações de preenchimento.

Figura 11 – Tipos de orientações de preenchimento: a) 0° ; b) 45° ; c) 90° ; d) -45° .



Fonte: (CABREIRA, 2018, p. 42).

Baseado nos experimentos de Fernandes (2016), os testes de tensão efetuados com os objetos de orientação de preenchimento $0^\circ/90^\circ$ obtiveram resultados superiores aos com $-45^\circ/45^\circ$, tanto em tensão máxima, como também nas tensões de cadência e módulos de elasticidade.

2.5.5. Temperatura de impressão

A temperatura de impressão é um parâmetro importante que é definido pela temperatura em que o material atinge no momento da extrusão. O ajuste dessa temperatura deve ser cuidadosamente configurado, principalmente tendo como base o tipo de material a ser usado, já que se for quente demais pode reduzir a resistência da peça, e se for temperatura mais baixa, pode acarretar no mesmo problema, além de fazer o bico extrusor forçar mais o trabalho (PORTELA, 2019).

A temperatura de impressão está diretamente relacionada ao impacto ambiental, pois caso seja necessário de mais calor para a extrusão de material, conseqüentemente haverá maior consumo de energia, juntamente necessário o uso de mesa aquecida (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017). É importante ressaltar que os parâmetros de temperatura mudam dependendo do material utilizado, que embora grande maioria sejam termoplásticos, suas composições químicas divergem umas das outras. Segue a Tabela 1 abaixo com os tipos de materiais e suas temperaturas ideais para impressão.

Tabela 1 - Temperatura de impressão de filamentos

<i>Material</i>	<i>Temperatura de impressão (°C)</i>
<i>PLA</i>	180 °C – 230 °C
<i>ABS</i>	210 °C – 250 °C
<i>PETG</i>	220 °C – 250 °C
<i>Nylon</i>	240 °C – 260 °C

Fonte: ALL3DP (2021).

2.5.6. Temperatura da mesa de impressão

A temperatura da mesa de impressão é um parâmetro que jamais pode ser desconsiderado, e deve ser ajustado corretamente, já que em caso de baixa

temperatura pode desafixar a peça da mesa enquanto ocorre a impressão, podendo causar um desliz e conseqüentemente a perda da peça, e para contornar o problema é aumentar a temperatura da mesa para que melhore a adesão da primeira camada à base da peça mais facilmente. Entretanto, uma mesa demasiadamente quente, pode derreter as primeiras camadas da peça, gerando deformidade e causando a perda da peça (PORTELA, 2019).

Para evitar problemas com empenamento da peça, é essencial que a mesa seja aquecida, para que haja aderência da peça na mesa, além também de evitar mudanças bruscas de temperatura, e além disso, a temperatura ambiente deve ser controlada da mesma forma, mantendo janelas e portas fechadas, para que não tenha risco de correr vento frio durante a impressão e causar empenamento na peça (ADMTECHCD, 2021). Segue abaixo a Tabela 2 com os tipos de filamentos e a temperatura da mesa de impressão adequada para cada uma.

Tabela 2 - Temperatura da mesa de impressão dos filamentos

<i>Material</i>	<i>Temperatura da mesa de impressão (°C)</i>
<i>PLA</i>	20 °C – 60 °C (mas não necessária)
<i>ABS</i>	80 °C – 110 °C
<i>PETG</i>	50 °C – 75 °C
<i>Nylon</i>	70 °C – 100 °C

Fonte: ALL3DP (2021).

2.5.7. Diâmetro do bico

O diâmetro do bico influencia diretamente no detalhamento da peça ao final da impressão, já que define a espessura e a forma do filamento ao ser extrudado. Existem bicos que possuem diâmetros desde 0,2 mm até 1 mm, e a escolha de tal diâmetro é de acordo com o nível requerido de detalhamento do objeto a ser impresso, porém, tendo em mente que dependendo do diâmetro, deve-se tomar cuidado com certos riscos (RAZGRIZ, 2021). Segue abaixo a Figura 12, com os diferentes diâmetros de bico de extrusão.

Figura 12 - Diâmetro dos bicos de extrusão



Fonte: (TOPINK3D, 2023) adaptado.

Normalmente, o diâmetro do bico de extrusão é de 0,4 mm, menos que isso, gera um grande aumento na qualidade do detalhe da impressão, no entanto, gera um risco de entupimento do bico, além do maior tempo de impressão. Já um diâmetro de bico maior, reduz bastante o tempo de impressão, muito úteis para peças maiores, no entanto, o nível de detalhamento cai bastante (RAZGRIZ, 2021).

2.5.8. Velocidade de impressão

A velocidade de impressão não só diz respeito ao tempo que leva para a peça ser concluída, como também a qualidade ao final da impressão. Em casos de alta velocidade de impressão, nem sempre significa em baixa qualidade de impressão, pois depende de vários fatores que está sendo levado em consideração, tais como diâmetro do bico extrusor, densidade do preenchimento, altura da camada e dentre outros (3dfila, 2018).

De acordo com Fernandes (2016), a velocidade de impressão pode ser dividida em cinco tipos de velocidade.

- Velocidade da primeira camada, que normalmente demora mais para haver melhor adesão na mesa de impressão;
- Velocidade de enchimento (ou velocidade de preenchimento), onde será feita a impressão das estruturas que preenchem a peça, que normalmente ocorre em velocidades um pouco mais altas;
- Velocidade das paredes de topo e de fundo, na qual é impressa a base e a parte de cima do objeto impresso, normalmente sendo impressa na mesma velocidade da primeira camada;

- Velocidade da parede lateral exterior, que define a parte exterior da peça, onde geralmente possui melhor qualidade, por isso possui velocidade um tanto quanto baixa;
- Velocidade da parede lateral interior, que é definida pela parte de dentro da peça, basicamente o outro lado da parede lateral exterior, sendo ela mais rápida, porém não mais que a velocidade de preenchimento.

E levando em consideração tais informações, pode-se dizer que para obter melhores resultados de detalhes e qualidade, exige um tempo maior para a impressão, dessa forma, pode ser necessário um ajuste entre velocidade ou tempo de impressão e qualidade da peça, de acordo com a finalidade e necessidade da mesma.

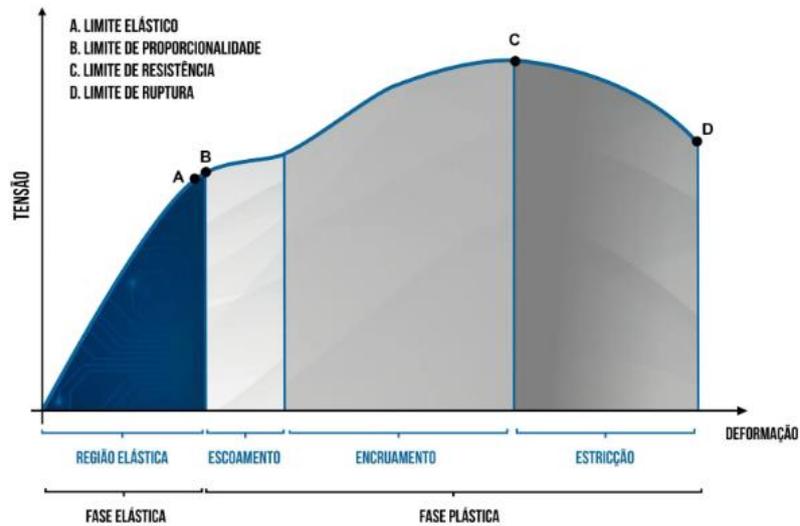
2.6. Ensaio de tração para materiais poliméricos

Conforme o desenvolvimento da manufatura aditiva, ensaios de tração para materiais poliméricos se tornam cada vez mais requisitados, já que é de grande importância o conhecimento da resistência e limites mecânicos do material, isso serve para ter em mente a finalidade que o material pode ser mais adequado. A resistência de um material é definida por sua capacidade de suportar cargas sem que ocorra deformações ou rompimento, e para determinar isso deve ser feito experimentos com o material, e nesse caso, os mais importantes efetuados são os testes de tração ou compressão (HIBBELER, 2010).

O procedimento para realizar o ensaio de tração consiste em aplicar uma carga uniaxial crescente em um corpo de prova, ao mesmo tempo em que são medidas a variação no comprimento do corpo, e certos parâmetros como velocidade de tensionamento, base de medida, e etc. são ditadas pela norma técnica baseado no tipo de material ou preferência, e tais normas técnicas são de grande ajuda, pois padroniza os métodos de ensaios e dos corpos de provas em paralelo à dimensão e obtenção das amostras, e exemplos dessas normas, estão ASTM e ISO. (MENDES et al., 2007; GONÇALVES, 2021). Segue abaixo a Figura 13 que mostra como é um gráfico que mostra a relação tensão x deformação dos materiais.

É importante destacar na Figura 13, segundo Mendes et al. (2007), que dado a medida de carga e alongamento, constrói-se a curva tensão x deformação.

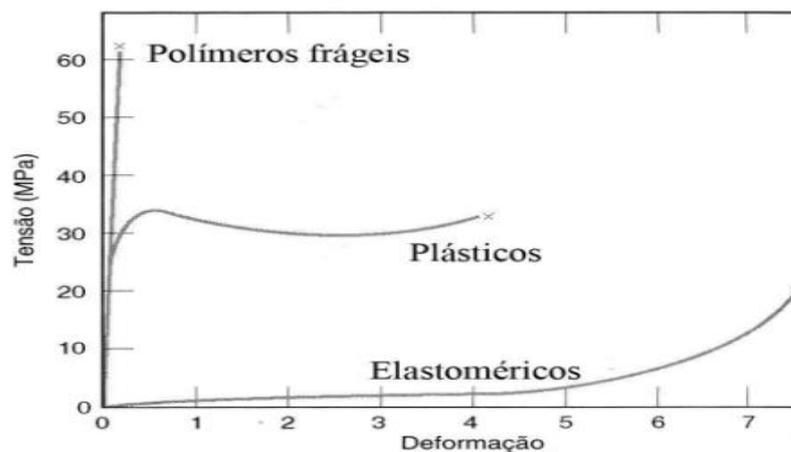
Figura 13 - Gráfico de tensão x deformação de um ensaio de tração



Fonte: (BIOPDI, 2019).

Um polímero pode ter alguns tipos de comportamento dependendo de sua composição, com um comportamento frágil não possui um ponto de escoamento, e dessa forma não se deforma de forma plástica. Já um comportamento plástico possui um ponto de escoamento nítido e deforma-se plasticamente. Um polímero com um comportamento elástico (ou elastomérico) retorna a sua dimensão original quando removida a tensão sobre ela, não possuindo deformações permanentes (RUCHERT, [s.d.]; MENDES et al., 2007). Segue a Figura 14 com os comportamentos dos polímeros representados em um gráfico.

Figura 14 - Tensão x deformação de polímeros

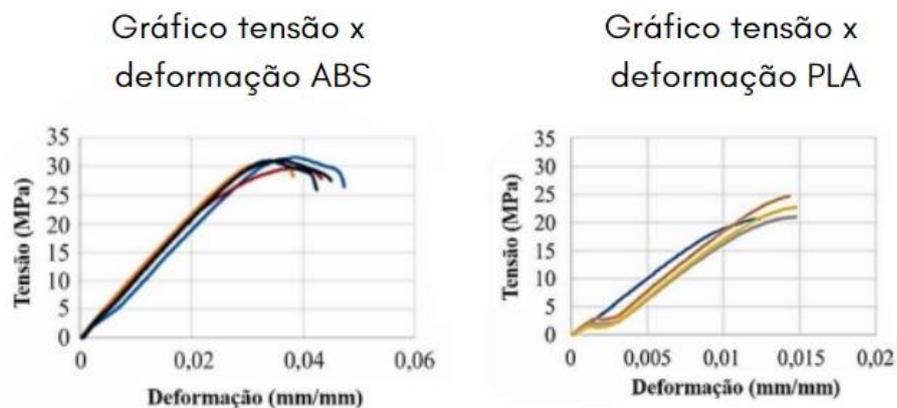


Fonte: (RUCHERT, [s.d.]).

Baseado nos estudos de Fernandes (2016), que realizou o ensaio de tração uniaxial em um corpo de prova feito de PLA, e utilizando os parâmetros de densidade de preenchimento, temperatura de extrusão, orientação de enchimento e espessura de camada, observou-se que o melhor desempenho de resistência obtido foi utilizando dos valores máximos, essencialmente a densidade de preenchimento, ou seja, quanto maiores os valores dos parâmetros, maior a resistência do corpo de prova. Tais ensaios foram efetuados numa máquina de testes universal Instron 3369 e utilizando da norma ASTM D638-02a.

De acordo com Magalhães (2019), que realizou o ensaio de tração em corpo de prova feito de ABS, utilizando da norma D638-14 da ASTM, e uma Instron 8801 para realizar o ensaio de tração, observou-se que os melhores resultados da resistência à tração foram com corpos de testes de ABS reciclado, impresso em temperaturas mais altas. No entanto, é afirmado que independentemente do tipo de ABS, seja natural ou reciclado, é um polímero frágil, já que em todos os ensaios o ponto de ruptura está localizado no início do escoamento, dessa maneira não havendo deformações plásticas significativas. Para efeitos comparativos, segue abaixo a Figura 15 com os gráficos tensão x deformação efetuados com corpos de provas de PLA e ABS.

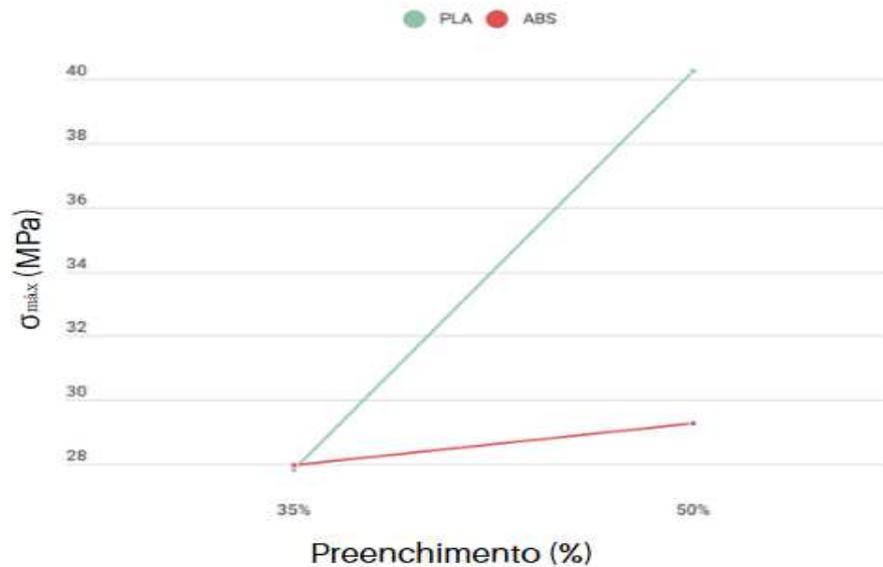
Figura 15 - Gráficos tensão x deformação de PLA e ABS



Fonte: (LIMA et al., 2021).

Baseado nos dados mostrados, a densidade de preenchimento do corpo de prova tem grande influência em sua resistência, que, conforme maior o nível de preenchimento, maior será sua tenacidade e resistência à tração. Segue abaixo a Figura 16 com o gráfico que mostra a relação do nível de preenchimento com a resistência do polímero.

Figura 16 - Nível de preenchimento x resistência dos polímeros



Fonte: (Santos, 2019).

2.7. Análise estatística

Após a realização dos testes e ensaios, com os resultados experimentais em mãos, o ideal a ser feito é a análise estatística, em que será feito cálculos e elaboração de gráficos para poder serem feitas as observações e/ou considerações sobre os testes e experimentos em questão. Existem métodos para realizar uma análise estatística, tais como análise de variância (ANOVA), ou também o teste de Turkey, e ambas serão explicadas nos subtópicos seguintes.

2.7.1. Análise de variância

A análise de variância, ou também conhecida como ANOVA, em comparação a outros métodos de análise, utiliza um modelo mais simples e linear, usando regressão linear, dessa maneira, determina relações entre fatores e respostas. A ANOVA nem sempre serve para avaliar fatores individuais de cada resposta, pode também realizar a análise conjugando dois ou mais fatores, dessa maneira é definido a força que essa combinação de fatores tem sobre as respostas (FERNANDES, 2016).

A ANOVA pode tanto ser unidirecional, como também bidirecional, e basicamente a diferença entre ambas é que de forma unidirecional, a ANOVA analisa apenas um fator de uma variável independente, e que terá que determinar se há alguma diferença estatisticamente significativa entre as médias de pelo menos três grupos. O método bidirecional analisa duas variáveis independentes afetando

somente uma variável dependente, isso é usado comumente para testar a interação de ambos fatores entre si, além de analisar o efeito dos dois fatores ao mesmo tempo (RODRIGUES, 2019).

Segundo Fernandes (2016), a ANOVA não é um método perfeito, podendo ter a ocorrência de erros, existindo alguns tipos de problemas, tais como concluir que existe relação entre dois fenômenos, sendo que não existe, e vice-versa, quando pressupõe que não exista uma relação, mas existe. É possível tentar passar por tais erros, no entanto, consiste em conseguir mais amostras da experiência, e que em certos cenários não é possível por falta de tempo ou dinheiro.

Diante de possíveis problemas, a ANOVA ajuda a descobrir se a diferença nos valores médios tem suas estatísticas significativas. E utilizando-se da tabela ANOVA, é possível saber se um fator influencia ou não uma resposta, mas tem que levar em conta que não pode contar com a tabela para identificar o nível de significância que o fator possa ou não ter sobre uma resposta. Um método para que possa ser possível adquirir tal informação é utilizando um método de comparação, como por exemplo o método de Tukey (TIBCO, [s.d.]; FERNANDES, 2016). Segue abaixo a Tabela 3, com a tabela genérica ANOVA.

Tabela 3 - Tabela ANOVA.

Fonte de variação	Soma dos quadrados (SS)	Graus de Liberdade (df)	Médias quadradas (MS)	F
<i>Fator</i>	$= \sum n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2$	$df_1 = k - 1$	$MSF = \frac{SSF}{df_1}$	$F = \frac{MSF}{MSE}$
<i>Resíduo</i>	$= \sum \sum (\bar{X} - \bar{X}_i)^2$	$df_2 = N - k$	$MSE = \frac{SSE}{df_2}$	-
<i>Total</i>	$= \sum \sum (X - \bar{X})^2$	$df_T = N - 1$	-	-

Fonte: (FERNANDES, 2016).

Para realizar ANOVA é necessário realizar as quatro etapas principais:

1. Definir as hipóteses nula e alternativa e o valor de α ;
2. Estabelecer a regra de decisão. Começa em encontrar o valor crítico de F. Este é determinado através de uma tabela de distribuição-F, utilizando os valores de df_1 e df_2 . A regra de decisão consiste em rejeitar H_0 se o

valor de F calculado for superior ao valor crítico de F;

3. Realizar os cálculos e preencher a Tabela da ANOVA;

4. Tirar conclusões acerca da rejeição ou não-rejeição de H_0 .

2.7.2. Teste de Tukey

Para verificar um caso em que o resultado evidencia uma distribuição de pelo menos um dos grupos que se difere dos demais, porém não indicando entre quais grupos é significativa, é utilizado o teste de Tukey, um poderoso teste para realizar comparações entre todos os pares. Esse teste consiste em comparar todos os possíveis pares de média, se baseando na diferença mínima significativa. Este teste se torna exato quando os tamanhos amostrais dos grupos são iguais, porém em comparações múltiplas são raros (OLIVEIRA, 2019).

Baseando-se na diferença mínima significativa, representada por Δ e dada pela seguinte equação: $\Delta = q \frac{s}{\sqrt{r}} = q \cdot s(\hat{m})$, onde q é o valor da amplitude total estudentizada, s é o valor dado por $s = \sqrt{QM_{Res}}$, e r é o número de repetições com que foram calculadas as médias dos tratamentos. Para realizar o processo do teste primeiro calcula-se o valor de Δ , e depois todas as estimativas de contraste entre duas médias, fazendo o seguinte: $\hat{Y} = \hat{m}_i - \hat{m}_j$. Após os cálculos, se compara os valores de Δ e $|\hat{Y}|$, caso $|\hat{Y}| > \Delta$, o contraste é significativo ao α de probabilidade (PERTICARRARI, [s.d]).

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

Nesta sessão serão apresentados os materiais e equipamentos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, dando prosseguimento com a metodologia aplicada para a realização e obtenção dos resultados.

3.1. Materiais

3.1.1. Impressora 3D

A impressora utilizada para a produção dos corpos de prova é da marca GTMax3d sendo uma Core XY, modelo Core H5 de tecnologia FDM/FFF, disponível no laboratório da Universidade Federal do Ceará – Campus Russas, conforme mostrado na *Figura 17*.

Figura 17 - Impressora 3D



Fonte: Autor (2023).

A impressora 3D possui uma mesa aquecida para impressão que se movimenta no eixo Z (vertical) enquanto a unidade extrusora se movimenta nos eixos X e Y (horizontal). A Figura 18 mostra as especificações técnicas da impressora segundo o fabricante.

Figura 18 - Especificações Técnicas impressora Core H5

Área de Impressão	300mm X 300mm X 500mm
Cabeça de Impressão	1
Qualidade de Impressão	Camadas de 0,05mm à 0,4mm
Automação	Detecção de fim de filamento e troca automática de filamento
Velocidade de Impressão	até 180mm/s
Velocidade de Deslocamento	400mm/s
Mesa	Alumínio aquecida, com tampo de vidro
Nivelamento	Automático (novo sistema ótico/mecânico)
Gabinete	Aço carbono cortado a laser e pintura eletrostática
Dimensões da Impressora	L 500mm X P 700mm X A 770mm
Alimentação	Bivolt (127V/220V) automático
Controle	Display LCD Touchscreen 5"
Conectividade	USB, Rede e Wi-Fi
Software	Gratuito

Fonte: GTMAX3D

3.1.2. Filamento

Para a fabricação dos corpos de prova foi usado o filamento em PLA de espessura 1,75mm da marca Cliever, sendo um material muito aplicado na impressão de peças 3D, sendo de fácil utilização, baixo custo e biodegradável, no entanto sua grande desvantagem é por ser material frágil possuindo baixa resistência a flexão e temperatura, no entanto apresenta um alto LTR comparado ao ABS.

Figura 19 - Filamento PLA



Fonte: Autor (2023).

Figura 20 - Especificações Técnicas PLA

Características técnicas	
Material	PLA Premium Cliever
Insumo do Filamento	INGEO NatureWorks (EUA)
Diâmetro	1,75 mm
Tolerância	$\pm 0,02\text{mm}$
Temperatura de Bico	180 a 225°C
Temperatura de Mesa	50 a 60°C
Velocidade de Impressão	40 a 70 mm/s
Densidade	1,24 g/cm ³
Comprimento	$\pm 380\text{m}$

Fonte: Cliever (2023).

3.1.3. Adesivo Fixador liquido

O adesivo fixador foi aplicado para aumentar a aderencia da primeira camada dos corpos de provas sobre a mesa aquecida evitando deslocamentos e perda das peças impressas.

Figura 21 - Adesivo fixador para impressora 3D



Fonte: Autor (2023).

3.1.4. Equipamentos de medições

Para poder analisar as variações dimensionais existentes na impressão por FDM, foi usado um paquímetro digital da ZAAS e uma balança digital de precisão, ambos os equipamentos são do laboratório da UFC do Campus de Russas, com o objetivo de determinar variações existentes no processo de impressão dos CPs, validando a aplicação para o ensaio dentro do padrão da norma ASTM D638-14. Abaixo seguem as imagens dos equipamentos usados.

Figura 22 - Paquímetro Digital Zaas



Fonte: Autor (2023).

Figura 23 - Balança Digital de Precisão



Fonte: Autor (2023).

3.1.5. Equipamento para ensaio de tração

O ensaio de Tração foi usado para determinar a resistência mecânica dos corpos de provas impressos, determinando suas curvas de tensão deformação, para o ensaio foi usada o equipamento de ensaio de Tração/Compressão da marca EMIC com capacidade de 300kN, disponível no laboratório de ensaio mecânico (LEM) da Universidade Federal do Ceará – Campus Russas. A Figura 24 mostra o equipamento usado para o ensaio.

Figura 24 - Máquina ensaio de tração EMIC



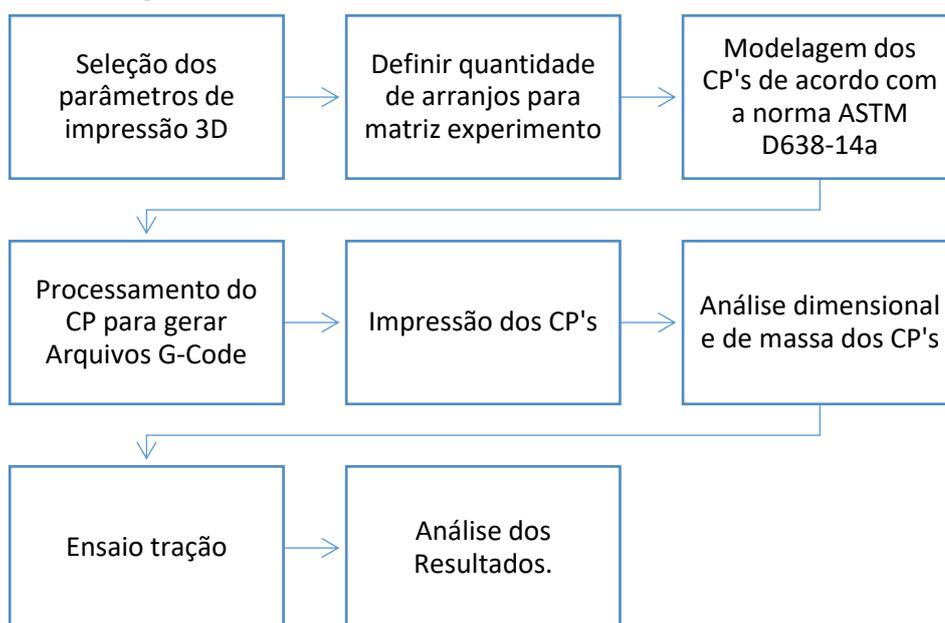
Fonte: Autor (2023).

3.2. Metodologia

Nesta parte do trabalho será descrito o processo de definição dos parâmetros de impressão, quantidade de arranjos necessário para o ensaio e construção da matriz experimento dos CPs, determinar as dimensões e geometria do CP, desenho 3D, fatiamento do CP, ensaio de tração e coleta de dados.

A Figura 25 apresenta o fluxograma do processo de desenvolvimento e etapas para a realização do trabalho, sendo eles explicados a seguir.

Figura 25 - Fluxograma



Fonte: Autor (2023).

3.2.1. Parâmetros de impressão 3D

Os parâmetros de impressão usados para desenvolver esse trabalho foram definidos a partir de estudos de trabalhos científicos e por informações técnicas do material e impressora, estão separados por parâmetros fixos, parâmetros para estudo de influência.

3.2.1.1. Parâmetros fixos

Os parâmetros fixos foram determinados com base em informações técnicas fornecidas pelo fabricante do filamento, como a temperatura de extrusão, da mesa e o fluxo de material, e os demais parâmetros por características da impressora como é o caso da largura de extrusão e velocidade de impressão.

Tabela 4 - Parâmetros Fixos de impressão

PARÂMETROS	VALOR	UNIDADE
LARGURA DE EXTRUSÃO	0,4	mm
CAMADAS SUPERIORES / INFERIORES	0,5	mm
TEMPERATURA DE IMPRESSÃO	210	°C
TEMPERATURA DA MESA	60	°C
FLUXO	100	%
ORIENTAÇÃO DO PREENCHIMENTO	0/90	°
VELOCIDADE DE IMPRESSÃO	50	mm/s

Fonte: Autor (2023).

3.2.1.2. Parâmetros para estudo de influência

Com base em estudos dos trabalhos do Campos (2022) e Sousa (2022) usados como referência para desenvolver esse trabalho foram identificados 3 parâmetros que apresentaram maiores influências à resistência a tração, alongamento, tempo de impressão e massa, são eles o padrão de preenchimento, altura de preenchimento e nível de preenchimento.

Sabendo que ambos os trabalhos utilizaram o ABS para impressão, dessa forma ficou decidido o estudo desses 3 parâmetros aplicado ao PLA, verificando se apresentam o mesmo comportamento.

Tabela 5 - Parâmetros Definitivos

PARÂMETROS	VALOR			UNIDADE
ALTURA DA CAMADA	0,12	0,2	0,32	mm
NÍVEL DE PREENCHIMENTO	20	50	100	%
PADRÃO DO PREENCHIMENTO	Giróide	Linha		

Fonte: Autor (2023).

3.2.2. Matriz experimento

Para a determinação da matriz experimento foi preciso conhecer os parâmetros de estudo e a quantidade de variáveis que cada parâmetro será analisado, para que fosse determinado a quantidade de combinações possíveis do experimento. Para o cálculo da quantidade de arranjos foi usado a equação abaixo.

$$C_{ME} = N_{AC} * N_{NP} * N_{PP}$$

C_{ME} = Combinações matriz experimento

N_{AC} = Quantidade de altura de camada

N_{NP} = Quantidade de nível de preenchimento

N_{PP} = Quantidade de padrão de preenchimento

$$C_{ME} = 3 * 3 * 2 = 18$$

Desta forma encontramos 18 arranjos, uma para cada condição de estudo, com isso conseguimos determinar a matriz experimento com os parâmetros de todos os CPs a serem impressos, dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Matriz experimento

CP	Padrão de Preenchimento	Altura da camada (mm)	Nível de Preenchimento (%)
CP1	GIROIDE	0,12	20
CP2	GIROIDE	0,12	50
CP3	GIROIDE	0,12	100
CP4	GIROIDE	0,2	20
CP5	GIROIDE	0,2	50
CP6	GIROIDE	0,2	100
CP7	GIROIDE	0,32	20
CP8	GIROIDE	0,32	50
CP9	GIROIDE	0,32	100
CP10	LINHA	0,12	20
CP11	LINHA	0,12	50
CP12	LINHA	0,12	100
CP13	LINHA	0,2	20
CP14	LINHA	0,2	50
CP15	LINHA	0,2	100
CP16	LINHA	0,32	20
CP17	LINHA	0,32	50
CP18	LINHA	0,32	100

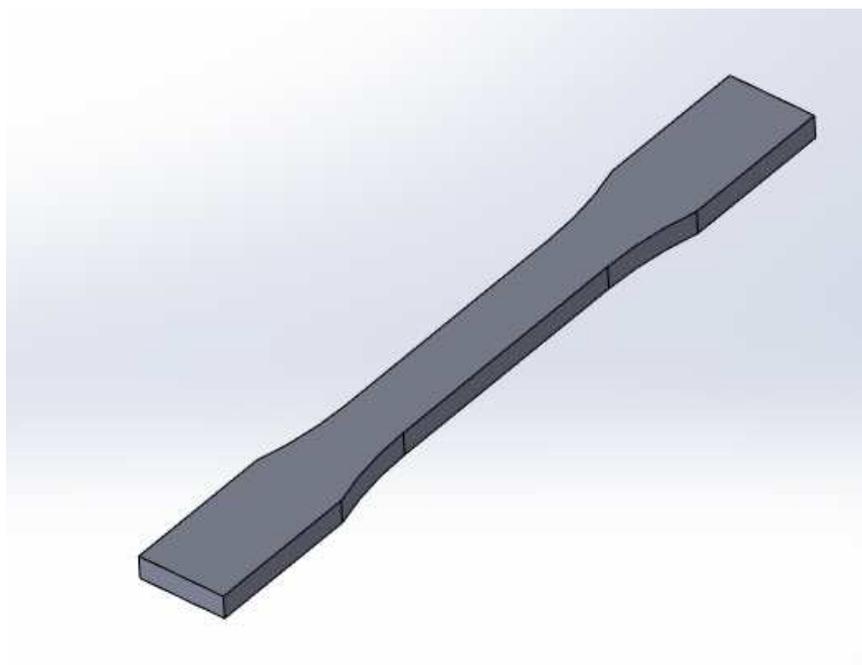
Fonte: Autor (2023).

3.2.3. Geometria dos corpos de provas.

Na determinação da geometria do corpo de prova para o ensaio de tração foi usado como referência a norma ASTM D638-14A, onde ela regulamenta geometrias e dimensões dos CPs para o ensaio de peças fabricadas em polímeros, possuindo 5 tipos de geometria.

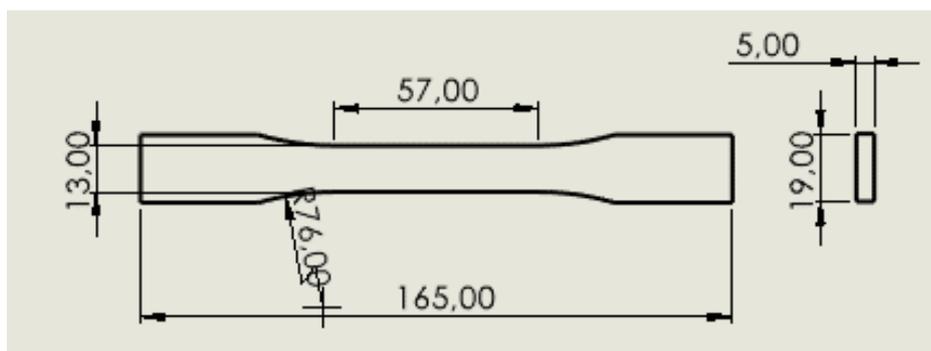
Foi determinado usar o tipo 1 de CP da norma para o ensaio, pois segundo a norma é o espécime preferido e atende a espessura inferior a 7 mm, o desenho da peça em 3D foi realizado no software de desenho 3D, como podemos ver na Figura 26 e Figura 27.

Figura 26 - Desenho 3D do CP no Solidwork



Fonte: Autor (2023).

Figura 27 - Desenho 2D corpo de prova com as dimensões.

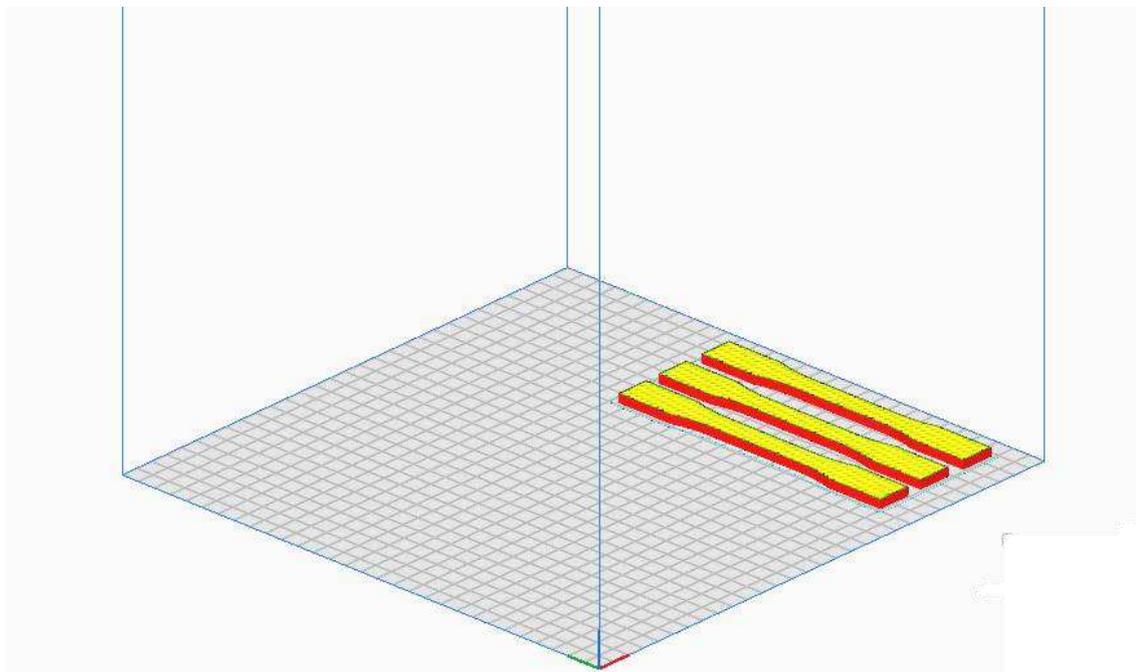


Fonte: Autor (2023).

Após o desenho 3D ser concluído foi preciso exportar o projeto em formato *Standard Template Library* (STL), formato em que o software de processamento de impressão 3D consegue ler, como é o caso do software Ultimaker Cura 5.3 que foi usado nesse trabalho, nele é configurado a impressora e importado o arquivo STL do CP a ser impresso, ajustando depois os parâmetros de impressão para cada arranjo

do ensaio, gerando o arquivo em linguagem G-code, formato padrão das impressoras 3D e salvo em TXT.

Figura 28 - Corpos de provas no Ultimaker Cura 5.3



Fonte: Autor (2023).

3.2.4. Processo de impressão dos CPs

O processo de impressão 3D foi iniciado com a instalação do filamento na impressora, colocou-se o carretel no suporte e foi inserido o filamento no introdutor para depois no display da impressora selecionar a opção de inserir filamento, a partir disso a cabeça de impressão foi aquecida até a temperatura selecionada, seguindo com acionamento do motor que injeta o filamento até que tenha removido todo resíduo restante da cabeça de impressão, finalizado o processo a impressora ficou apta a realizar as impressões.

Possuindo os arquivo de impressão para cada arranjo, pode-se iniciar a impressão, mas antes das impressões foi realizada a limpeza da mesa de impressão e colocado uma fina camada do adesivo fixador na região onde ocorreu a impressão, seguindo com a importação do arquivo no software da impressora e iniciando a impressão, depois disso a impressora começou a aquecer a mesa até 60°C e a cabeça de impressão até 210°C, atingindo as temperatura a mesa começou a subir e inicia o

processo de calibração da mesa em 16 pontos, terminado a cabeça de impressão realizou o processo de purgar o material do bico dando início a impressão.

Figura 29 - Painel da impressora em processo de impressão



Fonte: Autor (2023).

3.2.5. Processo de medição

Após a impressão dos corpos de prova serem concluídas o próximo passo foi realizar as medições de largura e espessura da região estreita do corpo de prova com o paquímetro e mensurando a massa de todos os CPs com a balança de precisão. A Figura 30 apresenta todos os corpos de provas impressos dispostos sobre a mesa, aguardando a realização do ensaio de tração.

Figura 30 - Corpos de prova impressos



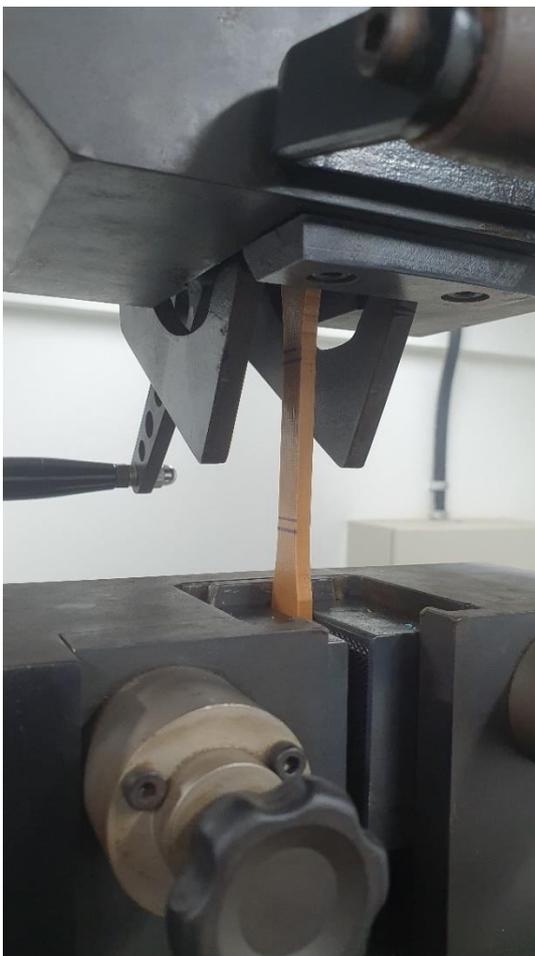
Fonte: Autor (2023).

Aproveitando o processo de medição é realizado a demarcação de linhas nos CPs, essa demarcação fica nas duas regiões mais largas com uma distância entre elas de 115,00 mm, usadas como referência na fixação das garras.

3.2.6. Ensaio de tração

Após os processos anteriores serem concluídos, foi iniciado o processo para a realização do ensaio, primeiramente colocou-se as garras adequadas para fixação dos corpos de provas, seguindo com a fixação dos CPs obedecendo as demarcações de fixação, o ajuste no equipamento com o objetivo de zerar a força antes de iniciar o ensaio, por fim é iniciado o ensaio a uma velocidade de 2 mm/min seguindo a recomendação da norma ASTM D638-14a, após a ruptura do CP o ensaio é concluído e é gerado o arquivo com as informações do ensaio, tempo, deslocamento e força em formato TXT, para serem analisados através de softwares estatísticos, esse processo é repetido até finalizar todos os 54 corpos de provas.

Figura 31 - Fixação do CP na garra



Fonte: Autor (2023).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a conclusão do ensaio, inicia o processo de análise dos dados, para isto usou-se a ferramenta análise de variância conhecida por ANOVA através do Software Minitab, adotando o nível de significância de 5%, apresentando os gráficos de efeito e para os parâmetros com significância o teste de Tukey.

4.1. Análise dimensional dos corpos de provas

A primeira etapa da análise foi verificar se os corpos de provas impressos estariam dentro do limite de tolerância exigido na norma ASTM D638-14a, que faz a seguinte recomendação, a largura de 13,00 mm deve ter uma margem de erro de $\pm 0,5$ mm enquanto a espessura de 5,00 mm uma margem de $\pm 0,4$ mm. Abaixo segue a Tabela 7 com as médias e erros dimensionais respectivamente.

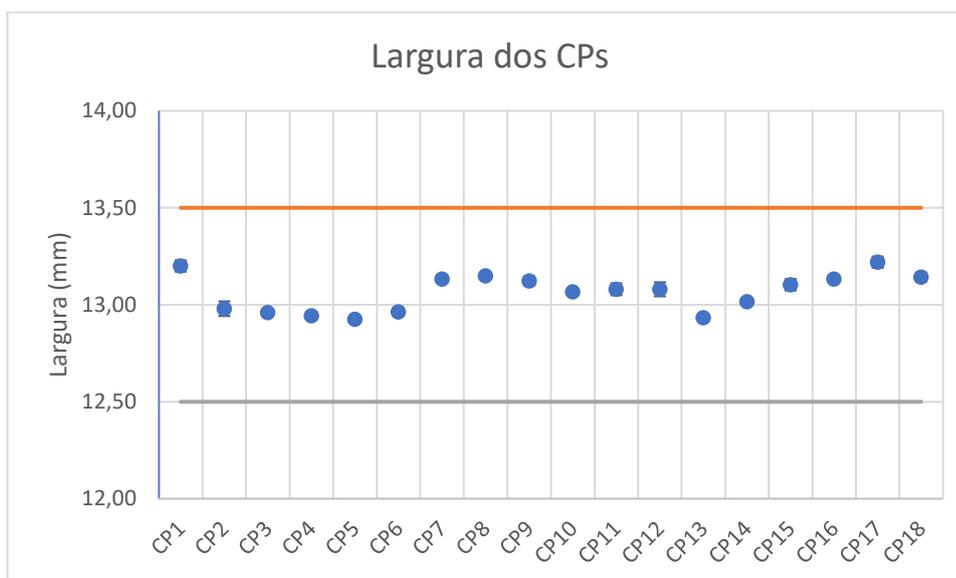
Tabela 7 - Dimensões dos corpos de prova.

ARRANJO	LARGURA (MM)		ESPESSURA (MM)	
	Media	erro \pm	Media	erro \pm
CP1	13,20	0,03	5,32	0,02
CP2	12,98	0,04	5,05	0,02
CP3	12,96	0,02	5,02	0,01
CP4	12,94	0,02	5,10	0,01
CP5	12,93	0,00	5,12	0,00
CP6	12,96	0,02	5,05	0,01
CP7	13,13	0,02	5,12	0,01
CP8	13,15	0,02	5,16	0,01
CP9	13,12	0,02	5,15	0,01
CP10	13,07	0,02	5,27	0,02
CP11	13,08	0,03	5,04	0,01
CP12	13,08	0,04	5,04	0,01
CP13	12,93	0,01	5,10	0,01
CP14	13,02	0,01	5,10	0,01
CP15	13,10	0,03	5,02	0,01
CP16	13,13	0,00	5,14	0,01
CP17	13,22	0,03	5,12	0,01
CP18	13,14	0,02	5,11	0,01

Fonte: Autor (2023).

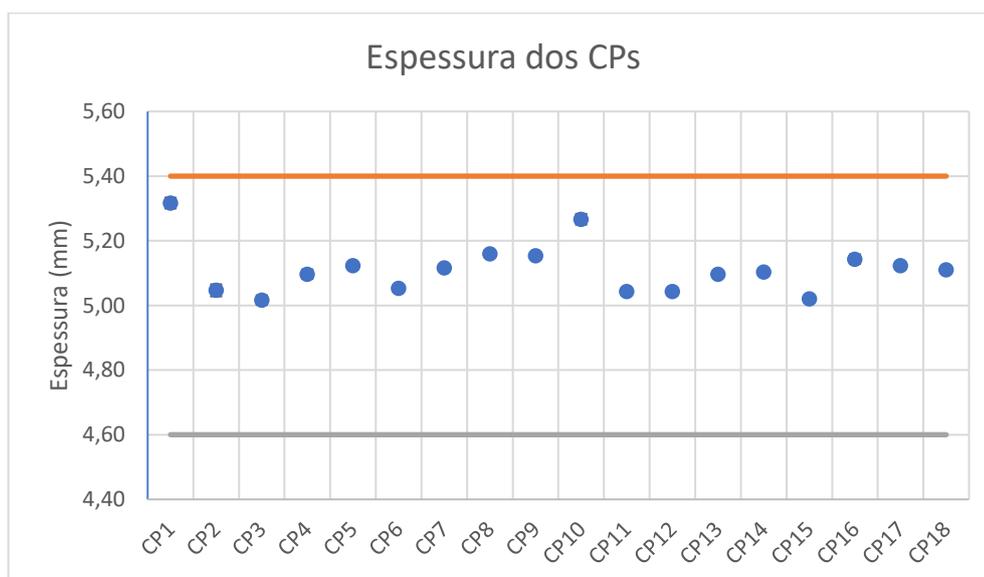
Conforme observado na Figura 32 e Figura 33, todos os arranjos permaneceram dentro do critério de validade dos dados de acordo com a norma, podendo dar prosseguimento com o restante da análise.

Figura 32 - Gráfico dispersão da larguras dos CPs com os limites máximos e mínimos



Fonte: Autor (2023).

Figura 33 - Gráfico em barras da espessura dos CPs com os limites máximos e mínimos



Fonte: Autor (2023).

4.1.1. Massa do corpo de prova

Analisando os resultados da Tabela 8 e da Figura 34 encontrou-se a

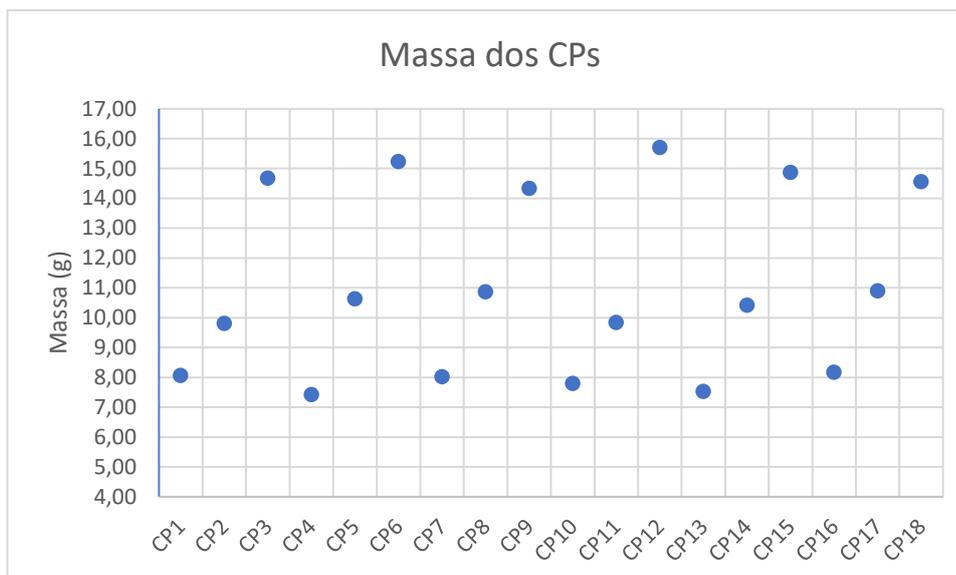
combinação onde se teve o maior valor médio da massa, sendo esse o CP12 onde o tipo de preenchimento foi o de linha, altura da camada 0,12 mm e preenchimento de 100% resultando na massa de 15,71 g, e para a menor valor de massa foi encontrado no CP4 com o tipo de preenchimento giróide, altura da camada 0,20 mm e nível de preenchimento de 20% com o valor de 7,43g, cerca de 111,44% menos em relação ao CP12.

Tabela 8 - Média das massas dos corpos de provas

<i>CP</i>	<i>Padrão de Preenchimento</i>	<i>Altura da camada (mm)</i>	<i>Nível de Preenchimento (%)</i>	<i>Massa Média</i>	<i>Erro ±</i>
<i>CP1</i>	GIROIDE	0,12	20	8,07	0,02
<i>CP2</i>	GIROIDE	0,12	50	9,81	0,05
<i>CP3</i>	GIROIDE	0,12	100	14,69	0,05
<i>CP4</i>	GIROIDE	0,2	20	7,43	0,05
<i>CP5</i>	GIROIDE	0,2	50	10,64	0,00
<i>CP6</i>	GIROIDE	0,2	100	15,24	0,02
<i>CP7</i>	GIROIDE	0,32	20	8,03	0,04
<i>CP8</i>	GIROIDE	0,32	50	10,88	0,03
<i>CP9</i>	GIROIDE	0,32	100	14,34	0,03
<i>CP10</i>	LINHA	0,12	20	7,81	0,02
<i>CP11</i>	LINHA	0,12	50	9,84	0,05
<i>CP12</i>	LINHA	0,12	100	15,71	0,03
<i>CP13</i>	LINHA	0,2	20	7,54	0,02
<i>CP14</i>	LINHA	0,2	50	10,42	0,00
<i>CP15</i>	LINHA	0,2	100	14,88	0,05
<i>CP16</i>	LINHA	0,32	20	8,18	0,02
<i>CP17</i>	LINHA	0,32	50	10,90	0,05
<i>CP18</i>	LINHA	0,32	100	14,57	0,04

Fonte: Autor (2023).

Figura 34 - Gráfico dispersão da massa dos CPs



Fonte: Autor (2023).

Para determinar quais dos parâmetros de estudo tem significância sobre a influência no valor da massa, será realizado a análise de variância, com nível de significância de 5%.

4.1.1.1. Análise de Variância do nível preenchimento sobre a massa

A Tabela 9 apresenta os dados da análise de variância para o nível de preenchimento sobre a massa.

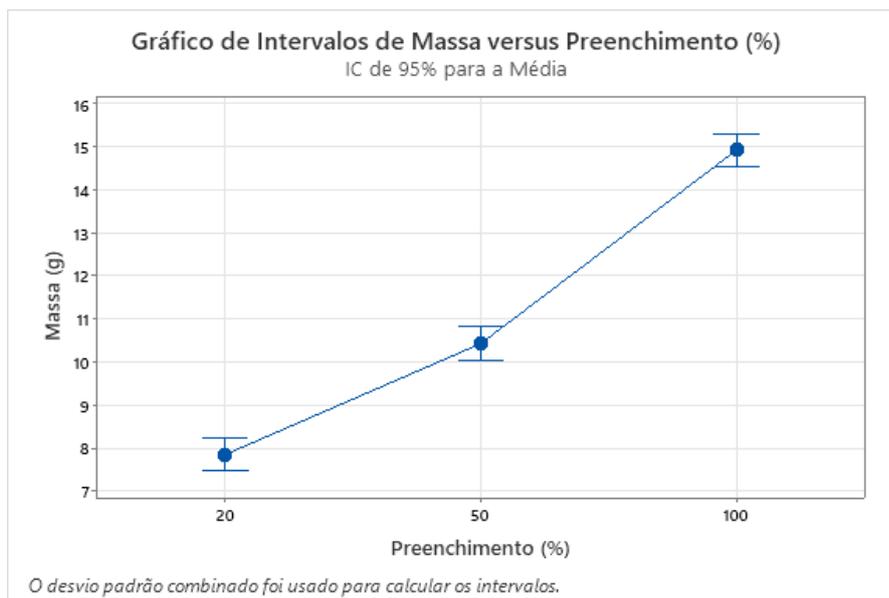
Tabela 9 - ANOVA do nível de preenchimento sobre a massa

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Preenchimento (%)	2	153,208	76,6040	397,20	0,000
Erro	15	2,893	0,1929		
Total	17	156,101			

Fonte: Autor (2023).

Analisando o resultado da ANOVA pela Tabela 9 é possível determinar que com o valor de $P = 0,000 < 0,05$ e $F = 397,20 > 1$, rejeita a hipótese H_0 , provando estatisticamente que em que pelo menos uma das médias apresentaram diferenças significativas sobre os valores médios encontrados da massa seguindo com o teste de Tukey, que avalia quais dos níveis dos parâmetros tem significância.

Figura 35 - Gráfico efeito do nível de preenchimento sobre a massa



Fonte: Autor (2023).

Através dos resultados do teste de Tukey apresentados na Tabela 10 e Tabela 11 é possível determinar ao nível de significância de 5%, que a média de todos os níveis de preenchimento apresentam diferença significativa para o resultado da massa, portanto o nível de preenchimento de 20, 50 e 100% são significativamente diferentes no quesito no valor da massa dos corpos de provas.

Tabela 10 - Agrupamento pelo método de Tukey 95% confiança

Preenchimento (%)	N	Média	Agrupamento
100	6	14,903	A
50	6	10,418	B
20	6	7,842	C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 11 - Testes Simultâneos de Tukey para Diferenças de Médias

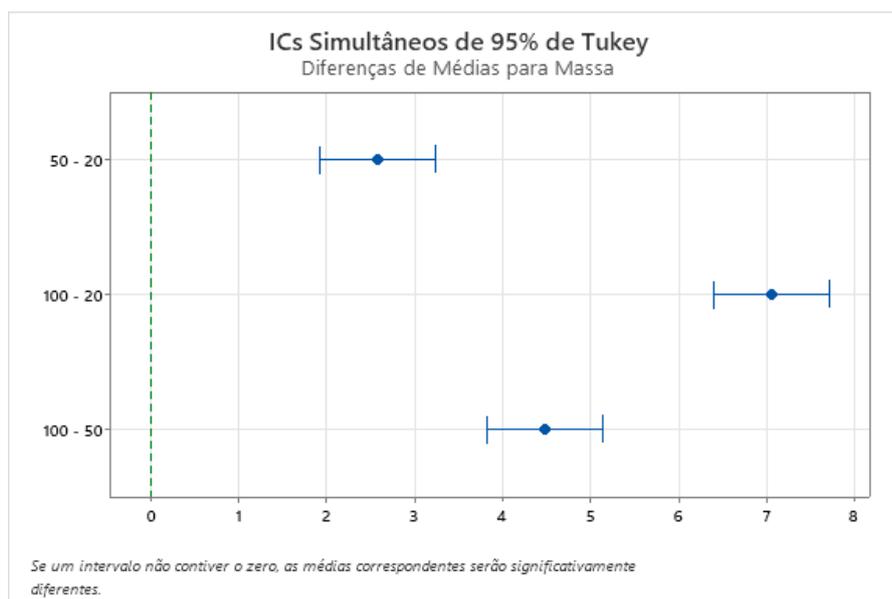
Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
50 - 20	2,576	0,254	(1,918; 3,234)	10,16	0,000
100 - 20	7,061	0,254	(6,403; 7,719)	27,85	0,000
100 - 50	4,485	0,254	(3,827; 5,143)	17,69	0,000

Nível de confiança individual = 97,97%

Fonte: Autor (2023).

A Figura 36 apresenta o gráfico com a diferença das médias das massas para o nível de preenchimento, comparando de duas a duas as diferenças médias, onde para nenhuma das comparações dos níveis de preenchimento o intervalo de confiança não obteve o zero, portanto todos os níveis de preenchimento são significativamente diferentes.

Figura 36 - Gráfico diferença de médias para massa em IC de 95% Tukey.



Fonte: Autor (2023).

Com base no que foi analisado estatisticamente temos que o nível de preenchimento é o principal fator que influencia na massa do objeto, visto que com o aumento do nível de preenchimento, reduz espaços vazios internamente e aumenta sua densidade, resultando no aumento de massa, resultado esse confirmando o que foi observado por Campos (2022) e Sousa (2022).

4.1.1.2. Análise de Variância da altura da camada sobre a massa

Para a análise da influência da altura da camada sobre a massa, é verificado pela Tabela 12 que ela não representa influência, visto que pela análise variância o valor de $P \gg 0,05$ resultando na hipótese H_0 verdadeira, onde diz que não há diferença entre as médias dos níveis da altura de camada.

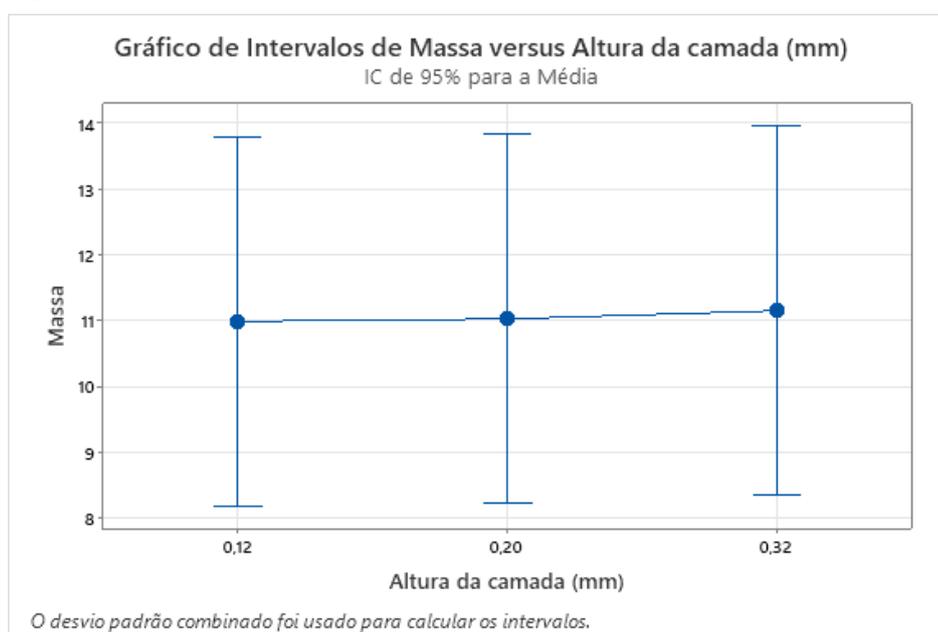
Tabela 12 - ANOVA da altura da camada sobre a massa

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Altura da camada (mm)	2	0,086	0,0430	0,00	0,996
Erro	15	156,015	10,4010		
Total	17	156,101			

Fonte: Autor (2023).

Analisando a Figura 37 do gráfico de efeito fica evidente que o resultado da análise de variância está correto, mostrando que as medias entre as alturas das camadas em todos os níveis são muito próximos, não gerando influencias significativas sobre o valor da massa.

Figura 37 - Gráfico efeito da altura da camada sobre a massa



Fonte: Autor (2023).

4.1.1.3. Análise de Variância do tipo de preenchimento sobre a massa

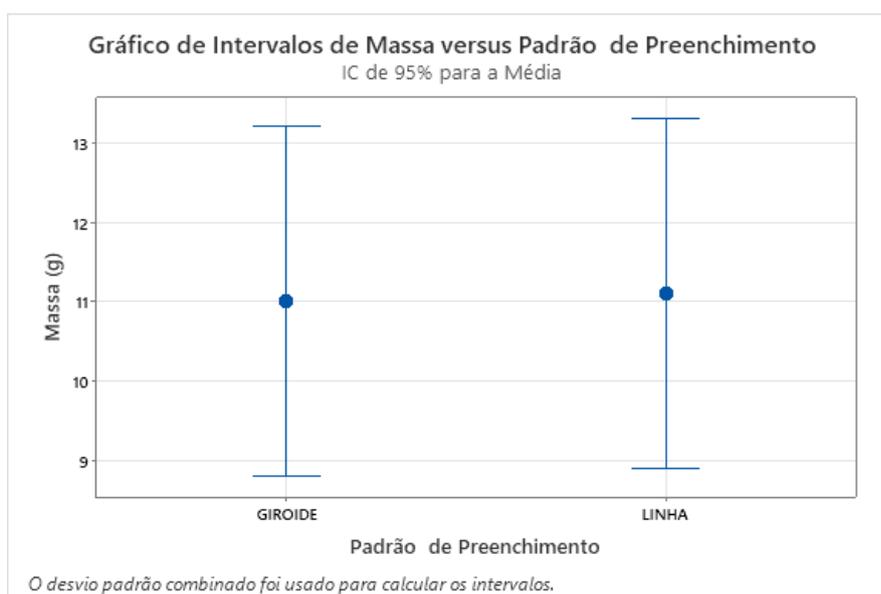
Observando a Tabela 13 e Figura 38, é constatado que o tipo de preenchimento não apresentou nenhuma influência significativa sobre a massa, apresentando médias muito próximas e o valor calculado de $P = 0,957 >> 0,05$.

Tabela 13 - ANOVA do tipo de preenchimento sobre a massa

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Padrão de Preenchimento	1	0,029	0,02901	0,00	0,957
Erro	16	156,072	9,75449		
Total	17	156,101			

Fonte: Autor (2023).

Figura 38 - Gráfico efeito do tipo de preenchimento sobre a massa



Fonte: Autor (2023).

4.1.2. Tempo de impressão

Através da Tabela 14 e Figura 39 é possível determinar que o arranjo CP12 foi que teve o maior tempo de impressão dentre todas as combinações estudadas, com tipo de preenchimento em linha, 100% do preenchimento e altura da camada de 0,12 mm, resultou em um tempo de 325,67 minutos para ser impresso. Para o menor tempo de impressão encontramos a combinação CP16, onde o tipo de preenchimento é em linha, 20% do preenchimento e altura da camada em 0,32 mm, lavando o tempo de impressão de 84,15 minutos para ser concluída.

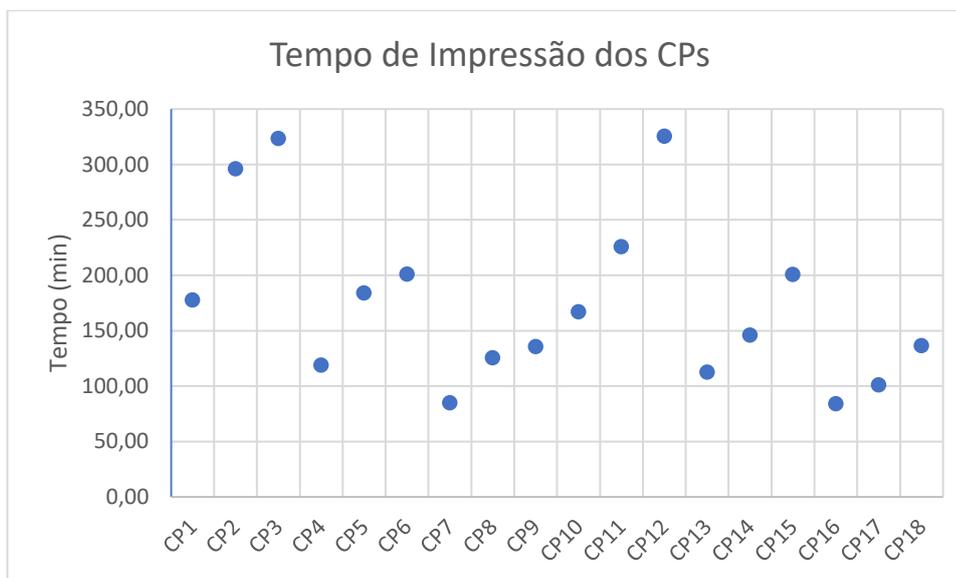
Tabela 14 - Tempo de impressão dos corpos de provas

CP	Padrão de Preenchimento	Altura da camada (mm)	Nível de Preenchimento (%)	Tempo de impressão (min)
CP1	GIROIDE	0,12	20	177,68

CP2	GIROIDE	0,12	50	296,08
CP3	GIROIDE	0,12	100	323,50
CP4	GIROIDE	0,2	20	119,12
CP5	GIROIDE	0,2	50	184,05
CP6	GIROIDE	0,2	100	201,30
CP7	GIROIDE	0,32	20	85,03
CP8	GIROIDE	0,32	50	125,67
CP9	GIROIDE	0,32	100	135,90
CP10	LINHA	0,12	20	167,17
CP11	LINHA	0,12	50	225,88
CP12	LINHA	0,12	100	325,67
CP13	LINHA	0,2	20	112,73
CP14	LINHA	0,2	50	146,03
CP15	LINHA	0,2	100	200,82
CP16	LINHA	0,32	20	84,15
CP17	LINHA	0,32	50	101,15
CP18	LINHA	0,32	100	136,57

Fonte: Autor (2023).

Figura 39 - Gráfico dispersão do tempo de impressão dos corpos de provas



Fonte: Autor (2023).

Por meio da análise de variância é possível determinar a influência que os parâmetros de impressão exercem sobre o tempo de impressão dos corpos de provas.

4.1.2.1. Análise de Variância do nível de preenchimento sobre o tempo de impressão

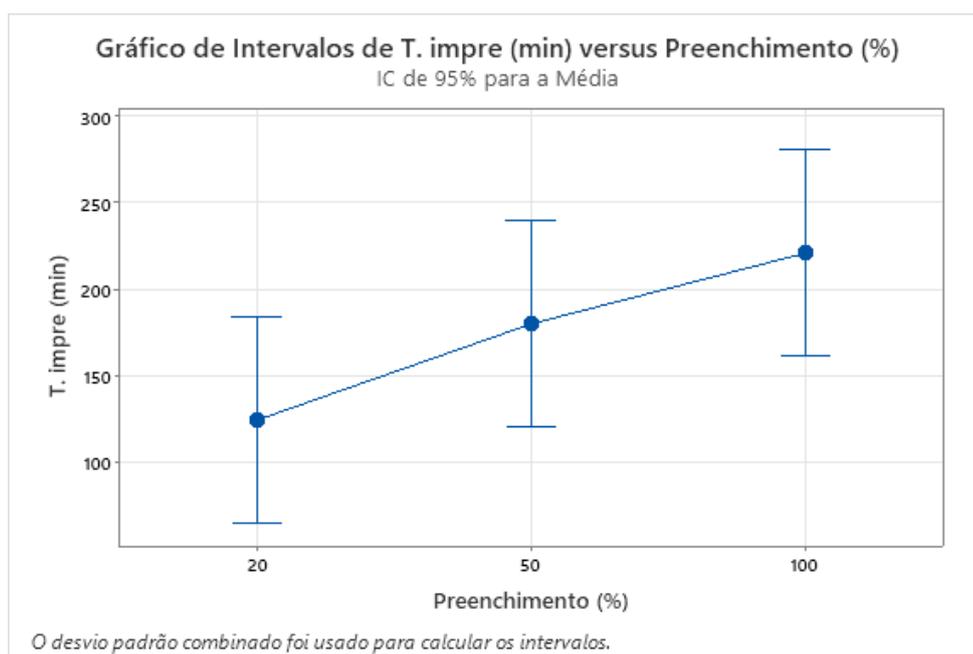
A Tabela 15 apresenta os dados da análise de variância para o nível de preenchimento sobre o tempo de impressão.

Tabela 15 - ANOVA do nível de preenchimento sobre o tempo de impressão

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Preenchimento (%)	2	28043	14022	2,98	0,081
Erro	15	70549	4703		
Total	17	98592			

Fonte: Autor (2023).

Figura 40 - Gráfico efeito do nível de preenchimento sobre o tempo de preenchimento



Fonte: Autor (2023).

Embora o resultado da Anova afirme que o nível de preenchimento não exerça influência significativa sobre o tempo de impressão com valor de $P = 0,081 > 0,05$ ao nível de significância de 5%. O que é apresentado na Figura 40 mostra um comportamento que onde com o aumento do nível de preenchimento o tempo de impressão cresce, visto que a quantidade de filamento depositada sobre camada a camada aumenta, resultando em um tempo maior para completar cada camada, demorando mais para a peça ser concluída.

4.1.2.2. Análise de Variância da altura da camada sobre o tempo de impressão

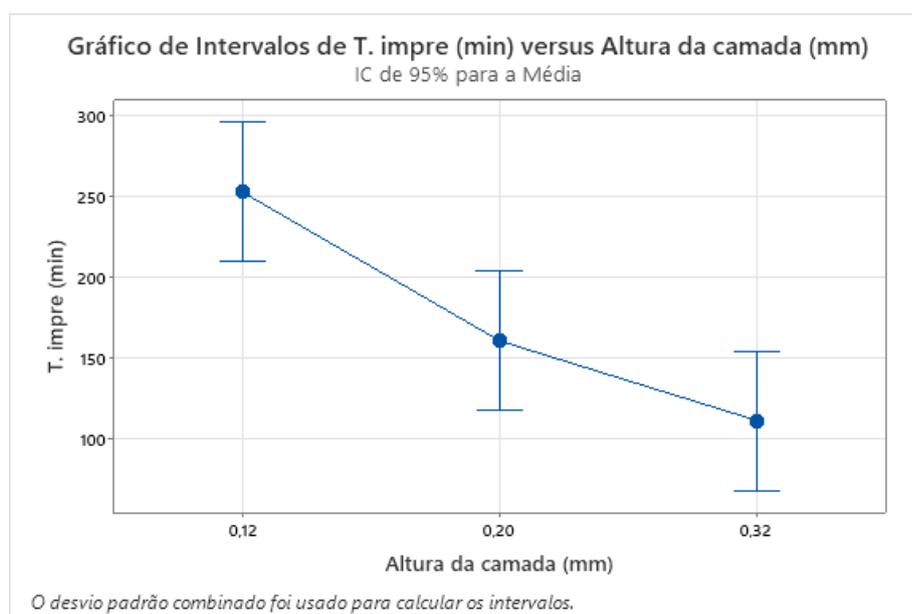
A Tabela 16 apresenta os dados da análise de variância para altura da camada sobre o tempo de impressão.

Tabela 16 - ANOVA da altura da camada sobre o tempo de impressão

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Altura da camada (mm)	2	61682	30841	12,53	0,001
Erro	15	36909	2461		
Total	17	98592			

Fonte: Autor (2023).

Figura 41 Gráfico efeito da altura da camada sobre o tempo de impressão



Fonte: Autor (2023).

A altura da camada é de longe o parâmetro que apresentou maior influência no tempo de impressão, na análise de variância o resultado obtido foi de $P = 0,001 \ll 0,05$ e um $F = 12,53 > 1$, rejeitando a hipótese H_0 e definindo como o parâmetro de maior influência, o parâmetro tem uma relação inversa ao tempo de impressão, pois ao diminuir a altura, aumenta-se a quantidade de camadas a ser impressa, sabendo que a espessura da peça é a mesma, a impressora precisou realizar mais movimentos para concluir o CP, resultando no tempo final.

Analisando o teste de Tukey apresentado na Tabela 17 e Tabela 18, é observado que as médias dos níveis de alturas das camadas de 0,20 e 0,32 apresentaram diferenças entre elas menos significantes estatisticamente com relação a 0,12 mm.

Tabela 17 - Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Altura da camada (mm)	N	Média	Agrupamento
0,12	6	252,7	A
0,20	6	160,7	B
0,32	6	111,41	B

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.
Fonte: Autor (2023).

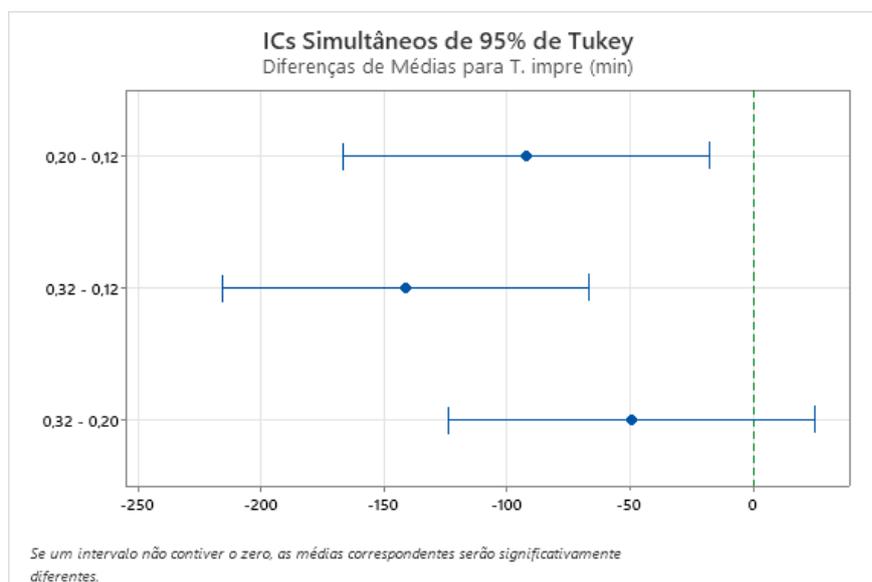
Tabela 18 - Testes Simultâneos de Tukey para Diferenças de Médias

Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
0,20 - 0,12	-92,0	28,6	(-166,3; -17,7)	-3,21	0,015
0,32 - 0,12	-141,3	28,6	(-215,6; -66,9)	-4,93	0,001
0,32 - 0,20	-49,3	28,6	(-123,6; 25,1)	-1,72	0,230

Nível de confiança individual = 97,97%
Fonte: Autor (2023).

A Figura 42 apresenta o gráfico de comparações das diferenças das médias do tempo de impressão para os níveis de alturas de camadas, sendo comparadas de dois níveis, onde o intervalo de confiança caso contenha o valor zero elas não são significativamente diferentes, conforme é visto na comparação de 0,32 e 0,20mm.

Figura 42 - Gráfico diferença de médias para tempo de impressão em IC de 95% Tukey



Fonte: Autor (2023).

4.1.2.3. Análise de Variância do tipo de preenchimento sobre o tempo de impressão

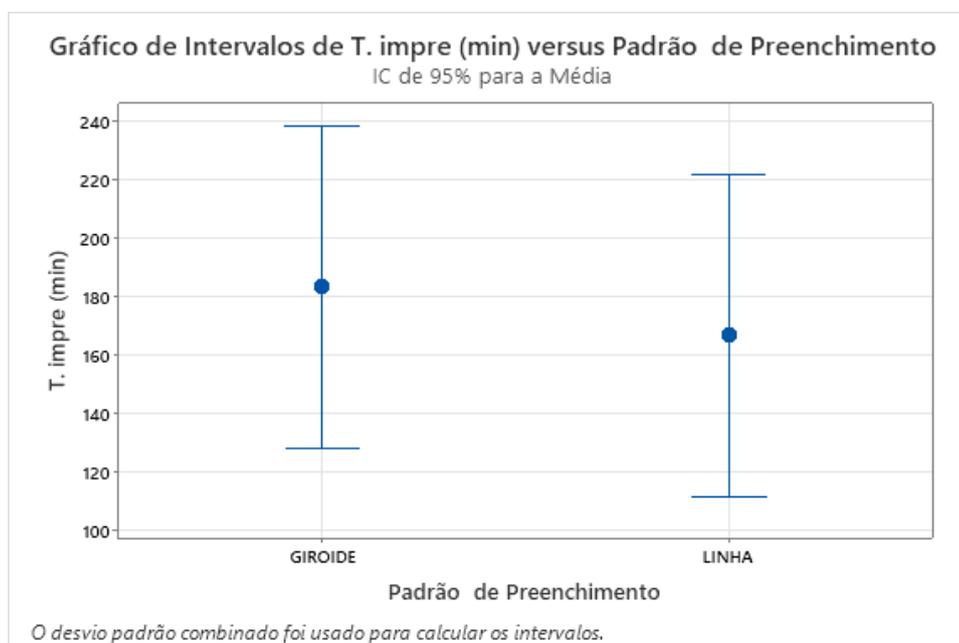
A Tabela 19 apresenta os dados da análise de variância para o tipo de preenchimento sobre o tempo de impressão.

Tabela 19 - ANOVA do tipo de preenchimento sobre o tempo de impressão

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Padrão de Preenchimento	1	1220	1220	0,20	0,660
Erro	16	97372	6086		
Total	17	98592			

Fonte: Autor (2023).

Figura 43 - Gráfico efeito do tipo de preenchimento sobre o tempo de impressão



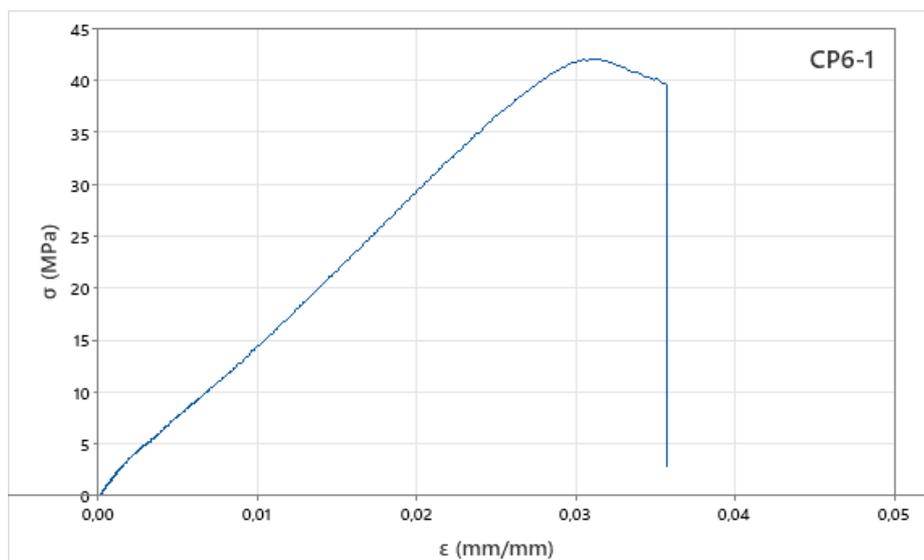
Fonte: Autor (2023).

Analisando o tipo de preenchimento é verificado que ela não apresenta diferenças significativas ao tempo de impressão pois o valor de $P = 0,66 \gg 0,05$. Observando a Figura 43, tem-se que o padrão de preenchimento giróide teve uma média um pouco superior ao tempo de impressão com relação ao padrão em linhas, isto se dá segundo Campos (2022), pelo fato da giróide ser um formato mais complexo e necessitar que a impressora execute movimentos com alternâncias de sentido, fazendo com que a impressora execute maiores percursos em relação a linha, causando essa pequena diferença mas não significativa.

4.2. Análise do ensaio de tração

Conhecendo o comportamento dos polímeros conforme mostrado na Figura 14, temos na Figura 44 o gráfico tensão x deformação de um dos corpos de provas ensaiados, a partir dele é possível ver a presença da zona elástica, passando pela tensão de máxima e seguindo com a ruptura, dessa forma o comportamento do corpo de prova em PLA apresentou um comportamento típico de polímero frágil.

Figura 44 - Tensão x deformação do corpo de prova



Fonte: Autor (2023).

4.2.1. Ruptura dos corpos de provas

Analisando os corpos de prova após o ensaio de tração (Figura 45 e Figura 46) podemos verificar que existe um padrão nas fraturas, estes se localizam próximo ao raio de alargamento, podendo ser explicado pela presença de concentradores de tensão presente na região, sendo uma característica do processo FDM. (SOUSA, 2022, apud MASSOD, 2010)

Figura 45 - Corpos de provas 1 a 9 após o ensaio



Fonte: Autor (2023).

Figura 46 - Corpos de provas 10 a 18 após o ensaio



Fonte: Autor (2023).

4.2.2. Limite de resistência à tração

A partir do ensaio de tração dos corpos de provas, foi possível extrair os dados de força e deslocamento no decorrer do ensaio, com essas informações foi possível determinar LRT e o intervalo de confiança de cada arranjo proposto ao

experimento, representados na Tabela 20.

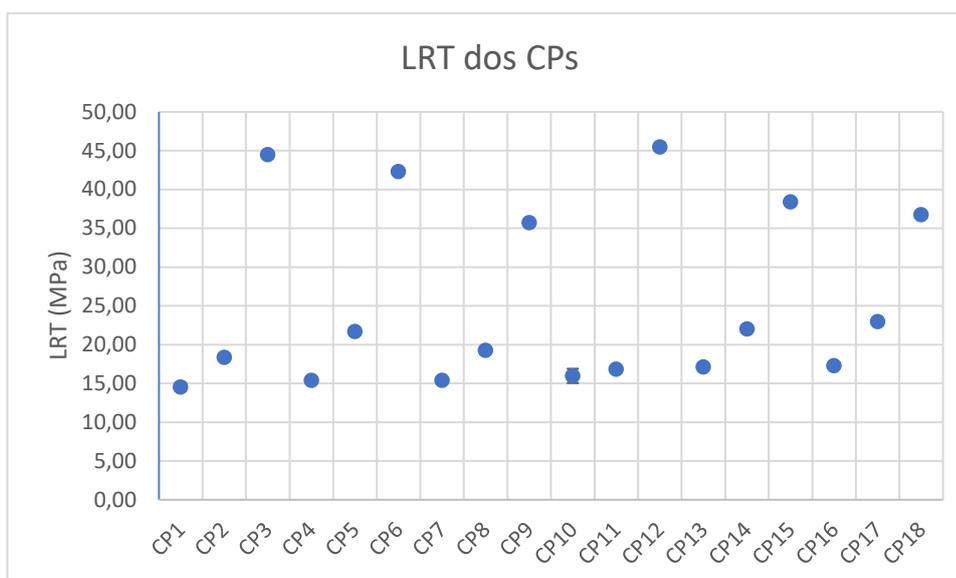
Tabela 20 - Matriz resultado LRT

Arranjo	Padrão de Preenchimento	Altura da camada (mm)	Preenchimento (%)	LRT (Mpa)	
				Média	Erro \pm
CP1	GIROIDE	0,12	20	15,50	0,45
CP2	GIROIDE	0,12	50	18,40	0,13
CP3	GIROIDE	0,12	100	44,53	0,31
CP4	GIROIDE	0,2	20	15,42	0,36
CP5	GIROIDE	0,2	50	21,73	0,04
CP6	GIROIDE	0,2	100	42,31	0,40
CP7	GIROIDE	0,32	20	15,41	0,08
CP8	GIROIDE	0,32	50	19,27	0,18
CP9	GIROIDE	0,32	100	35,73	0,18
CP10	LINHA	0,12	20	15,97	0,92
CP11	LINHA	0,12	50	16,87	0,28
CP12	LINHA	0,12	100	45,51	0,52
CP13	LINHA	0,2	20	17,14	0,19
CP14	LINHA	0,2	50	22,04	0,19
CP15	LINHA	0,2	100	38,42	0,41
CP16	LINHA	0,32	20	17,32	0,34
CP17	LINHA	0,32	50	22,97	0,14
CP18	LINHA	0,32	100	36,78	0,47

Fonte: Autor (2023).

Analisando a Tabela 20 e Figura 47, é visto que a combinação onde se teve o maior valor de LRT foi o CP12 onde o padrão de preenchimento é em linha, com altura de camada de 0,12 mm e nível de preenchimento 100%, obtendo um LRT médio de 45,51 Mpa, enquanto que o menor LRT foi obtido pela combinação CP7, na qual apresenta o padrão de preenchimento giróide, altura de camada 0,32 mm e 20% do nível de preenchimento, obtendo o LRT médio de 15,41 Mpa.

Figura 47 - Gráfico dispersão do LRT dos CPs



Fonte: Autor (2023).

4.2.2.1. Análise de variância do nível de preenchimento sobre o LRT

Como forma de comprovar as observações foi realizado a análise de variância sobre os parâmetros de estudo para definir se o parâmetro em questão possui influência significativa no resultado do LRT.

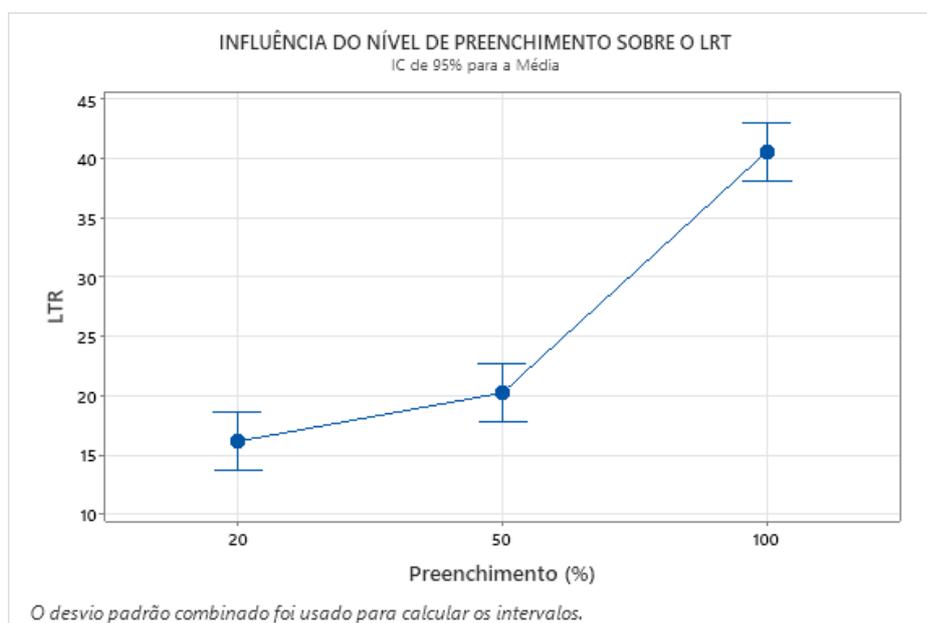
Tabela 21 - Análise de variância sobre o efeito do nível de preenchimento tem na LRT

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Preenchimento (%)	2	2052,9	1026,44	130,53	0,000
Erro	15	118,0	7,86		
Total	17	2170,8			

Fonte: Autor (2023).

Analisando a Tabela 21 com o resultado da ANOVA do nível de preenchimento conseguimos obter no teste de variância um $P = 0,000 \ll 0,05$ e $F = 130,53 > 1$, esse resultado afirma estatisticamente que o nível de preenchimento tem relevância sobre o resultado do LRT.

Figura 48 - Efeito do nível de preenchimento sobre o LRT



Fonte: Autor (2023).

Com base na Figura 48, vemos com mais clareza a influência que o nível de preenchimento tem sobre o LRT, no gráfico é apresentado as médias de LRT nos pontos azuis e a barra vertical o intervalo de confiança de 0,95 para 20 ,50 e 100% do nível de preenchimento respectivamente, mostrando que quanto maior a densidade de preenchimento do corpo de prova maior será a resistência a tração.

Analisando a Figura 48, tem-se que de 20 a 50% há um aumento médio no valor de LRT de 25,34% enquanto de 50 a 100% o aumento foi de cerca de 100%, corroborando o que Ambrós (2019) e Fernandes (2016) obteve como resultado, onde o aumento da densidade resulta em melhores propriedades mecânicas.

A análise de variância permite em afirmar se o parâmetro em questão apresenta relevância ao nível significância pré-estabelecido, mas não mostra quais dos níveis dos parâmetros são significativamente diferentes, para descobrir foi realizado o teste de Tukey, após o parâmetro ser estatisticamente relevante.

As Tabela 22 e Tabela 23 apresentam o teste de Tukey para o nível de preenchimento em relação ao LRT.

Tabela 22 - Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Preenchimento (%)	N	Média	Agrupamento
100	6	40,55	A
50	6	20,212	B
20	6	16,126	B

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 23 - Testes Simultâneos de Tukey para Diferenças de Médias

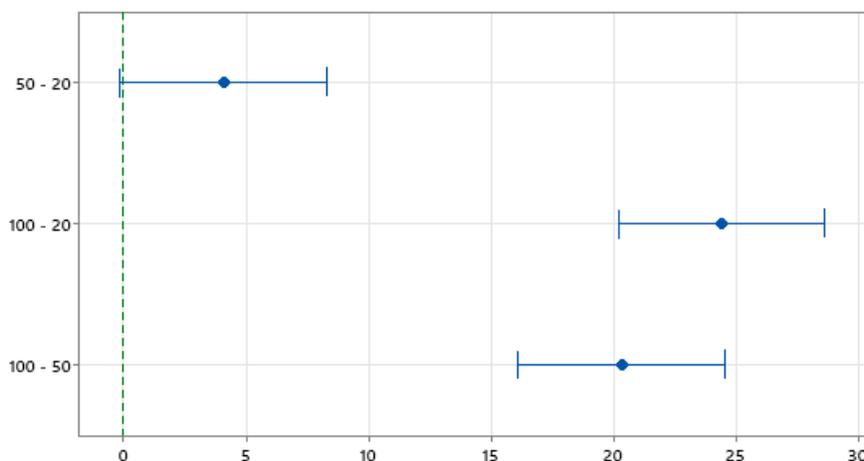
Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
50 - 20	4,09	1,62	(-0,11; 8,29)	2,52	0,057
100 - 20	24,42	1,62	(20,22; 28,62)	15,08	0,000
100 - 50	20,33	1,62	(16,13; 24,53)	12,56	0,000

Nível de confiança individual = 97,97%

Fonte: Autor (2023).

O teste de Tukey nos revela ao nível de significância de 5%, que as médias dos níveis de 20 e 50% não apresentam diferenças significantes entre elas, em contra partida a média do tratamento 100% apresenta diferença significativa com relação a todos os níveis.

Figura 49 - Gráfico diferença de médias para LRT em IC de 95% Tukey.



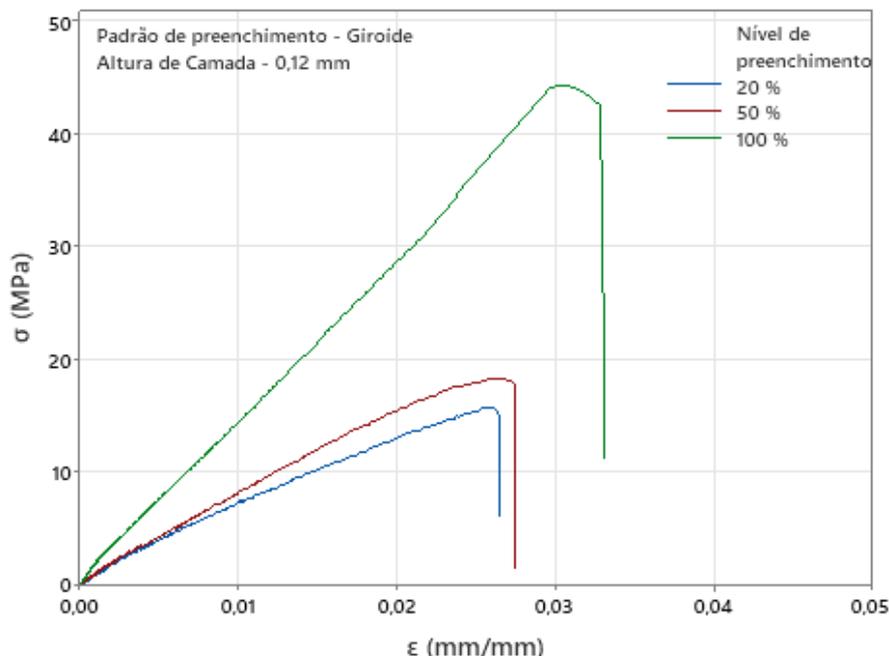
Se um intervalo não contiver o zero, as médias correspondentes serão significativamente diferentes.

Fonte: Autor (2023).

Com base nos resultados do teste de Tukey, podemos afirmar que os níveis de preenchimento de 20 e 50% comparando entre si, não apresenta diferença

estatisticamente significativa ao LRT, mas comparando o nível de preenchimento de 100% com os demais tem uma grande diferença conforme está ilustrado na Figura 49.

Figura 50 - Gráfico Tensão-Deformação variando o nível de preenchimento



Fonte: Autor (2023).

A Figura 50 contendo a curva tensão x deformação para cada nível de preenchimento, ilustra bem a influência do nível de preenchimento sobre o LRT onde com o aumento da densidade de preenchimento, teve um aumento na tensão de ruptura e alongamento, ficando evidente tamanha diferença do LRT com o 100% de preenchimento comparada aos demais.

4.2.2.2. Análise de variância da altura da camada sobre LRT

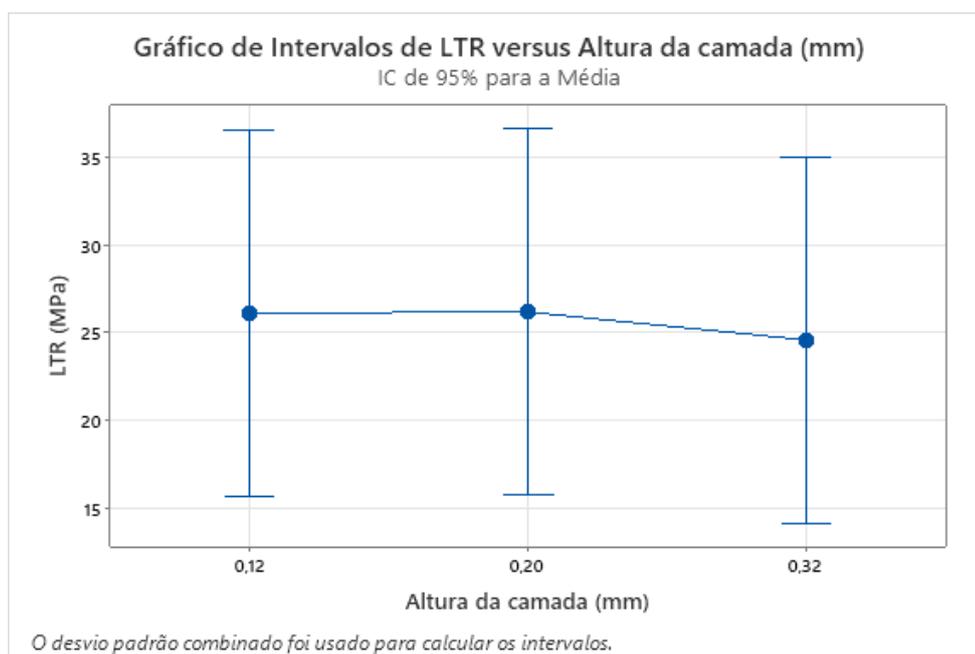
Analisando os efeitos da altura da camada sobre o LRT através do ANOVA (Tabela 24), é verificado que esse parâmetro não apresenta significância sobre o resultado do LRT, apresentando um valor $P = 0,966 \gg 0,05$.

Tabela 24 - Análise de variância sobre o efeito da altura da camada tem na LRT

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Altura da camada (mm)	2	9,88	4,942	0,03	0,966
Erro	15	2160,94	144,063		
Total	17	2170,83			

Fonte: Autor (2023).

Figura 51 - Efeito da altura da camada sobre o LRT

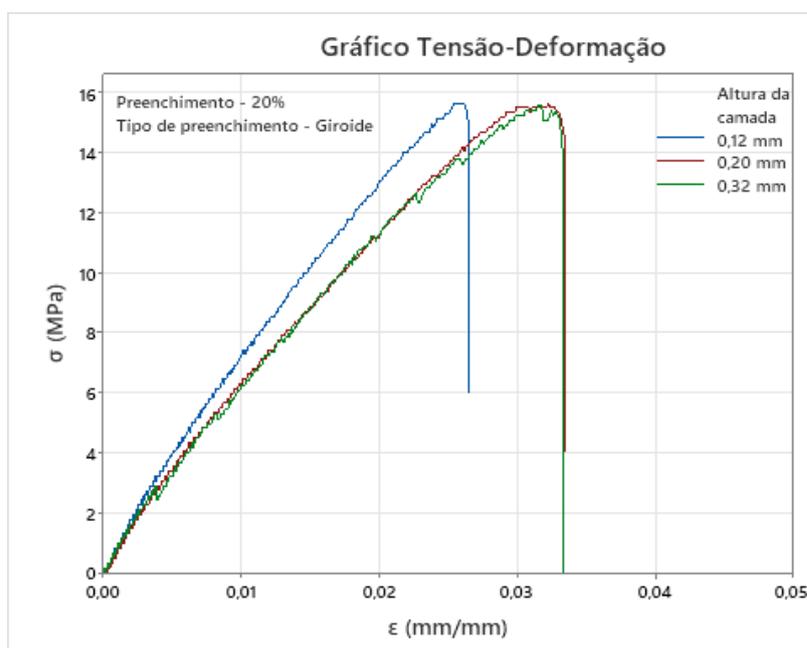


Fonte: Autor (2023).

Através da Figura 51 é observado que a variação do LRT para as alturas de camadas 0,12, 0,20 e 0,32, estão dentro de um mesmo intervalo com médias muito próximas, no entanto apresentou grande dispersão dentro dos níveis de alturas de camadas por conta das grandes variações do LRT causadas pelas variações dos níveis de preenchimento, onde apresentou o maior nível de significância, reduzindo drasticamente uma possível influência da altura de camada sobre o resultado do LRT.

Para Fernandes (2016) e Sousa (2022), uma altura de camada menor resulta na formação do filamento extrusado com formato achatado, isso faz com que a camada nova esteja mais comprimida contra a camada anterior, aumentando a área de contato entre elas fortalecendo a ligação e melhorando o desempenho à resistência a tração. No entanto, diferente do que foi observado pelos autores citados, para Ambrós (2019), os limites de resistência a tração foram superiores para maiores alturas de camadas.

Figura 52 - Gráficos tensão - deformação das alturas da camadas



Fonte: Autor (2023).

Comparando o comportamento apresentado nas Figura 51 e Figura 52 com as observações de Fernandes (2016) e Sousa (2022), o resultado diverge ao que foi discutido, pois os limites de resistência a tração não sofreram influências com a variação da altura da camada, podendo ser explicada por falhas do processo de impressão FDM e pela falta de repetibilidade de ensaio devido ao tempo e recursos disponíveis.

4.2.2.3. Análise de variância do tipo de preenchimento sobre LRT

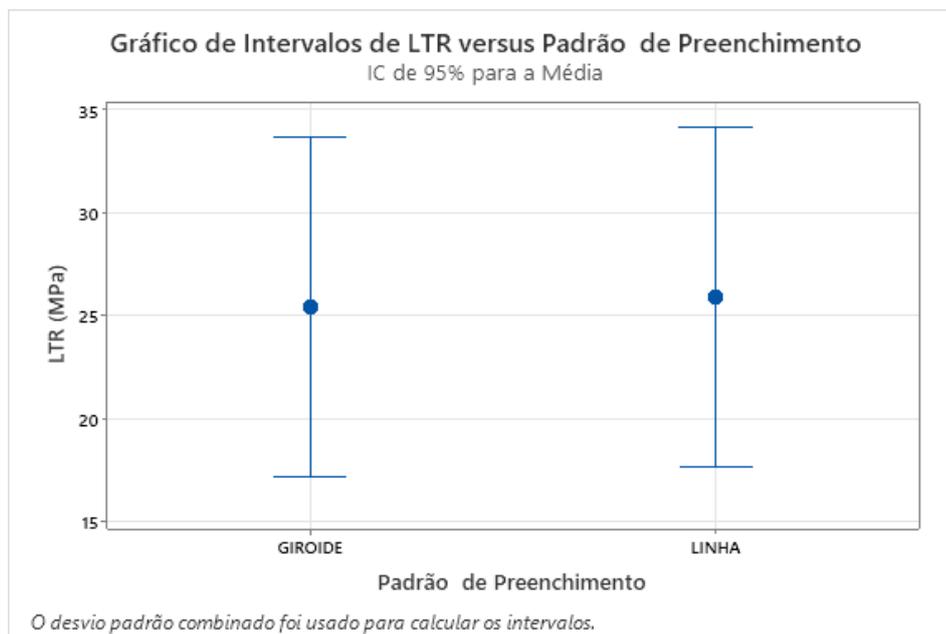
Analisando o tipo de preenchimento temos a mesma conclusão da altura de camada, onde nenhum dos tipos de preenchimento apresentam diferenças significativas com relação ao LRT a partir de análise de variância onde o $F = 0,01 < 1$ e $P = 0,925 > 0,05$ mostrado na Tabela 25.

Tabela 25 – Análise de variância sobre o efeito do tipo de preenchimento tem na LRT

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Padrão de Preenchimento	1	1,24	1,238	0,01	0,925
Erro	16	2169,59	135,599		
Total	17	2170,83			

Fonte: Autor (2023).

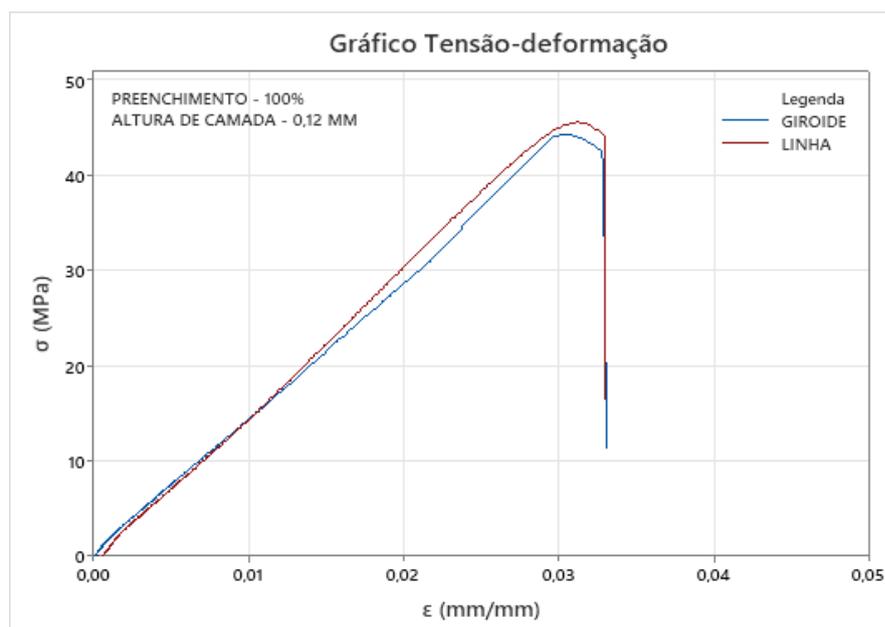
Figura 53 - Efeito da tipo de preenchimento sobre o LRT



Fonte: Autor (2023).

A Figura 53 apresenta um leve aumento na média do LRT do tipo de preenchimento em linha comparado à giróide, no entanto não é o suficiente para ser significativo no resultado do ANOVA. A Figura 54 apresenta a curva da tensão x deformação para os tipos de preenchimentos.

Figura 54 - Gráfico tensão - deformação do tipo de preenchimento



Fonte: Autor (2023).

O gráfico de tensão deformação da Figura 54 apresentou para ambos tipos

de preenchimento regiões elásticas muito semelhantes, com pequena diferença no LRT, tendo o tipo de linha um desempenho pouco superior, apresentando o mesmo alongamento de ruptura, portanto não há diferença significativa no tipo de preenchimento linha e giróide que afetasse o LRT.

4.2.3. Alongamento máximo de ruptura

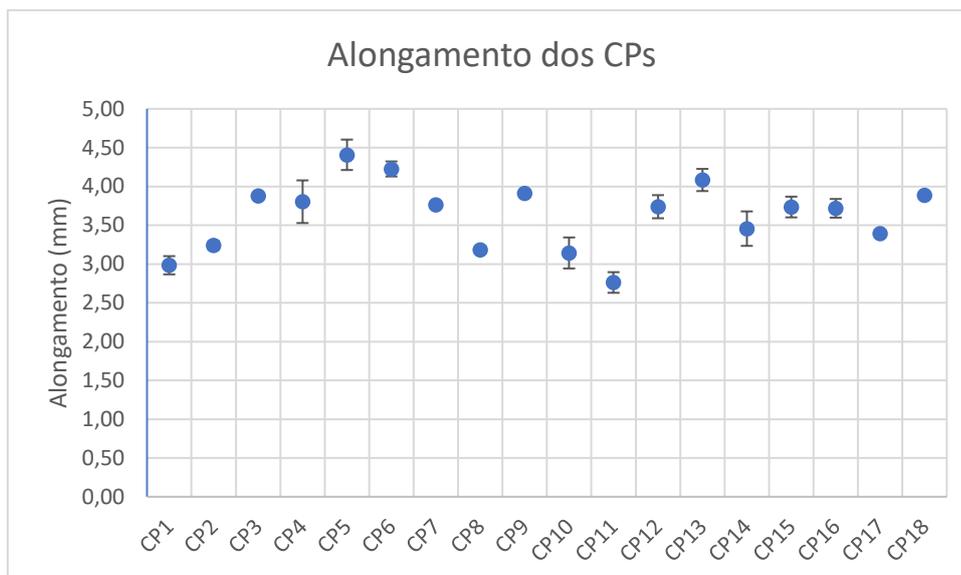
Durante o ensaio de tração é registrado o deslocamento axial até o momento de ruptura do CP sendo representada na Tabela 26, que contém os valores médios dos alongamentos e erro de cada combinação da matriz experimental dos corpos de provas.

Tabela 26 - Alongamento máximo experimental

CP	Padrão de Preenchimento	Altura da camada (mm)	Nível de Preenchimento (%)	Alongamento Máximo (mm)	
				Média	Erro \pm
CP1	GIROIDE	0,12	20	2,98	0,12
CP2	GIROIDE	0,12	50	3,24	0,06
CP3	GIROIDE	0,12	100	3,88	0,04
CP4	GIROIDE	0,2	20	3,80	0,28
CP5	GIROIDE	0,2	50	4,04	0,02
CP6	GIROIDE	0,2	100	4,23	0,10
CP7	GIROIDE	0,32	20	3,76	0,04
CP8	GIROIDE	0,32	50	3,18	0,05
CP9	GIROIDE	0,32	100	3,91	0,05
CP10	LINHA	0,12	20	3,14	0,20
CP11	LINHA	0,12	50	2,76	0,13
CP12	LINHA	0,12	100	3,74	0,15
CP13	LINHA	0,2	20	4,08	0,14
CP14	LINHA	0,2	50	3,46	0,22
CP15	LINHA	0,2	100	3,73	0,13
CP16	LINHA	0,32	20	3,72	0,12
CP17	LINHA	0,32	50	3,39	0,02
CP18	LINHA	0,32	100	3,89	0,00

Fonte: Autor (2023).

Figura 55 - Gráfico dispersão do alongamento dos CPs



Fonte: Autor (2023).

Avaliando o resultado da Tabela 26 e

Figura 55 a combinação que obteve o maior alongamento foi o CP6, do tipo de preenchimento giróide, altura de camada 0,2 mm e preenchimento de 100%, apresentando o valor médio de 4,23 mm, em contrapartida o menor alongamento aconteceu no CP11 com o tipo de preenchimento linha, altura de camada 0,12mm e 50% de preenchimento, com o valor médio de 2,76 mm.

4.2.3.1. Análise de Variância do nível de preenchimento sobre o alongamento

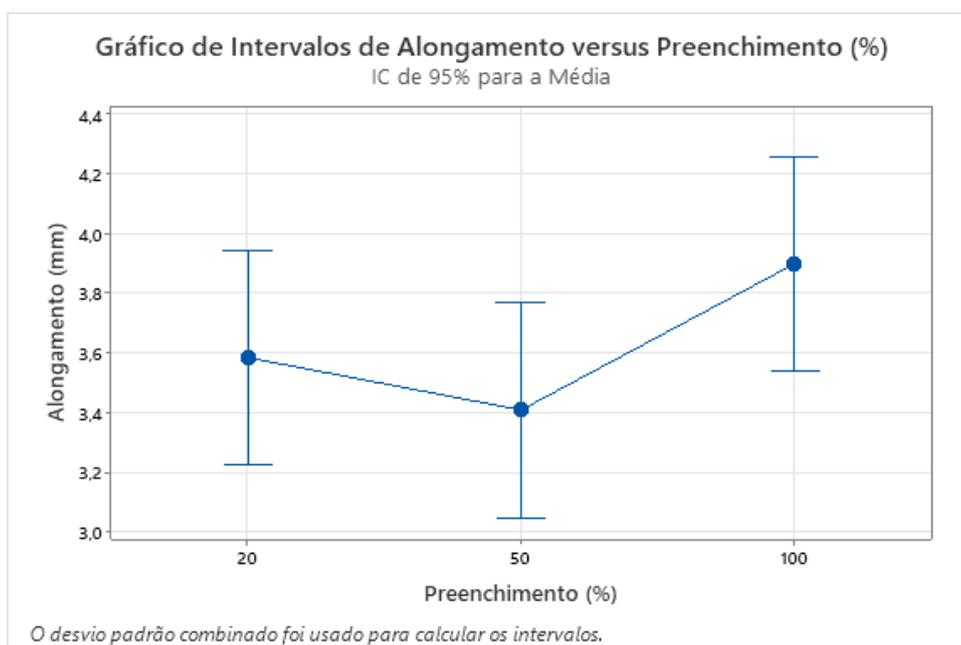
A Tabela 27 apresenta os dados da análise de variância para nível de preenchimento sobre o alongamento mostrando um valor $P = 0,05$ e $F = 3,56 > 1$, qualificando estatisticamente o nível de preenchimento como relevante ao efeito do alongamento.

Tabela 27 - ANOVA Alongamento sobre nível de preenchimento

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Preenchimento (%)	2	0,9171	0,4586	3,56	0,054
Erro	15	1,9316	0,1288		
Total	17	2,8487			

Fonte: Autor (2023).

Figura 56 - Gráfico efeito do nível de preenchimento sobre alongamento



Fonte: Autor (2023).

Analisando a

Figura 56 gerada pelo ANOVA, é perceptível a influência do nível de preenchimento tem sobre o alongamento visto que a partir da análise de variância foi possível determinar que o nível de preenchimento de 100% se obtém maiores médias de alongamento enquanto o menor é obtido no nível de 50%, enquanto o nível 20% tem uma média intermediária.

O resultado obtido por Campos (2022), se assemelha com o que foi obtido nesse trabalho, onde em sua análise para 4 níveis de preenchimento 50 e 75% resultou em alongamentos semelhante, enquanto à 25% teve uma média de alongamento um pouco superior, mas a grande diferença foi em 100%, que teve um grande aumento do alongamento, embora seja aplicado ao ABS, o comportamento da densidade de preenchimento se assemelhou com o resultado obtido no PLA.

De acordo com Campos (2022) e Sousa (2022), essa grande diferença de alongamento de 100% com os demais ocorre pelo fato da existência de pouco espaço vazio aumentando a aderência entre as camadas, acarretando em maiores deformações.

Através do teste de Tukey foi possível determinar quais dos níveis de

preenchimento apresentaram significância sobre o alongamento, a partir da Tabela 28 é observado que as médias de 50 e 100% apresentaram diferenças significativas no alongamento comparadas entre elas, diferente de 20% que estatisticamente não apresenta diferenças significativa.

Tabela 28 - Agrupamento pelo método de Tukey 95% confiança

Preenchimento (%)	N	Média	Agrupamento	
100	6	3,8961	A	
20	6	3,582	A	B
50	6	3,345		B

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Fonte: Autor (2023).

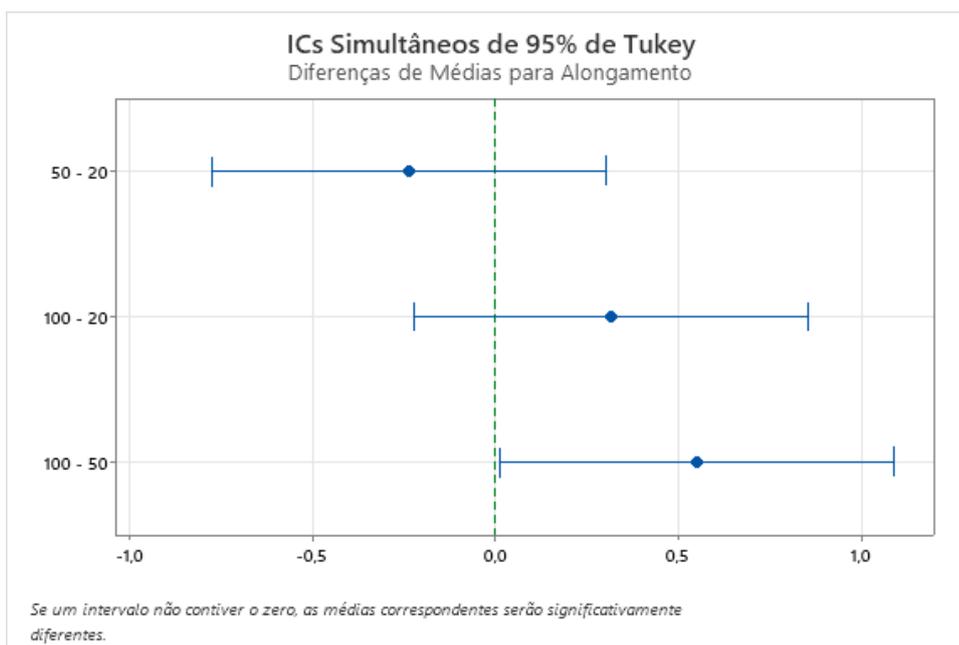
Tabela 29 - Testes Simultâneos de Tukey para Diferenças de Médias

Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
50 - 20	-0,237	0,207	(-0,775; 0,300)	-1,15	0,502
100 - 20	0,314	0,207	(-0,224; 0,852)	1,52	0,312
100 - 50	0,551	0,207	(0,013; 1,089)	2,66	0,044

Nível de confiança individual = 97,97%

Fonte: Autor (2023).

Figura 57 - Gráfico diferença de médias para Alongamento em IC de 95% Tukey.



Fonte: Autor (2023).

4.2.3.2. Análise de Variância da altura da camada sobre o alongamento

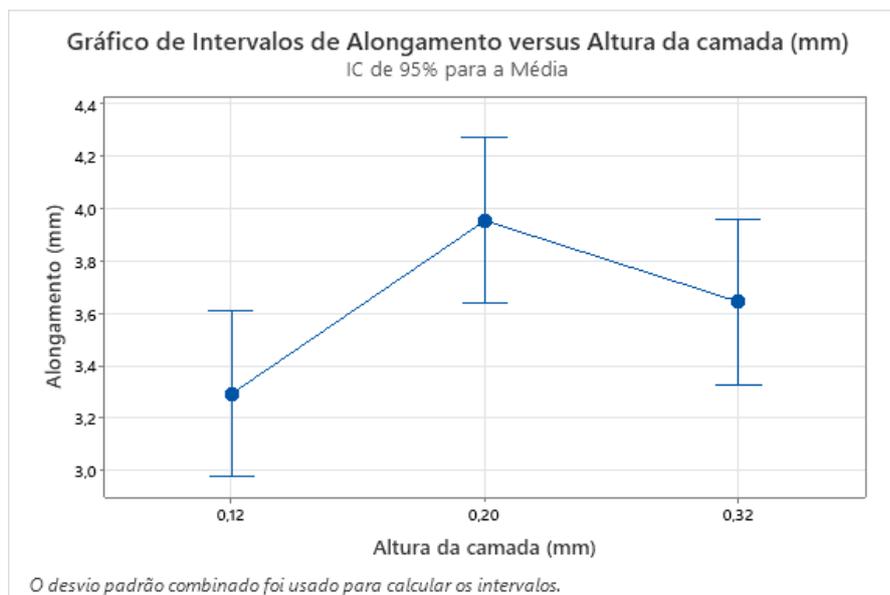
Analisando a influência da altura da camada sobre o alongamento pelo ANOVA, temos a Tabela 30 que afirma que esse parâmetro é o que apresentou maior significância sobre o alongamento com $P = 0,027 < 0,05$ e $F = 4,62 > 1$, resultado esse superior a densidade de preenchimento.

Tabela 30 - ANOVA da altura de camada sobre alongamento

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Altura da camada (mm)	2	1,087	0,5433	4,62	0,027
Erro	15	1,762	0,1175		
Total	17	2,849			

Fonte: Autor (2023).

Figura 58 - Gráfico efeito da altura de camada sobre alongamento



Fonte: Autor (2023).

A altura da camada foi o parâmetro que apresentou maior influência sobre o alongamento a partir da ANOVA, onde os menores alongamento foram registradas para a altura de 0,12 mm, enquanto que o maior alongamento ocorreu em 0,20 mm.

Para Fernandes (2016), alturas de camadas menores tendem a ter menores distorções e as ligações entre as camadas são mais fortes, com isso tende a ter maior probabilidade de que os filamentos sejam tracionados de forma uniforme rompendo quase por igual todos os filamentos.

No entanto é observado que a altura de camada em 0,32 mm os valores

obtidos de alongamento não foram o esperado, pois o alongamento obtido é inferior a 0,20mm e superior a 0,12mm, podendo ser explicado pela redução da área de contato entre as camadas por conta do aumento da seção transversal do filamento extrusado e redução do número de camadas, com isso as ligações entre os filamentos não resistiram ao esforço do ensaio de tração, mesmo com área do filamento extrusado ser superior as demais, rompendo de forma frágil, devendo ser mais explorados a partir de mais repetições dos ensaios, pois não foi possível devido ao tempo disponível.

Tabela 31 - Agrupamento pelo método de Tukey 95% confiança

Altura da camada (mm)	N	Média	Agrupamento
0,20	6	3,952	A
0,32	6	3,642	A B
0,12	6	3,291	B

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 32 - Testes Simultâneos de Tukey para Diferenças de Médias

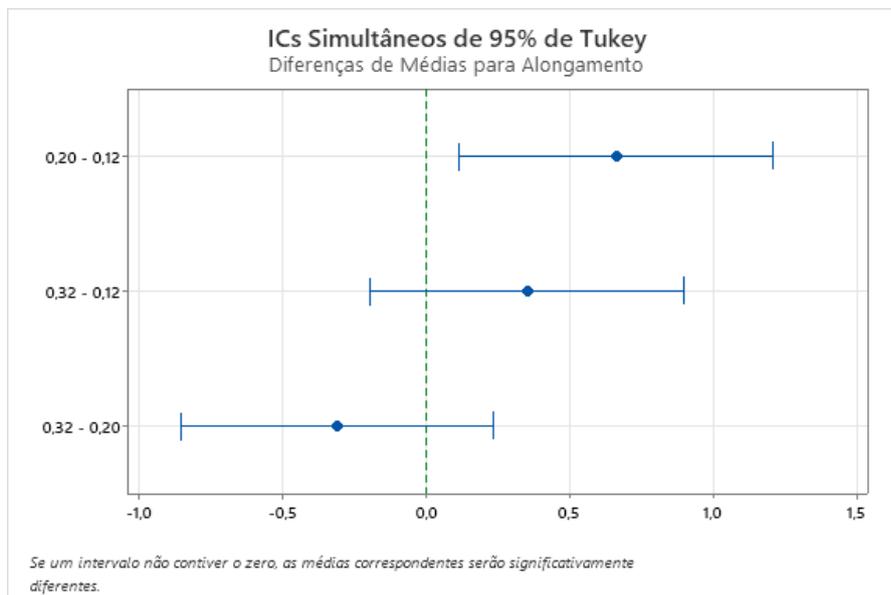
Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP	da Diferença IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
0,20 - 0,12	0,661	0,210	(0,115; 1,206)	3,14	0,017
0,32 - 0,12	0,351	0,210	(-0,194; 0,897)	1,67	0,248
0,32 - 0,20	-0,309	0,210	(-0,854; 0,236)	-1,47	0,332

Nível de confiança individual = 97,97%

Fonte: Autor (2023).

Através do teste de Tukey apresentados na Tabela 31 e Tabela 32 foi possível determinar ao nível de significância de 5%, que a média da altura de camada de 0,32 não apresentou diferenças significantes, em contra partida as médias de 0,20 e 0,12 tiveram diferenças no resultado do parâmetro do alongamento.

Figura 59 - Gráfico diferença de médias para Alongamento em IC de 95% Tukey.



Fonte: Autor (2023).

4.2.3.3. Análise de Variância do tipo de preenchimento sobre o alongamento

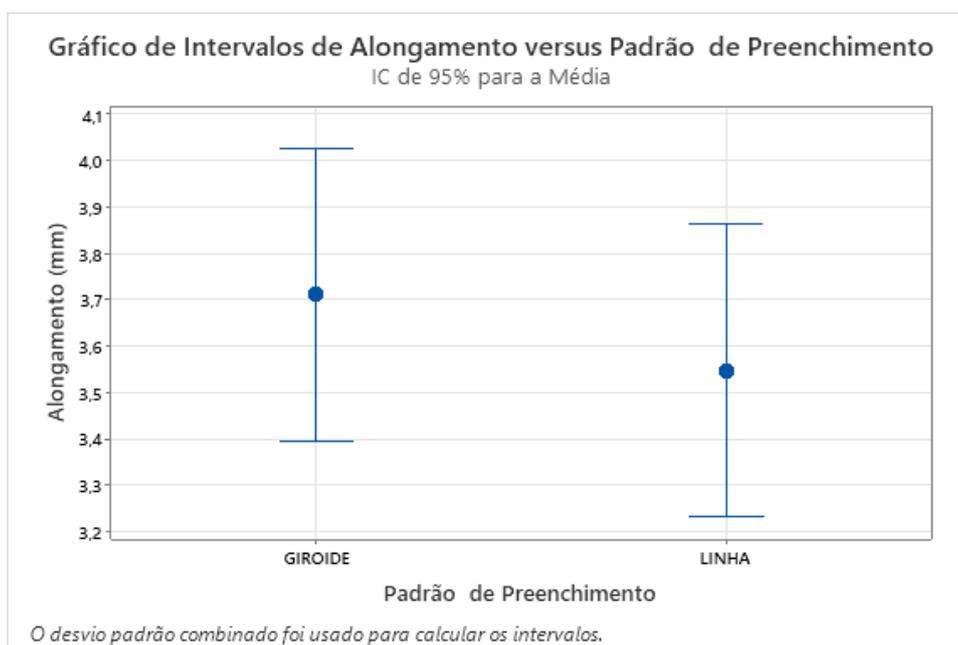
A Tabela 33 apresenta os dados da análise de variância com nível de significância de 5% para tipo de preenchimento sobre o alongamento, onde o valor $P = 0,540 \gg 0,05$, resultando em não significância sobre o alongamento.

Tabela 33 - ANOVA Alongamento sobre tipo de preenchimento

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Padrão de Preenchimento	1	0,06813	0,06813	0,39	0,540
Erro	16	2,78056	0,17379		
Total	17	2,84869			

Fonte: Autor (2023).

Figura 60 - Gráfico efeito do tipo de preenchimento sobre alongamento



Fonte: Autor (2023).

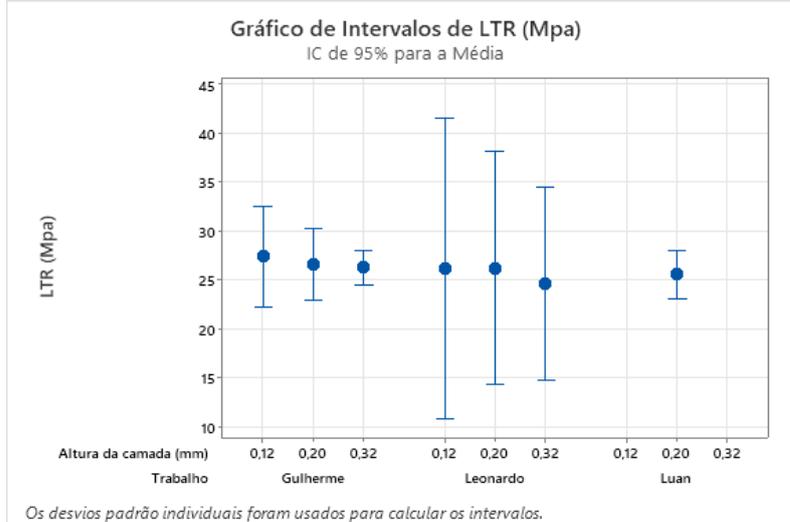
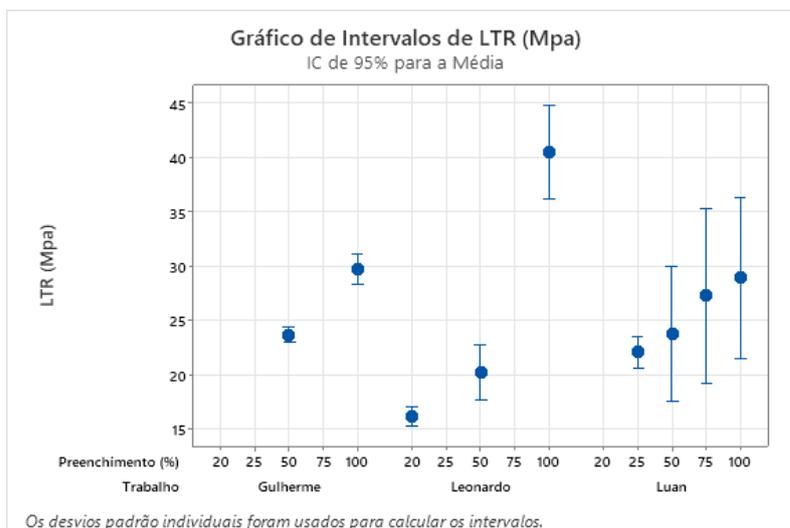
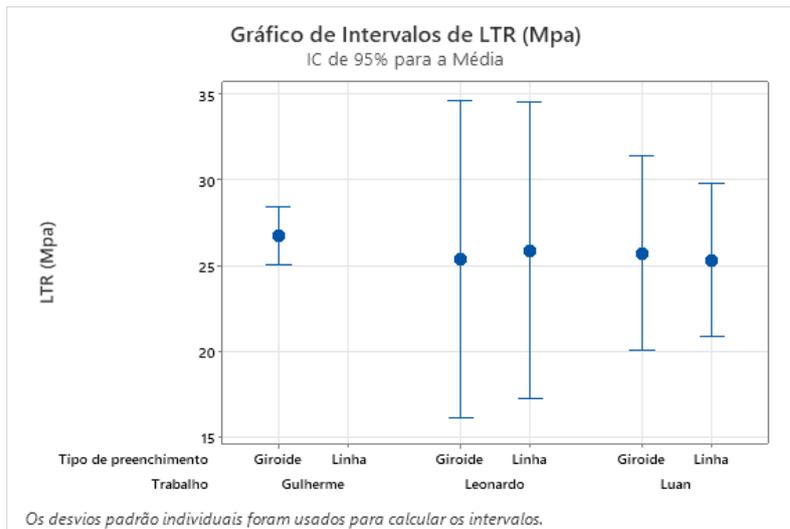
Analisando a Figura 60, é observado que o tipo de preenchimento giróide apresentou média de alongamento maior do que em linha, mas não sendo suficiente estatisticamente como relevantes ao alongamento. Resultado esse tem o comportamento semelhante ao do Campos (2022), onde o mesmo teve um resultado superior para o padrão em giróide em comparação a linha.

4.3. Comparação dos resultados

A partir dos resultados obtidos nas seções anteriores, serão apresentadas as comparações com relação aos trabalhos de Campos (2022) e Sousa (2022), trazendo as diferenças e semelhanças entre eles. A Figura 61 apresenta o gráfico de intervalos avaliando tipo de preenchimento, nível de preenchimento e altura da camada comparando o LRT.

Com relação ao LRT, é observado que o nível de preenchimento apresenta significância em ambos trabalhos, o tipo de preenchimento não apresenta nenhuma significância, a altura da camada o resultado desse trabalho difere com o de Sousa (2022), onde o dele apresenta significância ao LRT enquanto nesse não apresenta relevância significativa.

Figura 61 - Gráficos de Intervalos LTR comparando parâmetros e trabalhos



Fonte: Autor (2023).

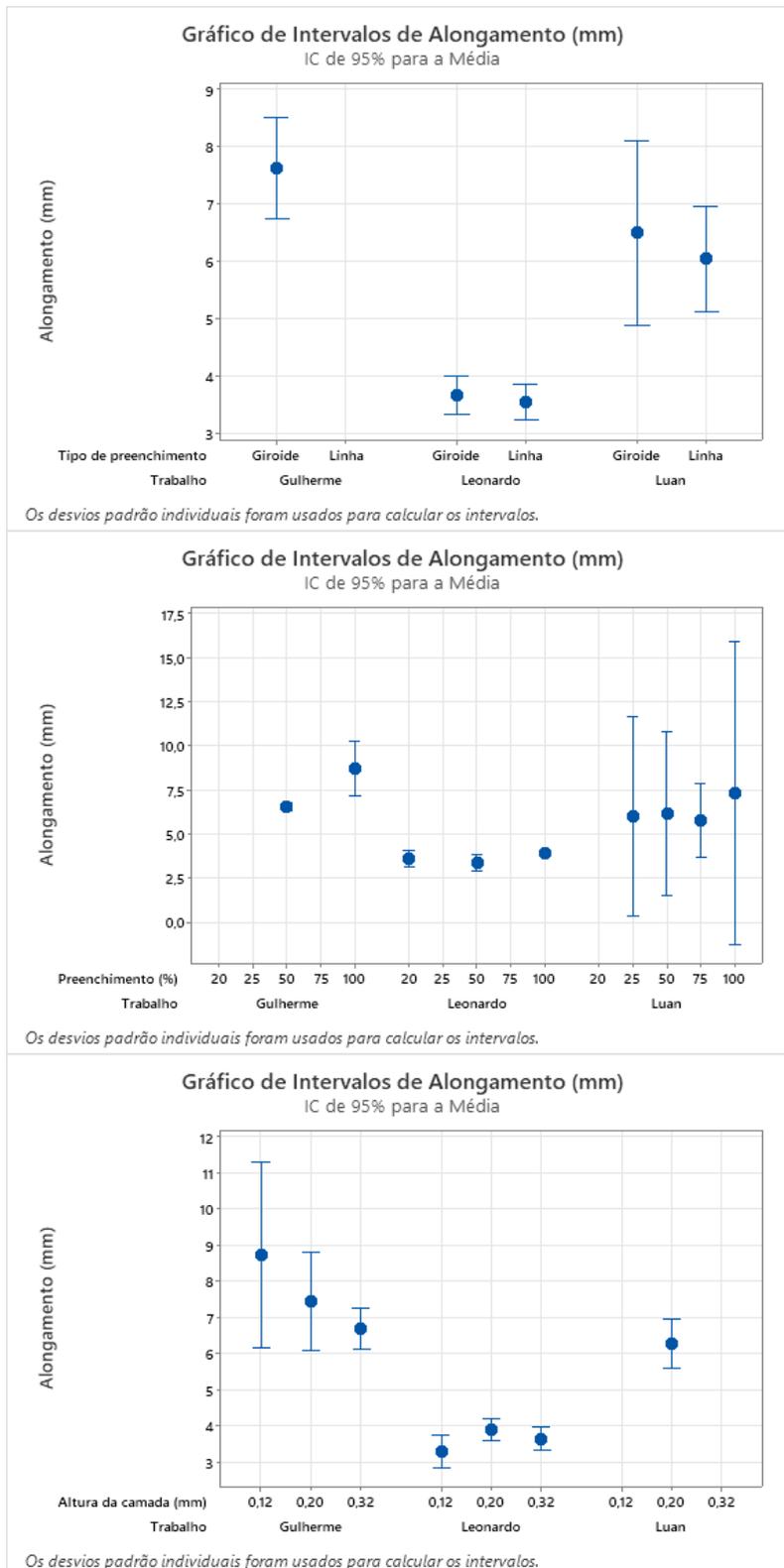
A Figura 62 traz os gráficos de alongamento com relação ao nível de preenchimento, tipo de preenchimento e altura da camada, servindo de comparação entre os 3 trabalhos.

Analisando o Alongamento com relação ao nível de preenchimento é verificado que em todos os trabalhos o nível de preenchimento foi significativo, obtendo alongamentos máximo em 100% do preenchimento.

Seguindo o alongamento com relação ao tipo de preenchimento para Campos (2022), o tipo de preenchimento é significativamente relevante ao alongamento, sendo que nesse trabalho o tipo de preenchimento não é relevante ao alongamento.

Com relação à altura da camada ambos trabalhos apresentaram significância ao alongamento, no entanto apresentaram comportamento inverso, onde o de Sousa (2022), obteve maiores alongamento para a menor altura da camada e nesse trabalho apresentou o maior para a altura intermediária.

Figura 62 - Gráficos de Intervalos de alongamento comparando parâmetros e trabalhos



Fonte: Autor (2023).

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar a influência dos parâmetros de impressão 3D, nível de preenchimento, tipo de preenchimento e altura da camada causaria sobre o limite de resistência a tração, alongamento, tempo de impressão e na massa dos corpos de prova usando filamento em PLA.

A partir das análises de variância e teste de Tukey para cada parâmetro estudado consegue-se realizar as seguintes conclusões:

Para o limite de resistência a tração o único parâmetro que apresentou influencia ao LRT foi o nível de preenchimento, que ao aumentar a densidade obteve maiores LRT, em contrapartida o tipo de preenchimento e altura da camada não apresentaram influencias significativas sobre o LRT.

Analisando os efeitos sobre o alongamento tem-se a que o nível de preenchimento e altura de camada teve grande influência no resultado, onde ao aumentar o nível de preenchimento de 50 a 100% e altura da camada de 0,12 a 0,20 mm teve um maior alongamento, no entanto para o tipo de preenchimento não se teve influência estatisticamente significativa.

Embora o nível de preenchimento não tenha atingido o nível de significância da estatística sobre o tempo de impressão, ele é um fator a considerar, sendo que é perceptível ao aumentar a densidade se obteve maiores tempos de impressão, pois a impressora terá que realizar percurso maior para poder preencher levando mais tempo. A altura da camada é fator que mais influenciou no tempo de impressão visto que ao diminuir a altura, aumenta o número de camadas a ser impressa, resultando no maior tempo para concluir, por fim o tipo de preenchimento não houve diferença significativa com relação ao tempo de impressão, embora o giróide teve um tempo um pouco superior devido a maior complexidade da geometria, mas não sendo estatisticamente significativa.

Para a massa apenas o nível de preenchimento teve influência sobre ela, o resultado é evidente visto que ao se aumentar o nível de preenchimento, aumenta a quantidade de material depositada sobre o corpo de prova resultando no aumento da massa, para o tipo de preenchimento e altura da camada não houveram diferenças significativas na massa.

Por fim pode-se concluir que o parâmetro que mais teve influência foi o nível de preenchimento, onde ele teve influência sobre todas as variáveis analisadas,

enquanto a altura da camada foi relevante apenas para o alongamento e tempo de impressão, sendo que o tipo de preenchimento não foi relevante para nenhuma das variáveis analisadas.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analise das influências desses parâmetros de impressão em outros tipos de ensaio mecânico;
- Analisar a influência de outros parâmetros de impressão para as propriedades mecânicas dos corpos de provas;
- Analisar as propriedades mecânicas com outros tipos de preenchimento.

REFERÊNCIAS

3D FILA. **O que significa FDM.** Disponível em: <<https://3dfila.com.br/blog/o-que-significa-fdm/#:~:text=Uma%20das%20principais%20vantagens%20do>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

3DFILA. **Como aumentar a velocidade da Impressão 3D sem perder em qualidade? - 3D Fila.** 2018. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/blog/como-aumentar-a-velocidade-da-impressao-3d-sem-perder-em-qualidade/>>. Acesso em: 24 jun. 2023.

ABSOLUCIOJONA, 2023. Disponível em: <<https://absoluciojona.org/absoluciojona-news-today-obtenha-uma-impressora-3d-por-menos-com-a-creality-ender-3- agora-por-menos-de-170-mas-se-apresse-o-prime-day-termina-em-breve/>>. Acesso em 15 jul. 2023

ADMTECHCD. **Aprenda como evitar warping na sua impressão 3D.** 2021. Disponível em: <<https://techcd.com.br/noticias/evitar-warping/>>. Acesso em: 24 jun. 2023.

ADMTECHCD. **Tudo o que você precisa saber sobre o filamento PETG.** 2021. Disponível em: <<https://techcd.com.br/noticias/filamento-petg/>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

ALL3DP. **Os melhores filamentos para impressoras 3D de 2021.** 2021. Disponível em: <<https://all3dp.com/pt/1/filamento-impressora-3d-comparacao-melhor-tipo/>>. Acesso em: 23 de jun. 2023.

AMBRÓS, Guilherme Silva. **Influência dos parâmetros de impressão 3D na resistência à tração de corpos de prova impressos em PLA utilizando modelagem por fusão e deposição.** 2019.

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

BARROS, A. J. D. S.; LEHFELD, N. A. D. S. **Fundamentos da Metodologia Científica.** 3ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

BATOCCHIO, A.; BIAGIO, L. A. **Plano de Negócios - estratégia para micro e pequenas empresas.** São Paulo: Manole, 2005.

BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. D. V. **Introdução á Engenharia: Conceiros, Ferramentas e Comportamentos.** FLORIANÓPOLIS: UFSC, 2009.

BERNARDI, L. A. **Manuel de Empreendedorismo e Gestão: fundamentos, estratégias e dinâmicas.** São Paulo: Atlas , 2010.

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

BIOPDI. **Ensaio de tração | Resistência a tração | Teste de tração.** Disponível em: <<https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

CABREIRA, V. **AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO EM IMPRESÃO 3D NAS PROPRIEDADES DO POLIÁCIDO LÁTICO.** 2018.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciencia e ingeniería de materiales.** Reverté, 2019.

CAMPOS, Luan Victor Diniz. **Avaliação do efeito do nível e do tipo de preenchimento nas propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados por impressão 3D utilizando o material ABS.** 2022.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. **Metodologia Científica.** 6^a. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

CHRISTIYAN, K. G. J.; CHANDRASEKHAR, U.; VENKATESWARLU, K. **A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 114, p. 012109, fev. 2016.

CLIEVER. **PLA Branco.** Disponível em: < <https://www.cliever.com/produto/pla-branco-1-75mm-1-kg-cliever-288>>. Acesso em: 04 maio 2023.

DARIDO, S. C.; SOUZA JÚNIOR, O. M. D. **Para Ensinar Educação Física: possibilidades de intervenção na escola.** Campinas: Papirus, 2007.

DOLABELA, F. **O Segredo de Luísa.** Rio de Janeiro: Sextante, 2008.

DOMINGUES, L.H. **Engenharia de Produção e a Indústria 4.0.** [s.l.] AYA Editora, 2020.

MOUSTA. **O que é impressão 3D? Guia definitivo.** Disponível em: <<https://www.mousta.com.br/o-que-e-impresao-3d/>>. Acesso em: 15 jul. 2023.

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

GIVANILDO, S. **Tecnologias Mecânicas.** [s.l.] Saraiva Educação S.A., 2020.

GONÇALVES, E. **Ensaio de Tração: Muitas informações podem ser obtidas através deste teste | CCDM** Ensaio de Tração: Muitas informações podem ser obtidas através deste teste. 2021. Disponível em: <<http://www.ccdm.ufscar.br/2021/08/05/ensaio-de-tracao/#:~:text=O%20ensaio%20de%20tra>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

GTMAX3D. **GTMAX 3D CORE H5** Disponível em: <<https://www.gtmax3d.com.br/impresora-3d-pro/gtmax3d-core-h5-simplify3d>>. Acesso em: 04 maio 2023.

HIBBELER, R. C. **Resistencia dos materiais (7a. ed.).** Sao Paulo: Pearson Educacion, 2010.

IMPRIMALAB. **+INFO - Infomações sobre impressão 3D | Imprimallab | Blumenau.** Disponível em: <<https://www.imprimalab.com.br/info>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

LIMA, R. O. C. et al. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas de polímeros usados na manufatura aditiva e plásticos de engenharia comuns usados na indústria.** Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, v. 3, n. 1, p. 35–46, 15 fev. 2021.

LOPES, A. et al. **Impressão 3D: imaginar, planejar e materializar.** Disponível em: <http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/seed_lab/caderno_impresao_3d.pdf>. Acesso: 21 jun. 2023.

MAGALHÃES, A. L. DA R. **Análise de tenacidade à fratura em ABS por impressão 3D.** 2019.

MAKERHERO. **Filamentos mais usados em impressão 3D.** Disponível em: <<https://www.makehero.com/blog/pla-o-filamento-mais-usado-em-impresao-3d/>>. Acesso em: 09 maio 2023.

MARTEL, A. **The Types Of FDM 3D Printer**. Disponível em: <<https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/#>>. Acesso em: 19 de junho de 2023.

MEDEIROS, M. et al. **Influência da Densidade de Preenchimento e do Número de Perímetros nas Propriedades Mecânicas de Peças Fabricadas em PLA a Partir de Impressão 3D**. CALIBRE - Revista Brasileira de Engenharia e Física Aplicada, v. 5, p. 33, 20 dez. 2020.

MENDES, A. M. et al. **Relatório de ensaio de tração com materiais poliméricos**. 2007.

OLIVEIRA, B. **Teste de Tukey para Comparações Múltiplas**. 2019. Disponível em: <<https://statplace.com.br/blog/comparacoes-multiplas-teste-de-tukey/>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

PEREIRA, T. et al. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PADRÃO DE PREENCHIMENTO E DA ALTURA DE CAMADA DE DEPOSIÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS FABRICADAS EM PLA A PARTIR DE IMPRESSÃO 3D**. DESAFIOS - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins, v. 8, n. 1, p. 95–103, 12 mar. 2021.

PERTICARRARI, A. L. P. M. **Aula 7 - Testes de comparação de Médias (continuação)**. [s.d.].

PORTELA, S. **Filamento ABS: como imprimir com esse filamento**. 2017. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/como-imprimir-com-filamento-abs/>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

PORTELA, S. **Qual a influência da temperatura na impressão 3D?** 2019. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/temperatura-na-impressao-3d/>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

PORTELA, S.; VIAU, K.; WEBMASTER. **Arquivos tipos de preenchimento**. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/tag/tipos-de-preenchimento/>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

PRINTIT3D. **Post | Impressão 3D**. 2015. Disponível em: <<https://www.printit3d.com.br/post/impress>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

PRODANOV, Cleber Cristiano; DE FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição**.

Editora Feevale, 2013.

R3DY. **O que é o plástico PETG?** 2021. Disponível em: <<https://www.r3dy.com.br/o-que-e-o-plastico-petg/#:~:text=PETG%20>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

RAZGRIZ, G. **O XYZ das Impressão 3D.** [s.l.] Editora NCB, 2020.

RAZGRIZ, G. **O Guia Definitivo sobre Manutenção de Impressoras 3D.** [s.l.] Editora NCB, 2021.

RODRIGUES, L. **O que é ANOVA? Aprenda como utilizar e como calcular.** 2019. Disponível em: <<https://www.voitto.com.br/blog/artigo/anova>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

RODRIGUES, V. P. et al. **Additive manufacturing: state-of-the-art and application framework.** Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas, v. 12, n. 4, p. 1–34, 1 jul. 2017.

RUCHERT, C. O. F. T. **Ensaio Tração Polímero.** [s.d.].

SANTOS, L. M. **VIABILIDADE TÉCNICA DA APLICAÇÃO DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS RECICLADOS PARA IMPRESSÃO 3D.** 2019.

SENHORAS, E.M. **Políticas Públicas para Ciência, Tecnologia e Inovação 2.** [s.l.] Atena Editora, 2022.

SILVEIRA, M. A. **A formação do engenheiro inovador: uma visão internacional.** Rio de Janeiro: Puc-Rio, 2005.

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

SOUZA, G. S.; SANTOS, A. R.; DIAS, V. B. **Metodologia da pesquisa científica: a construção do conhecimento e do pensamento científico no processo de aprendizagem.** [s.l.] Animal, 2013.

STUDIO LEÃO 3D. **Impressão 3D - Absolutamente Tudo o Que Você Precisa Saber! - Impressão 3D SP | Studio Leão 3D.** Disponível em: <<https://www.studioleao3d.com.br/impresao-3d/>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

THOMAZETTI, J. L. S. **INTEGRAÇÃO ELETROELETRÔNICA EM IMPRESSORA 3D COM CINEMÁTICA DELTA INVERTIDA**. Trabalho de conclusão de curso – Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, dez. 2019.

TIBCO. **O que é Análise de Variância – ANOVA? – Psicometria Online**. Disponível em: <<https://psicometriaonline.com.br/analise-de-variancia-anova/>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

TOPINK3D. **Pesquisar | BICO20PARA20EXTRUSORA**. 2023. Disponível em: <<https://www.topink3d.com.br/busca?search=BICO%20PARA%20EXTRUSORA>>. Acesso em: 24 jun. 2023.

VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva Tecnologias e Aplicações Da Impressão 3D**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 2021.

VOLPATO, N. **Prototipagem rápida**. [s.l.] Editora Blucher, 2007.

WISHBOX, R. **Filamento PLA: O que é, vantagens e como imprimir em 3D**. 2015. Disponível em: <<https://www.wishbox.net.br/blog/pla/#:~:text=O%20filamento%20PLA%20>>. Acesso em: 28 jun. 2023.