



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

**LUAN VICTOR DINIZ CAMPOS**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO NÍVEL E DO TIPO DE PREENCHIMENTO NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA FABRICADOS POR  
IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO O MATERIAL ABS**

**RUSSAS**

**2022**

LUAN VICTOR DINIZ CAMPOS

AVALIAÇÃO DO EFEITO DO NÍVEL E DO TIPO DE PREENCHIMENTO NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA FABRICADOS POR  
IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO O MATERIAL ABS

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

Orientador: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães  
Pinheiro.

RUSSAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C214a 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 / Luan Victor Diniz Campos. – 2022.  
82 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

1. Impressão 3D. 2. Fusão e Deposição de Materiais (FDM). 3. Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). 4. Parâmetros de impressão. 5. Propriedades mecânicas. I. Título.

CDD 620.1

---

LUAN VICTOR DINIZ CAMPOS

AVALIAÇÃO DO EFEITO DO NÍVEL E DO TIPO DE PREENCHIMENTO NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA FABRICADOS POR  
IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO O MATERIAL ABS

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

Aprovada em: 06/07/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

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

---

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que permitiu a conclusão desse curso e, nesses tempos difíceis, manteve minha saúde e de toda minha família.

Agradeço aos meus pais, Luzardo e Iva, por todo amor, compreensão e apoio durante todos os momentos da minha vida, sempre me motivando na busca pelo conhecimento.

Agradeço a minha irmã, Fabrícia, por todo o incentivo e auxílio durante a graduação.

A minha namorada, Vitória, por todo carinho, companheirismo e incentivo durante a fase final da graduação.

A toda minha família que me auxiliou para a conclusão dessa etapa.

Agradeço a todos meus professores, em especial ao meu orientador, Dr. Pedro Helton, pela excelente orientação, paciência, suporte e disponibilidade para a elaboração desse trabalho.

Aos meus amigos, Guilherme, Patric, Daniel, Claudecir e Vinícius, por todos os momentos de estudo e descontração, sem vocês o processo teria sido muito mais difícil.

Expando meus agradecimentos a todos meus amigos da graduação.

A todos, muito obrigado!

Luan Diniz.

## RESUMO

A manufatura aditiva (MA) está ganhando cada vez mais destaque devido a possibilidade de fabricação de peças com geometrias complexas e redução do custo e tempo de produção, além de ser uma alternativa rápida para a criação de protótipos de peças antes da produção. A Modelagem por Fusão e Deposição de Materiais (FDM) é a técnica de MA mais utilizada, apresentando um alto potencial de crescimento. Onde, o estudo dos parâmetros de impressão no processo FDM vem ganhando cada vez mais atenção na comunidade acadêmica, devido às limitações de uso causada pela baixa disponibilidade de materiais que podem ser utilizados nessa tecnologia. Diante disso, o objetivo deste trabalho é analisar o efeito do nível de preenchimento e do tipo de preenchimento nas propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados por impressão 3D utilizando o material ABS. Realizou-se a seleção da geometria, a modelagem e a impressão dos corpos de prova. Com isso, foi analisado a influência que os parâmetros, nível de preenchimento e tipo de preenchimento exercem sobre o limite de resistência a tração, alongamento na ruptura, tempo de impressão e massa de impressão. Para a análise dos resultados, foi utilizado a ferramenta de Análise de Variância (ANOVA). Através dos resultados obtidos, foi possível verificar que o nível de preenchimento apresenta efeitos significativos no LRT, no alongamento na ruptura, no tempo de impressão e na massa dos corpos de prova, visto que, com o aumento do nível de preenchimento dos corpos de prova, os resultados das variáveis de resposta aumentaram, no entanto no alongamento na ruptura esse efeito só foi significativo no nível de preenchimento de 75% para 100%. Já o parâmetro tipo de preenchimento só apresentou influência significativa sobre o alongamento na ruptura.

**Palavras-chave:** Impressão 3D; Fusão e Deposição de Materiais (FDM); Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS); Parâmetros de impressão; Propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) is gaining more and more prominence due to the possibility of manufacturing parts with complex geometries and reducing cost and production time, in addition to being a quick alternative for the creation of prototypes of parts before production. The Fused Deposition Modeling (FDM) is the most used AM technique, presenting a high growth potential. Where, the study of printing parameters in the FDM process has been gaining more and more attention in the academic community, due to the limitations of use caused by the low availability of materials that can be used in this technology. Therefore, the objective of this work is to analyze the effect of the filling level and the filling type on the mechanical properties of specimens manufactured by 3D printing using ABS material. Geometry selection, modeling and printing of the specimens were carried out. With this, the influence that the parameters, filling level and filling type exert on the tensile strength limit, elongation at break, printing time and printing mass was analyzed. To analyze the results, the Analysis of Variance (ANOVA) tool was used. Through the results obtained, it was possible to verify that the filling level has significant effects on the LRT, on the elongation at break, on the printing time and on the mass of the specimens, since, with the increase of the filling level of the specimens, the results of the response variables increased, however in the elongation at break this effect was only significant at the filling level from 75% to 100%. On the other hand, the type of filling parameter only had a significant influence on the elongation at break.

**Keywords:** 3D Printing; Fused Deposition Modeling (FDM); Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS); Print Parameters; Mechanical Properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Nomenclaturas da área da manufatura aditiva .....	17
Figura 2 – Etapas do processo de impressão 3D .....	19
Figura 3 – Tecnologias de impressão 3D mais usadas em todo o mundo em 2021 .....	21
Figura 4 – Desenho esquemático do processo FDM .....	22
Figura 5 – Aplicações da Manufatura Aditiva .....	24
Figura 6 – Exemplos de aplicações da Manufatura Aditiva .....	24
Figura 7 - Representação de uma impressora 3D cartesiana .....	25
Figura 8 - Representação de uma impressora 3D CoreXY .....	26
Figura 9 - Representação de uma impressora 3D Delta .....	27
Figura 10 – Corpos de prova com níveis de preenchimento variados.....	32
Figura 11 – Padrões de preenchimento do <i>Software</i> Ultimaker Cura®.....	33
Figura 12 – Orientações do preenchimento .....	35
Figura 13 – Variações de altura de camada na impressão 3D .....	38
Figura 14 – Bicos de extrusão .....	38
Figura 15 - Curvas tensão-deformação para polímeros.....	40
Figura 16 - Efeito do Nível de preenchimento sobre a tensão máxima.....	41
Figura 17 – Filamento ABS .....	43
Figura 18 – Impressora Core H5 .....	44
Figura 19 – Máquina de ensaios de tração .....	45
Figura 20 – Paquímetro digital .....	46
Figura 21 – Balança eletrônica de precisão .....	46
Figura 22 – Fluxograma metodológico .....	47
Figura 23 - Torre de temperatura .....	48
Figura 24 – Corpo de prova segundo a norma ASTM D638-02a (Tipo I) .....	51
Figura 25 - Corpo de prova no software Ultimaker Cura®.....	51
Figura 26- Corpos de Prova Impressos .....	53
Figura 27 - Curva tensão-deformação da combinação impressa.....	55
Figura 28 - Curva tensão-deformação de engenharia e geometria de deformação típica de alguns polímeros.....	56
Figura 29 - Corpos de prova ensaiados .....	56
Figura 30 - Orientação de preenchimento de 0°/90° com a direção do carregamento aplicada.....	57
Figura 31 - Fratura do CP perpendicular a aplicação da força .....	57
Figura 32 – Efeito do nível de preenchimento sobre o LRT .....	59

Figura 33 - Curva tensão-deformação para os diferentes níveis de preenchimentos estudados. .....	60
Figura 34 – Efeito do tipo de preenchimento sobre o LRT .....	61
Figura 35 - Curva tensão-deformação para os diferentes tipos de preenchimentos estudados.	62
Figura 36 – Efeito do nível de preenchimento sobre o alongamento .....	64
Figura 37 - Curva tensão-deformação para os diferentes níveis de preenchimentos estudados .....	65
Figura 38 – Efeito do tipo de preenchimento sobre o alongamento .....	66
Figura 39 – Corpos de prova com os tipos de preenchimentos estudados:           a) Preenchimento Grade; b) Preenchimento Cúbico; c) Preenchimento Giróide;   d) Preenchimento Linhas. ....	67
Figura 40 – Efeito do tipo de preenchimento na seção transversal dos corpos de prova: a) Preenchimento Grade; b) Preenchimento Cúbico; c) Preenchimento Giróide; d) Preenchimento Linhas. ....	68
Figura 41 - Curva tensão-deformação para os diferentes tipos de preenchimentos estudados	68
Figura 42 - Efeito do nível de preenchimento sobre o tempo de impressão .....	70
Figura 43 - Efeito do tipo de preenchimento sobre o tempo de impressão .....	71
Figura 44 - Efeito do nível de preenchimento sobre a massa.....	73
Figura 45 - Efeito do tipo de preenchimento sobre a massa.....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Processo de impressão 3D .....	19
Tabela 2 – Comparativo das propriedades dos materiais utilizados na impressão 3D .....	31
Tabela 3 - Características dos tipos de preenchimento .....	34
Tabela 4 – Faixa de temperatura de impressão para os materiais mais utilizados.....	36
Tabela 5 – Faixa de temperatura da mesa de impressão para os materiais mais utilizados.....	36
Tabela 6 – Tensões máximas para diferentes preenchimentos e materiais (PLA e ABS).....	41
Tabela 7 – Parâmetros definitivos .....	48
Tabela 8 - Parâmetros fixos .....	49
Tabela 9 - Matriz experimental para ensaios de tração .....	50
Tabela 10 - Dimensões dos CPs impressos .....	54
Tabela 11 - Matriz experimental do LRT.....	58
Tabela 12 - Matriz experimental do alongamento na ruptura.....	63
Tabela 13 - Matriz experimental do tempo de impressão.....	69
Tabela 14 - Matriz experimental da massa do corpo de prova .....	72

## 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
Gpa	Giga Pascal
LRT	Limite de Resistência à Tração
MA	Manufatura Aditiva
min	Minuto
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
NY	Nylon
PC	Policarbonato
PET	Poli Tereftalato de Etileno
PETG	Poli Tereftalato de Etileno Glicol
PLA	Ácido Poli Láctico
PR	Prototipagem Rápida
SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
STL	Surface Tessellation Language
UFC	Universidade Federal do Ceará

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	16
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i> .....	16
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i> .....	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
<b>2.1</b>	<b>Manufatura Aditiva</b> .....	17
<b>2.2</b>	<b>Impressão 3D (FDM)</b> .....	20
<i>2.2.1</i>	<i>Vantagens do processo FDM</i> .....	22
<i>2.2.2</i>	<i>Desvantagens do processo FDM</i> .....	23
<i>2.2.3</i>	<i>Aplicações do processo FDM</i> .....	23
<i>2.2.4</i>	<i>Tipos de impressoras FDM</i> .....	25
<i>2.2.4.1</i>	<i>Impressora Cartesiana</i> .....	25
<i>2.2.4.2</i>	<i>Impressora CoreXY</i> .....	26
<i>2.2.4.3</i>	<i>Impressora Delta</i> .....	27
<b>2.3</b>	<b>Materiais de impressão 3D</b> .....	28
<i>2.3.1</i>	<i>Filamento ABS</i> .....	28
<i>2.3.2</i>	<i>Filamento PLA</i> .....	29
<i>2.3.3</i>	<i>Filamento PETG</i> .....	30
<i>2.3.4</i>	<i>Comparativo dos materiais de impressão 3D</i> .....	30
<b>2.4</b>	<b>Parâmetros de impressão 3D</b> .....	31
<i>2.4.1</i>	<i>Nível e tipo de preenchimento</i> .....	32
<i>2.4.2</i>	<i>Orientação do preenchimento</i> .....	35
<i>2.4.3</i>	<i>Temperatura de impressão</i> .....	35
<i>2.4.4</i>	<i>Temperatura da mesa de impressão</i> .....	36
<i>2.4.5</i>	<i>Velocidade de impressão</i> .....	37
<i>2.4.6</i>	<i>Altura de camada</i> .....	37
<i>2.4.7</i>	<i>Diâmetro do bico</i> .....	38
<b>2.5</b>	<b>Ensaio de resistência à tração em materiais poliméricos</b> .....	39
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E METODOLOGIA</b> .....	43
<b>3.1</b>	<b>Material e Equipamentos</b> .....	43
<i>3.1.1</i>	<i>Filamento de impressão 3D</i> .....	43
<i>3.1.2</i>	<i>Impressora 3D</i> .....	44

3.1.3	<i>Equipamento para ensaio de tração</i>	45
3.1.4	<i>Equipamentos de medição</i>	46
3.2	<b>Metodologia</b>	47
3.2.1	<i>Parâmetros de impressão 3D</i>	47
3.2.1.1	<i>Parâmetros preliminares</i>	47
3.2.1.2	<i>Parâmetros definitivos</i>	48
3.2.1.3	<i>Parâmetros fixos</i>	49
3.2.2	<i>Matriz de experimentos</i>	49
3.2.3	<i>Corpos de prova para ensaio de tração</i>	50
3.2.4	<i>Procedimento de ensaio de tração</i>	52
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	53
4.1	<b>Análise dimensional dos corpos de prova impressos</b>	53
4.2	<b>Ensaio de tração</b>	55
4.2.1	<i>Análise visual dos corpos de prova</i>	56
4.2.2	<i>Limite de resistência à tração</i>	58
4.2.3	<i>Alongamento na ruptura</i>	63
4.3	<b>Tempo de impressão</b>	69
4.4	<b>Massa dos corpos de prova</b>	72
5	<b>CONCLUSÃO</b>	75
6	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	77
	<b>REFERÊNCIAS</b>	78
	<b>APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO CORPO DE PROVA CONFORME NORMA ASTM D638-02a</b>	84

## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da competitividade entre as empresas, a Impressão 3D começou a ser mais utilizada na indústria devido a melhora dos processos, da qualidade dos produtos e a redução de custos e tempo de produção. O processo de impressão 3D, consiste na representação de um objeto virtual 3D em um objeto físico (DA CRUZ FERREIRA, 2016).

Os processos de fabricação tradicionais são baseados na moldagem de material (como fundição e metalurgia do pó), na remoção de material (como torneamento e fresamento), na conformação (como forjamento e extrusão), na união de componentes (como soldagem) e na divisão de componentes (como serragem e corte). Enquanto a Manufatura Aditiva, é fundamentada na adição sucessiva de material (VOLPATO, 2017).

As primeiras tecnologias da Manufatura Aditiva eram limitadas pela pequena quantidade de materiais disponíveis. Mas, por meio do desenvolvimento de materiais novos, a tecnologia teve um grande avanço, deixando de ser exclusivamente do segmento industrial, e passando a ter aplicações em diversas áreas, mas com isso surgiu alguns desafios, como a impressão de objetos utilizando polímeros com melhores propriedades mecânicas e obtenção de boa precisão dimensional (PALLAROLAS, 2013).

Entre as diferentes técnicas de Manufatura Aditiva existentes, a Modelagem por Fusão e Deposição de Materiais, traduzido de *Fused Deposition Modeling* (FDM), é a mais utilizada e com alto potencial de crescimento, sendo reconhecida como a melhor técnica de Manufatura Aditiva para a fabricação de peças (TURNER; STRONG; GOLD, 2014).

As propriedades do Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), o tornaram um dos materiais mais populares no processo FDM, tornando um polímero de fácil impressão com alta precisão e constância dimensional. Além disso, a qualidade das peças impressas por meio do processo FDM pode ser controlada com o ajuste de alguns parâmetros de impressão como tipo de preenchimento, nível de preenchimento, orientação de impressão, altura da camada, temperatura de impressão, velocidade de impressão etc. (AUMNATE et al., 2018).

Os parâmetros de impressão podem ser alterados de acordo com a necessidade do usuário, pois exercem grande influência na qualidade final da peça impressa. Com o ajuste correto dos parâmetros de impressão, é possível obter as propriedades mecânicas desejadas para a necessidade final do projeto (SOUSA, 2022).

O tipo de preenchimento é o parâmetro que define qual será a geometria do interior de um objeto fabricado por impressão 3D. Já o nível de preenchimento define a quantidade de material que será depositado no interior do objeto, podendo ser ajustado em termos de densidade, onde 0% significa que o objeto será oco, enquanto 100% significa que o objeto será sólido (GOLDSCHMIDT, 2021). Sendo esses um dos principais parâmetros que afetam a resistência de uma peça impressa.

Diante disso, com o desenvolvimento da tecnologia e dos materiais de impressão 3D, o estudo dos parâmetros de impressão são cada vez mais importantes, devido ao aumento da busca por melhores propriedades mecânicas alinhadas com a obtenção de uma boa precisão dimensional.

Com isso, o objetivo desse trabalho é analisar o efeito do nível de preenchimento e do tipo de preenchimento nas propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados por impressão 3D utilizando o material ABS.

## **1.1 Objetivos**

Os objetivos serão divididos em objetivo geral e objetivos específicos para um melhor entendimento do trabalho.

### ***1.1.1 Objetivo Geral***

Analisar o efeito do nível de preenchimento e do tipo de preenchimento nas propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados por impressão 3D utilizando o material ABS.

### ***1.1.2 Objetivos Específicos***

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

- a) Produzir os corpos de prova de acordo com a norma ASTM D638-02a, com diferentes níveis e tipos de preenchimento;
- b) Realizar ensaios de tração nos corpos de prova;
- c) Realizar uma análise dimensional dos corpos de prova impressos;
- d) Realizar uma análise visual nos corpos de prova;
- e) Avaliar a influência dos parâmetros no limite de resistência à tração;
- f) Avaliar a influência dos parâmetros no alongamento na ruptura;
- g) Avaliar a influência dos parâmetros no tempo de impressão;
- h) Avaliar a influência dos parâmetros na massa dos corpos de prova;
- i) Avaliar qual parâmetro possui uma influência mais significativa nas variáveis de resposta analisadas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva (MA) é definida pela ABNT NBR ISO/ASTM 52900:2018 como: “Processo de união de materiais para obtenção de peças a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada por camada, diferentemente das metodologias de manufatura subtrativa e formativa.”

A Manufatura Aditiva (*additive manufacturing*) é um processo de fabricação de objetos que ocorre por meio da adição sucessiva de material em camadas a partir de um modelo computacional 3D do componente em questão, onde, normalmente esse modelo computacional é oriundo de um sistema *computer-aided design* (CAD). O processo que envolve a Manufatura Aditiva é automatizado, se desenvolvendo de maneira relativamente rápida, em comparação aos meios tradicionais de manufatura (VOLPATO, 2017).

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015), manufatura aditiva é o termo formal para o que costumava ser chamado de prototipagem rápida, ou, popularmente, impressão 3D. O termo, prototipagem rápida (PR) é usado em muitas indústrias para criar rapidamente uma representação do sistema ou peça antes do produto final.

Várias são as nomenclaturas da área da manufatura aditiva, a Figura 1 apresenta algumas das principais variações das nomenclaturas.

Figura 1 – Nomenclaturas da área da manufatura aditiva



Fonte: Volpato (2017, com adaptações).

Já Frantz (2015), afirma que, a Prototipagem Rápida é um processo de curta duração que pode levar de 3 a 72 horas, dependendo do tipo de protótipo que está sendo fabricado, sendo mais vantajoso ao comparado aos métodos tradicionais, como a usinagem, em que um único modelo pode levar várias semanas para ser produzido. A PR possibilita a criação de modelos de forma rápida, onde cerca de 70% a 90% de tempo e dinheiro é economizado.

A impressão 3D é um processo de adição de materiais que cria um objeto em três dimensões, ou seja, o objeto terá um volume (altura, largura e comprimento). Diferente da impressão 2D, que só possui duas dimensões (altura e largura) (SAMPAIO, 2017).

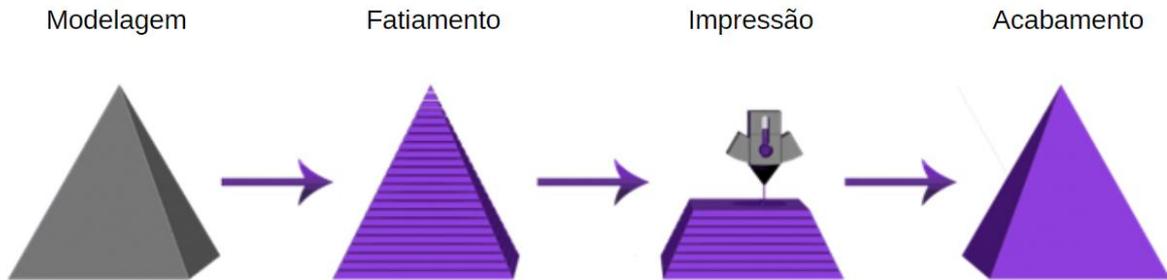
A impressão 3D baseia-se no princípio de fatiar figuras, onde a figura é fatiada em camadas finas e o objeto é impresso por meio da deposição do material fundido, sobrepostos camada por camada até se obter o objeto final (TAKAGAKI, 2012).

Já segundo Alzahrani (2017), o conceito de impressão 3D é transformar um desenho tridimensional em um objeto físico por meio de uma máquina de impressão 3D. Na grande maioria dos casos, os objetos físicos são construídos por deposição de finas camadas transversais umas sobre as outras de modo sucessivo. O objeto impresso é uma aproximação do modelo do software, onde, quanto mais finas as camadas, mais fidedigno será a aproximação.

Segundo Wang et al. (2017), a impressão 3D foi descrita pela primeira vez em 1986 por Charles Hull. Essa tecnologia, cria objetos adicionando materiais para reduzir o desperdício e atingir uma precisão geométrica satisfatória. Começa com um modelo de computador 3D em malha que pode ser criado a partir de imagens ou construído em *software* de CAD. O modelo 3D é fatiado em um arquivo de camadas 2D, onde é salvo em um arquivo *Surface Tessellation Language* (STL), e posteriormente enviado para a máquina de impressão 3D.

Na Figura 2 é possível observar as etapas do processo de impressão 3D de um objeto.

Figura 2 – Etapas do processo de impressão 3D



Fonte: Oaloo Impressão 3D (2021, com adaptações).

Segundo Fernandes (2016), a impressão 3D pode ser dividida nas seguintes etapas que serão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Processo de impressão 3D

<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
Modelagem	A modelagem pode ser feita por meio de <i>Software de Computer Aided Design</i> , Scanner 3D ou câmera digital em conjunto com um software de fotogrametria.
Fatiamento	O modelo é exportado no formato STL e inserido em um programa de fatiamento, onde esse programa faz o fatiamento da peça em várias seções transversais, e cria um arquivo no formato G-Code, onde esse arquivo possui todas as informações necessárias para a impressora realizar a impressão do modelo. No programa de fatiamento também é feita a orientação do modelo, onde ele é colocado na posição ideal para impressão, caso necessário é criada estruturas de suporte e são definidos os parâmetros de impressão.
Impressão	Etapa onde ocorre o processo de impressão do objeto.
Acabamento	Em alguns casos é necessário, depois da impressão, fazer um acabamento manual afim de se obter uma melhor superfície ou nos casos em que a peça é impressa com estruturas de suporte, onde no final da impressão se faz necessário a remoção dessas estruturas.

Fonte: Fernandes (2016, com adaptações).

Várias técnicas de impressão 3D têm sido empregadas para fabricar compósitos poliméricos, dentre elas, algumas técnicas são bem consolidadas, como a Modelagem por Fusão e Deposição de Materiais (FDM), sinterização seletiva a laser (SLS), impressão 3D a

jato de tinta e Estereolitografia (SLA), enquanto outras técnicas ainda estão em processo de desenvolvimento ou ainda estão sendo estudadas por pesquisadores. Cada técnica possui suas próprias vantagens e desvantagens. A seleção da técnica de fabricação depende de diversos fatores, como os materiais, a velocidade de impressão, resolução, custos e desempenho dos produtos finais (WANG et al., 2017).

## **2.2 Impressão 3D (FDM)**

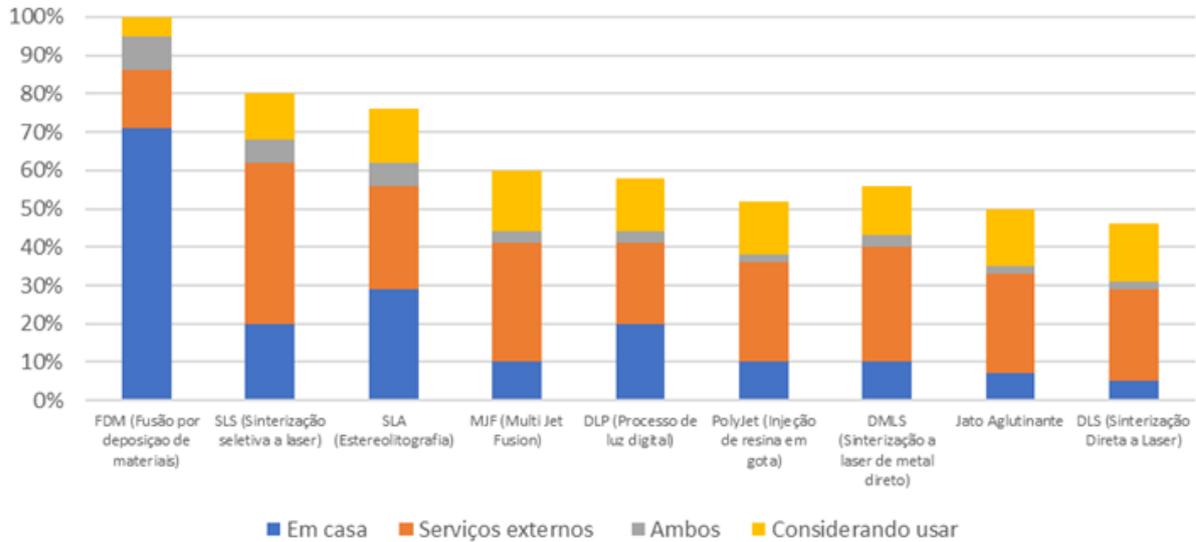
O FDM é de longe a tecnologia de impressão 3D mais popular devido ao seu custo relativamente baixo e simplicidade. Foi desenvolvido pela empresa americana *Stratasys*, mas a concorrência de muitas outras empresas levou à redução do custo dessa tecnologia, o que a tornou viável para o uso doméstico (ALZHRANI, 2017).

Mais especificamente, o FDM foi patenteado e desenvolvido por S. Scott Crump, cofundador da companhia *Stratasys* no final da década de 80. Desde então, a empresa monopolizou a produção e o desenvolvimento dessas impressoras. Mas algumas pessoas passaram a utilizar *Fused Filament Fabrication* (FFF), termo semelhante, em uma tentativa de contornar as restrições imposta para a utilização dessa tecnologia (ABREU, 2017).

Segundo Moreira (2016), com a utilização do termo FFF, houve um aumento do uso da tecnologia, juntamente com um maior desenvolvimento, que acabou gerando uma redução dos preços das impressoras devido a competitividade, que tornou essa tecnologia mais acessível para o uso pessoal.

Atualmente, o FDM representa um percentual significativo nas máquinas de MA utilizadas na indústria, devido as propriedades mecânicas resultantes e na gama de matérias que se é possível fabricar objetos, como, ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno), policarbonato, elastômero e cera (PALLAROLAS, 2013). A Figura 3, apresenta as tecnologias de impressão 3D mais usadas no mundo.

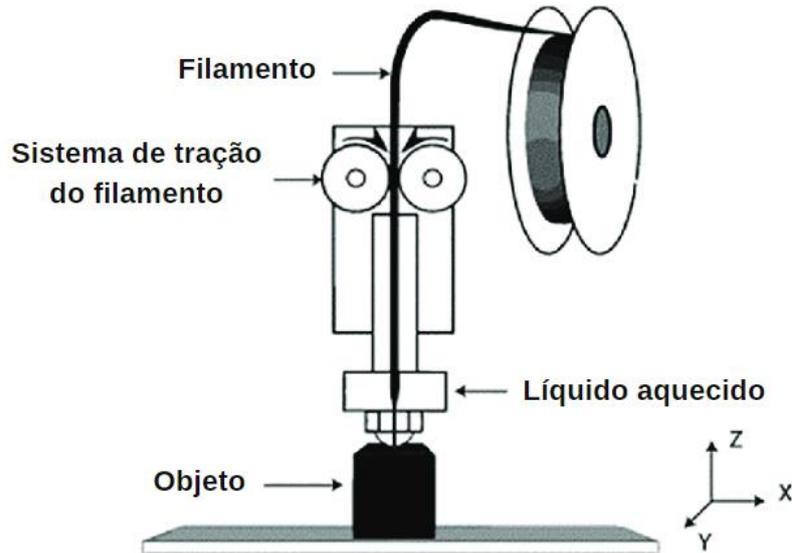
Figura 3 – Tecnologias de impressão 3D mais usadas em todo o mundo em 2021



Fonte: Alsop (2021, com adaptações).

O FDM é uma tecnologia adequada para a produção de peças com geometrias complexas. Nele as peças são fabricadas por extrusão de um filamento fundido, onde o filamento é puxado pelo mecanismo responsável por injetar o material, que está enrolado em uma bobina e é forçado a passar através de um bocal aquecido, onde é depositado em um determinado padrão sobre a mesa de impressão. O material depositado esfria, solidifica e se liga com o material que já foi depositado. O processo consiste na deposição de materiais camada por camada até a construção do objeto 3D completo, sendo um processo que pode levar poucos minutos para objetos simples, ou dependendo da complexidade do objeto, diversas horas (PORTO, 2016; SUN et al., 2008). A Figura 4 abaixo, apresenta um esquema simplificado do processo FDM.

Figura 4 – Desenho esquemático do processo FDM



Fonte: Carneiro, Silva e Gomes (2015, com adaptações).

Neste tipo de impressão 3D, a matéria-prima é fornecida na forma de filamento arredondado de um termoplástico, a impressora é equipada com um pequeno bocal, ou em alguns casos dois bicos, que está conectado a um elemento de aquecimento que permite configurar a temperatura do bico no ponto de fusão do termoplástico. Os filamentos geralmente são encontrados em dois tamanhos diferentes com 3,0 mm e 1,75 mm, enquanto o tamanho do bico da impressora costuma ser de 0,4 mm, embora possa ser modificado (ALZHRANI, 2017).

### 2.2.1 Vantagens do processo FDM

O FDM se encontra em diversas aplicações na indústria devido as seguintes vantagens: redução do custo final, redução do tempo de fabricação, otimização de peças, ótimo custo-benefício, eliminação de ferramentas de alto valor, flexibilidade, alternativa rápida para criar protótipos de peças antes da produção, possibilidade de fabricação de peças complexas, eficiência energética, baixo desperdício de material, além disso, o processo de fabricação da peça é feita em um único equipamento, mas dependendo da aplicação da peça, pode ser necessário algumas etapas de acabamento (DA CRUZ FERREIRA; KRÜGER; SANTOS, 2016; PANDA; RAJU BAHUBALENDRUNI; BISWAL, 2014; VOLPATO, 2017).

De igual modo, Moreira (2016), afirma que com o processo FDM é possível poupar muito material, reduzindo ao máximo o desperdício, devido a possibilidade de redução

de material em locais onde não há a necessidade de grande resistência, ou pela utilização de determinados padrões que minimizam a quantidade de material, mas fornecem rigidez elevada.

### ***2.2.2 Desvantagens do processo FDM***

Podemos citar como desvantagens dessa tecnologia: Precisão e acabamento superficial inferior aos dos produtos fabricados pelos métodos convencionais, dificuldade em reproduzir algumas geometrias complexas e resistências exigidas, baixa diversidade de materiais. Onde, o desenvolvimento de novos materiais pode ser uma das possíveis soluções para esses problemas. Considerando a fabricação em grande escala, a manufatura aditiva ainda é lenta ao comparada com os métodos convencionais (DA CRUZ FERREIRA; KRÜGER; SANTOS, 2016; LIZARDO et al., 2016; VOLPATO, 2017).

Outra desvantagem das impressoras FDM, é que o material utilizado é limitado a polímeros termoplásticos com viscosidade de fusão. A viscosidade de fusão deve ser alta o suficiente para fornecer suporte estrutural e baixo o suficiente para permitir a extrusão. Além disso, a remoção completa da estrutura de suporte usada durante a impressão pode ser difícil (WANG et al., 2017).

### ***2.2.3 Aplicações do processo FDM***

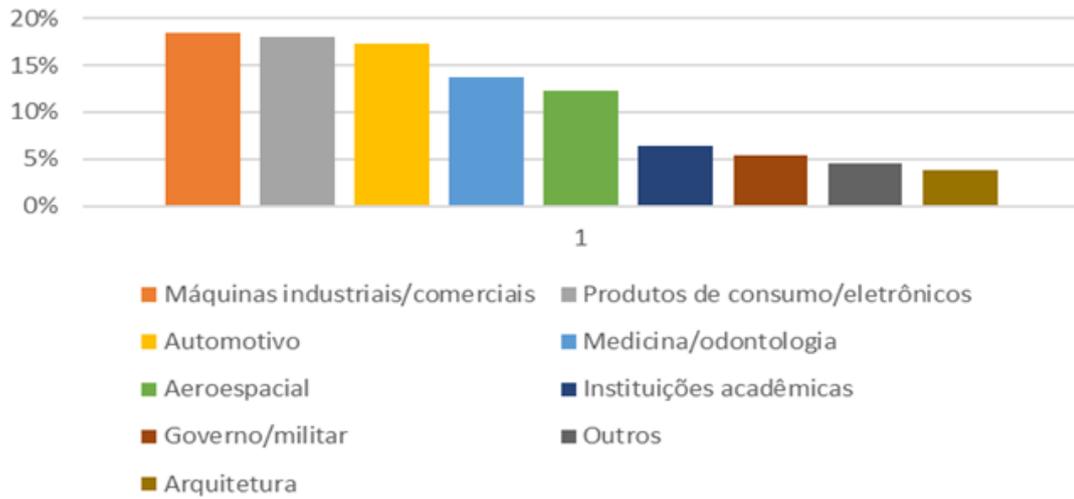
A Manufatura aditiva vem sendo utilizada com sucesso em diversas áreas, não só na fabricação de protótipos, mas em uma ampla categoria de indústrias, abrangendo a aeroespacial, automotiva, biomédico, conversão de energia, produtos de consumo, pesquisas acadêmicas e esportes (DA CRUZ FERREIRA; KRÜGER; SANTOS, 2016; SRIVATSAN; SUDARSHAN, 2015).

Segundo Sun et al. (2008), os protótipos fabricados por FDM podem ser vistos como uma estrutura de compósitos composta de filamentos parcialmente unidos. O processo requer mão de obra mínima e é cada vez mais usado para fabricar produtos personalizados para engenharia, e para aplicações médicas.

Cada vez mais a indústria tem adaptado as impressoras 3D para o uso doméstico, melhorando a ergonomia e diminuindo as dimensões das máquinas, além de desenvolver interfaces de modelagem de objetos cada vez mais simples, para usuários menos qualificados. Por ser o processo mais utilizado entre os processos de manufatura aditiva, o FDM apresenta diversas aplicações, que vão de brinquedos infantis até aplicações na indústria aeroespacial, decorrente dos diversos materiais que podem ser utilizados nessas impressoras, promovendo a

seleção das propriedades mecânicas de acordo com a aplicação pretendida (MOREIRA, 2016). A Figura 5 apresenta um panorama melhor de aplicações da MA.

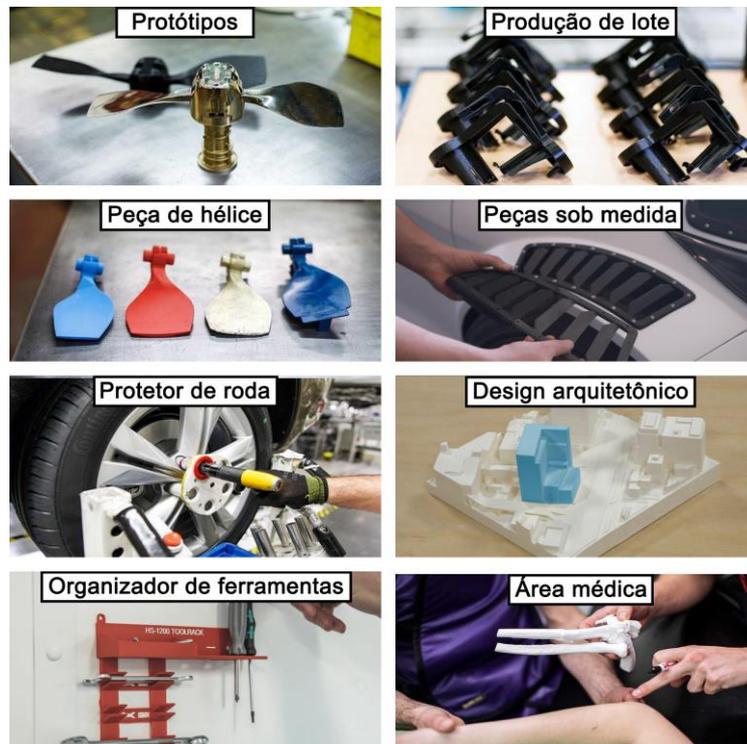
Figura 5 – Aplicações da Manufatura Aditiva



Fonte: Narendran e Perera (2019, com adaptações)

Na Figura 6 podemos ver alguns exemplos de aplicações da Manufatura Aditiva.

Figura 6 – Exemplos de aplicações da Manufatura Aditiva



Fonte: Wishbox (2018, com adaptações)

## 2.2.4 Tipos de impressoras FDM

Existem vários tipos de impressoras FDM, nos próximos tópicos serão apresentados alguns modelos de impressoras 3D.

### 2.2.4.1 Impressora Cartesiana

No mercado de impressão 3D, a maioria das impressoras 3D FDM trabalham com o princípio de sistema de coordenadas cartesianas. Esse sistema de coordenadas é utilizado para localizar um ponto com a ajuda de distâncias nos eixos X, Y e Z. Esse movimento em todas as direções do eixo envolve o movimento do bico de impressão e da mesa de impressão. Na maioria das impressoras FDM, a mesa move-se no eixo Z e o bico de impressão se move na direção X e Y (MARTEL, 2017). A impressora cartesiana pode ser visualizada na Figura 7.

Figura 7 - Representação de uma impressora 3D cartesiana



Fonte: Creality (2017).

No método de Fusão por Deposição de Material, as impressoras cartesianas são as mais utilizadas. Essas impressoras possuem três graus de liberdade, em que os motores se movimentam de forma independente (ABREU, 2017).

#### 2.2.4.2 Impressora CoreXY

Parecidas com as cartesianas, as impressoras Core XY também apresentam volume cúbico, porém a Core XY possui motores nos eixos X e Y que trabalham juntos com um conjunto de polias e correias para posicionar o bico extrusor, essas impressoras movem uma correia em cada eixo para posicionar o bico extrusor, enquanto a plataforma é movimentada para baixo no eixo Z (SHAIK; SCHUSTER; SHAIK, 2021; THOMAZETTI, 2019). A impressora CoreXY está representada na Figura 8.

Figura 8 - Representação de uma impressora 3D CoreXY



Fonte: GT Max 3D (2022)

A mesa de impressão é montada em um sistema de movimento no eixo Z, com hastes roscadas. A mesa de impressão se move para cima e para baixo usando este arranjo, de modo que o bico de impressão possa imprimir as camadas para a parte desejada. Por conter eixos e polias, o núcleo dessas impressoras XY são geralmente em forma de cubo (O'CONNELL, 2020).

### 2.2.4.3 Impressora Delta

As impressoras Delta também seguem o sistema de coordenadas cartesianas. Esse tipo de impressora inclui uma placa de impressão redonda que é conectada a uma extrusora. Essa extrusora é fixa, e sua posição e direção dependem do movimento das três articulações, conforme mostrado na Figura 9, a peça é construída através do movimento das três hastes da impressora que movimentam o bico extrusor seguindo as coordenadas determinadas (DA SILVA, 2018; SHAIK; SCHUSTER; SHAIK, 2021).

Figura 9 - Representação de uma impressora 3D Delta



Fonte: Flsun3D (2022)

Impressoras 3D do tipo delta também trabalham com um sistema de eixos cartesianos, onde para se mover no plano XY, o movimento dos três motores devem estar sincronizados. O movimento de translação é feita verticalmente por três hastes. Esse tipo de impressora delta apresenta como vantagem o aumento da altura de trabalho por meio do aumento do curso das torres, onde as hastes se movimentam (ABREU, 2017).

## 2.3 Materiais de impressão 3D

As impressoras 3D utilizam diversos tipos de matérias, como plásticos, metais, chocolate etc. Mas, no processo FDM normalmente, o material a ser extrudado é um termoplástico, podendo ser o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), o Ácido Poli Lático (PLA), Poli Tereftalato de Etileno Glicol (PETG), Nylon (Ny) e o policarbonato (PC). O ABS e PLA, são comumente usados devido a sua baixa temperatura de fusão, baixo custo e boa resistência (CICALA et al., 2017; TAKAGAKI, 2012; WANG et al., 2017).

Geralmente, o material é vendido no peso na forma de filamentos enrolados em bobinas, onde o filamento possui diâmetro de 1,75 ou 3mm. Os filamentos são utilizados por sua praticidade e baixa necessidade de manutenção, simplificando o sistema de extrusão das impressoras (ABREU, 2017).

### 2.3.1 Filamento ABS

O Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), é um plástico não biodegradável a base de petróleo, amplamente adotado em processos de moldagem por injeção industrial e é muito utilizado na impressão termoplástica, utilizados por diversos fabricantes devido a resistência, durabilidade, segurança e outros aspectos do plástico. A temperatura de impressão do ABS varia de 230 a 250°C (BRESEGHELLO, 2015).

O ABS é um dos materiais mais usados no processo FDM, devido sua temperatura de fusão ser relativamente baixa e por apresentar excelentes propriedades de processamento que facilitam a extrusão do filamento. Além disso, é um polímero amorfo, ou seja, não há estrutura cristalina. Consequentemente, apresenta uma baixa taxa de retração durante o processo de resfriamento, oferecendo uma alta precisão de impressão e constância dimensional (AUMNATE et al., 2018).

O ABS é obtido através da copolimerização entre três monômeros, o acrilonitrila, o butadieno e o estireno, que são materiais de alta resistência mecânica, fácil moldabilidade, bom aspecto superficial e média resistência à temperatura. As propriedades do ABS variam de acordo com a concentração que é utilizada de cada monômero. A acrilonitrila fornece resistência térmica e química, apresenta concentração entre 20 e 30%, já o estireno fornece brilho, moldabilidade e rigidez, apresentando concentrações entre 20 e 60% e por último o Butadieno que fornece resistência ao impacto e alongamento, apresentando concentrações entre 20 e 30% (WIEBECK; HARADA, 2005).

ABS é um dos termoplásticos mais baratos usados para impressão 3D. Apresenta algumas desvantagens do ponto de vista ambiental, por ser um polímero à base de petróleo, é um plástico não biodegradável. Além disso, na impressão com ABS, é liberada uma fumaça que pode ser facilmente inalada, por isso, é recomendado ter algum tipo de ventilação na sala onde o ABS está sendo utilizado. Além do que, o ABS requer uma mesa aquecida na impressora para evitar que a peça deforme (ALZHRANI, 2017).

### **2.3.2 Filamento PLA**

O Poli Ácido Lático (PLA), é um poliéster alifático, termoplástico, semicristalino ou amorfo, produzido a partir do ácido lático derivado de fontes renováveis como milho, trigo e cana-de-açúcar, além de ser um polímero biodegradável, o PLA é um polímero biocompatível e bioabsorvível, apto para interagir com sistemas biológicos e sendo uma alternativa sustentável ao uso de polímeros convencionais, sendo muito mais ecológico do que o ABS. O PLA é mais fácil de ser impresso sendo a temperatura correta de impressão em torno de 200-215°C. Devido a essas qualidades o PLA está sendo usado cada vez mais, em embalagens flexíveis e rígidas, e aplicações mais especializadas como as biomédicas (BRESEGHELLO, 2015; DE ARAÚJO; AGRAWALL; DE MÉLO, 2015).

O PLA apresenta temperatura de fusão por volta de 160°C. Tem bastante similaridade com o poli tereftalato de etileno (PET) que é um dos principais polímeros utilizados pela indústria de embalagens. Possui alta resistência, rigidez, elasticidade, biocompatibilidade, transparência, comportamento termoplástico, mas, é muito frágil e apresenta uma baixa resistência ao impacto (tenacidade). Além disso, é considerado um "polímero verde", porque pode ser obtido a partir de recursos agrícolas renováveis por meio de fermentação e polimerização (DE BARROS, 2011; DE MORAES, 2017).

O PLA apresenta uma limitação, a fragilidade. Portanto, deve ser evitado em peças que requerem resistência mecânica, bem como peças expostas a temperaturas em torno de 60°C ou mais. Com o PLA é mais fácil de entupir o bico do extrusor e seu armazenamento requer muito cuidado, pois o PLA absorve facilmente a umidade do ar, caso ocorra, será necessária uma temperatura de extrusão mais alta (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

Por ser um polímero biodegradável, o PLA é relativamente fácil de usar, e tornou-se um dos materiais mais favoráveis para impressão 3D. Quando comparado com o ABS, o PLA é considerado um produto mais saudável e um material mais seguro para trabalhar, uma

vez que não é tóxico e produz vapores muito mais seguros do que o ABS (ALZHRANI, 2017).

### **2.3.3 Filamento PETG**

Segundo Alzahrani (2017), o poli (tereftalato de etileno) modificado com glicol (PETG) ou PET modificado com glicol foi comprovado como um termoplástico competitivo para impressão 3D por FDM embora não seja tão popular quanto o ABS e o PLA, mencionados anteriormente. Ao contrário do PET, o PETG é um polímero amorfo e, portanto, quando é aquecido mantém sua fase semissólida, tornando-se mais adequado para impressão 3D. Além disso, o PETG é mais durável e resistente ao calor do que o PET.

O PETG apresenta propriedades desejáveis tanto do ABS, por ser resistente e dúctil quanto do PLA por ser um material de fácil impressão. Por outro lado, por algumas razões, a disponibilidade comercial do filamento PETG é significativamente menor do que outros filamentos. Primeiro, ele é relativamente novo para o mercado, fazendo com que muitos usuários prefiram ir com opções mais populares e bem avaliadas, além de exigir temperaturas de impressão mais alta (cerca de 255 ° C) do que outros filamentos (ALZHRANI, 2017).

O PETG é feito de polietileno tereftalato (PET), o mesmo material utilizado nas garrafas plásticas. O PET é enriquecido com glicol, daí que surge a letra “G” após PET. O glicol é adicionado à composição do material durante a polimerização, resultando em um filamento menos quebradiço, mais claro e mais fácil de usar do que sua forma base de PET. Porém, o glicol é um contaminante problemático para instalações de reciclagem, não sendo recomendada a mistura de PET com PETG (FREY, 2021).

Muitas impressoras 3D utilizam PETG ou algum derivado para compor seus componentes estruturais impressos em 3D. Quando usado como um filamento de impressão 3D, o PETG é considerado um filamento durável, mais acessível, fácil de imprimir, com propriedades de impressão relativamente estáveis e com boa resistência (MATTERHACKERS, 2021).

### **2.3.4 Comparativo dos materiais de impressão 3D**

O PETG, é considerado por muitos como o meio termo entre o PLA e o ABS, sendo menos complicado de imprimir do que o ABS e mais durável e flexível do que o PLA. Da mesma forma do PLA, o PETG é higroscópico, portanto, deve ser armazenado em um

local fresco e seco. O PETG é mais fácil de arranhar do que o ABS. De forma geral o PETG é estável, inofensivo, reciclável e não produz fumaça durante a impressão. Necessita de mesa aquecida para a impressão e apresenta temperatura de impressão em torno de 220°C à 250°C (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

O PLA e o PETG, no quesito ecológico, apresentam um alto desempenho, diferente do ABS. Mas, mesmo o ABS não sendo tão sustentável, ele deve ser utilizado para peças que requerem maior durabilidade e resistência mecânica, pois o uso de materiais de baixo ou médio desempenho mecânico não é sustentável, pois devem ser substituídos constantemente, e esse comportamento requer energia e matéria-prima, mesmo que sejam recicláveis (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

A Tabela 2 faz um comparativo das propriedades dos materiais utilizados na impressão 3d.

Tabela 2 – Comparativo das propriedades dos materiais utilizados na impressão 3D

<b>Propriedades</b>	<b>ABS</b>	<b>PLA</b>	<b>PETG</b>
Rigidez/Dureza	Alto	Médio	Alto
Resistência Impactos	Médio	Baixo	Alto
Flexibilidade	Médio	Baixo	Médio
Qualidade Superficial	Baixo	Alto	Alto
Ecológico	Baixo	Alto	Alto
Densidade	Médio	Baixo	Baixo
Temp. de Impressão	Alto	Médio	Alto
Temp. Mesa Aquecida	Alto	Baixo	Médio

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

## 2.4 Parâmetros de impressão 3D

Segundo Divyathej, Varun e Rajeev (2016), as propriedades mecânicas e a qualidade de um objeto impresso em 3D dependem de vários parâmetros. Alguns deles são, a espessura de camada que é adotada para impressão, orientação, temperatura etc. Cada um deles tem sua própria influência sobre o objeto.

Conforme Panda, Raju Bahubalendruni e Biswal (2014), o estudo dos parâmetros de impressão no processo FDM está ganhando atenção entre os pesquisadores, devido a disponibilidade de material que vem limitando o uso da tecnologia, como alguns parâmetros não exercem influência nas propriedades mecânicas, com o ajuste adequado dos parâmetros durante a fase de fabricação é possível melhorar as propriedades do produto.

A influência dos vários parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas das peças é um problema bem conhecido na literatura. Podendo afetar as propriedades mecânicas

causando inconformidades na geometria e no processo de fabricação. (BRISCHETTO; TORRE; FERRO, 2019).

Nos próximos tópicos vamos abordar os principais parâmetros de impressão 3D que tem influência direta sobre a qualidade e resistência final das peças.

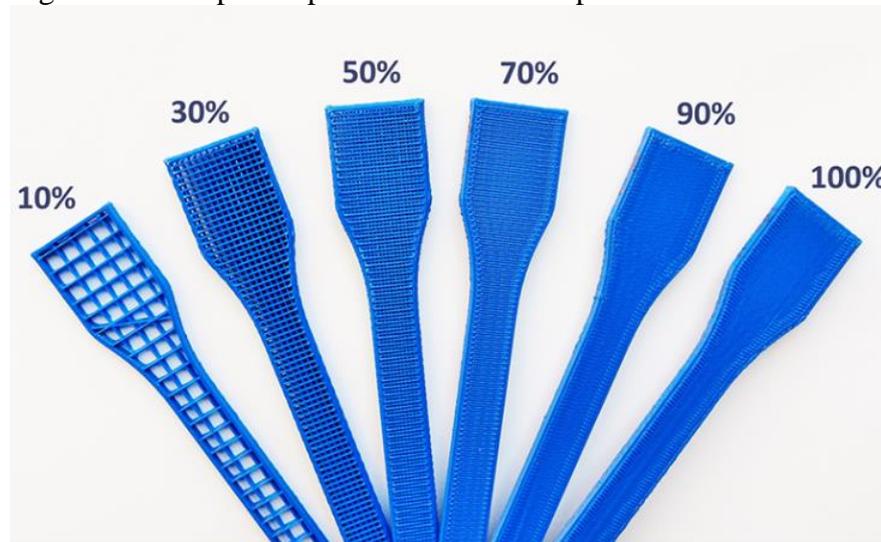
#### **2.4.1 Nível e tipo de preenchimento**

O nível e o tipo de preenchimento são dois dos principais parâmetros que afetam a resistência de uma peça impressa, visto que a aumentar a densidade de preenchimento haverá uma elevação na estrutura e conseqüentemente na resistência do objeto.

Diversos são os objetos que não necessitam ter o seu interior completamente preenchido por um material. Na impressão 3D isso não é diferente, os programas fatiadores utilizam padrões de preenchimento em vez de preencher totalmente o interior de um objeto, esses padrões de preenchimento, preenchem o espaço vazio criando uma estrutura. O nível de preenchimento representa a quantidade de material depositado no interior da peça. (FERNANDES, 2016).

Dizer que um modelo impresso tem um nível de preenchimento de 0%, significa que o objeto está completamente vazio. Já, se o nível de preenchimento for de 100%, significa que o objeto está completamente preenchido por dentro. O preenchimento reforça a estrutura, influência na resistência e peso do objeto final. O nível de preenchimento utilizado em um objeto 3D depende da finalidade do projeto (DE REZENDE MARTINS, 2021). A Figura 10 ilustra algumas variações do nível de preenchimento em um corpo de prova.

Figura 10 – Corpos de prova com níveis de preenchimento variados



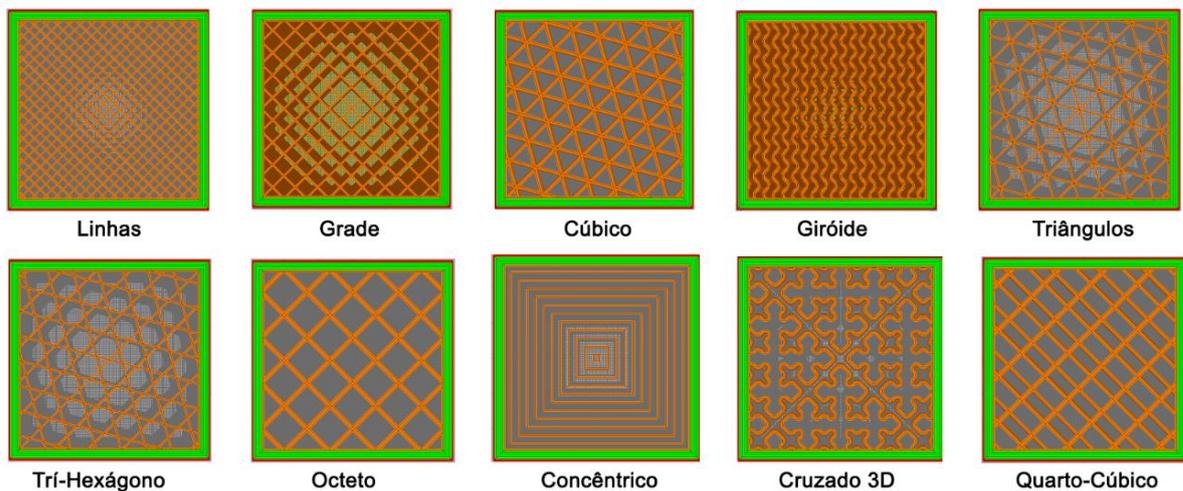
Fonte: 3D Matter (2021)

Como já mencionado anteriormente, na impressão 3D não é necessário que as peças sejam impressas com 100% de preenchimento, Lopes et al. (2018) e Fernandes (2016), afirmam que a utilização de padrões de preenchimento gera economia de material e diminuição do tempo de impressão, sem comprometer a integridade estrutural da peça.

Nos programas fatiadores, o nível de preenchimento é definido como uma porcentagem entre 0 e 100. Esse parâmetro afeta o peso do objeto, o tempo de impressão e o consumo de material. O tipo de preenchimento representa a forma do material e a estrutura dentro de um objeto. Que pode variar de estruturas simples formadas por linhas a formas geométricas mais complexas, os diversos tipos de preenchimento podem afetar o peso, o tempo de impressão e a resistência de uma peça. Alguns padrões de preenchimento são melhores que outros para determinadas funções. (O'CONNELL, 2022).

A Figura 11 ilustra alguns padrões de preenchimento disponibilizados pelo Software Ultimaker Cura.

Figura 11 – Padrões de preenchimento do *Software* Ultimaker Cura®



Fonte: Autor (2022)

A Tabela 3 apresenta características de diversos tipos de preenchimento.

Tabela 3 - Características dos tipos de preenchimento

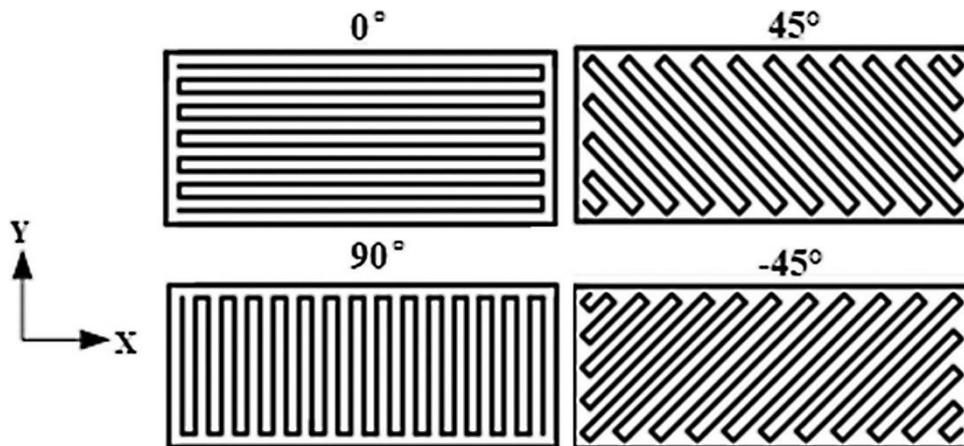
<b>Tipo de preenchimento</b>	<b>Característica</b>
Linhas	Contém linhas impressas em uma direção (ao longo do eixo X ou Y) a cada duas camadas. Este padrão de preenchimento fornece resistência em apenas duas dimensões e é bom para impressões rápidas. O padrão de linhas não usa muito material e mantém o peso bastante leve.
Grade	É semelhante em aparência às linhas, mas em vez de linhas unidirecionais a cada duas camadas, ele contém linhas bidimensionais a cada camada, com o dobro de espaço entre as linhas. Esse padrão fornece força bidimensional, mas ainda é um pouco forte. O padrão de grade consome uma quantidade média de material e leva um tempo médio para ser concluído.
Cúbico	Este padrão produz cubos empilhados, mas como eles são inclinados em 45 graus em torno dos eixos X e Y, eles parecem mais triângulos. O padrão fornece excelente resistência em três dimensões, mas leva um pouco mais de material e tempo do que outros.
Giróide	Inclui curvaturas irregulares côncavas que eventualmente se cruzam. Destina-se a atingir um equilíbrio ideal entre resistência, material e tempo de impressão.
Favo de mel	Esse padrão produz uma estrutura de favo de mel, criando um visual atraente. Esse padrão de preenchimento é bom para impressões semi-rápidas que exigem resistência moderada e não deve consumir muito material.
Triângulos	Parece com linhas triangulares sobrepostas, com linhas indo em três direções no plano XY. Esse padrão de preenchimento fornece resistência apenas em duas dimensões, mas ainda funciona para impressões que precisam ser fortes.
Tri-hexágono	Contém uma variedade de linhas indo em três direções no plano XY, criando padrões hexagonais com triângulos entre eles. Este padrão de preenchimento fornece resistência em duas dimensões e é bastante decente para impressões fortes.
Octeto	É semelhante ao padrão cúbico, mas em vez de aumentar os triângulos inclinados, o padrão se materializa como quadrados. Esse padrão de preenchimento é um padrão tridimensional que não apenas parece ótimo, mas também é útil para peças que exigem resistência.
Concêntrico	É uma estrutura interna composta por linhas concêntricas que correspondem ao contorno de uma peça (ou seja, seus perímetros). Esse padrão é rápido de imprimir, bom para peças flexíveis e consome significativamente menos material do que a maioria dos padrões.

Fonte: O'Connell (2022, com adaptações)

### 2.4.2 Orientação do preenchimento

A orientação do preenchimento determina em qual sentido as linhas de preenchimento vão ficar orientadas. É um parâmetro muito importante, pois ele tem influência direta nas propriedades mecânicas do objeto (SOUSA, 2022). A Figura 12 representa o preenchimento orientado em  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $-45^\circ$ .

Figura 12 – Orientações do preenchimento



Fonte: Liu, Lei e Xing (2019)

Em um estudo realizado por Fernandes (2016), o autor verificou que as orientações de preenchimento de  $0^\circ/90^\circ$  apresentam valores de resistência superiores as orientações de preenchimento de  $45^\circ/-45^\circ$ .

Lovo e Fortulan (2016), fizeram um estudo das propriedades mecânicas de peças impressas em ABS por meio da manufatura aditiva. Nesse estudo os autores variaram a orientação de preenchimento das camadas, utilizando a norma ASTM D638-02a. A orientação  $0^\circ/90^\circ$  apresentou o maior valor de tensão máxima, 32 Mpa, a orientação  $45^\circ/-45^\circ$  apresentou uma tensão máxima de 29 Mpa, enquanto a orientação de  $90^\circ$  apresentou o menor valor de tensão máxima, de 15 Mpa.

### 2.4.3 Temperatura de impressão

A temperatura de impressão é um dos parâmetros mais importantes que devem ser definidos no software utilizado para fatiar o objeto. A temperatura do bico deve ser o primeiro parâmetro a ser ajustado, sempre que for utilizar um novo filamento na impressão. O ajuste da temperatura pode ser realizado imprimindo uma torre de temperatura para ver quais valores se

adequam melhor a situação. Uma temperatura de bico muito alta poderá causar uma extrusão excessiva com bolhas. Por outro lado, uma temperatura muito baixa causará sub extrusão, onde nem todas as camadas são totalmente impressas (O'CONNELL, 2021).

Em altas temperaturas, grande parte dos polímeros se degradam rapidamente, podendo obstruir o bico de impressão ou contaminar o material. Dessa forma, a temperatura dentro da câmara deve ser ajustada para ficar a mais baixa possível, mas ainda possibilitando a extrusão do material. Além do que, com altas temperaturas os objetos resfriam de maneira mais lenta ficando passíveis de erros de forma (CASAGRANDE, 2013).

A Tabela 4 apresenta uma faixa de temperatura de impressão para os materiais mais utilizados na impressão 3D.

Tabela 4 – Faixa de temperatura de impressão para os materiais mais utilizados

<b>Material</b>	<b>Temperatura de impressão (°C)</b>
ABS	220 a 240
PLA	195 a 220
PETG	245 a 260

Fonte: 3DLAB (2019).

#### **2.4.4 Temperatura da mesa de impressão**

A temperatura da mesa é outro parâmetro que pode ser ajustado e afetará a aderência da mesa com o objeto impresso. De modo geral, uma mesa mais quente proporcionará melhor adesão, enquanto uma mesa mais fria pode causar empenamento. Mas, a temperatura não deve ser muito alta, pois pode fazer com que a peça deforme (O'CONNELL, 2021).

A Tabela 5 apresenta as temperaturas que geralmente são utilizadas na mesa de impressão.

Tabela 5 – Faixa de temperatura da mesa de impressão para os materiais mais utilizados

<b>Material</b>	<b>Temperatura da mesa de impressão (°C)</b>
ABS	110
PLA	60
PETG	85

Fonte: 3DLAB (2019).

O resfriamento do polímero após a extrusão pode ocorrer muito rapidamente, podendo ocasionar o empenamento do objeto que está sendo impresso. O empeno é ocasionado devido a contrações não-uniformes do objeto causado no resfriamento. Uma das

formas de minimizar esse problema é utilizando a mesa de impressão aquecida (FERNANDES, 2016).

#### ***2.4.5 Velocidade de impressão***

A velocidade de impressão é a principal configuração de velocidade que influenciará no processo de impressão 3D. Como fica explícito no próprio nome, esse parâmetro determina a rapidez com que os motores da impressora se movem. Isso inclui os motores que controlam os eixos X e Y, bem como o motor extrusor (KONDO, 2021).

A velocidade de impressão está diretamente ligada ao tempo de impressão, e segundo Fernandes (2016), para que as peças impressas apresentem boas resoluções são necessários tempos de impressão maiores, onde se faz necessário fazer um ajuste entre o tempo de impressão e a qualidade final da peça.

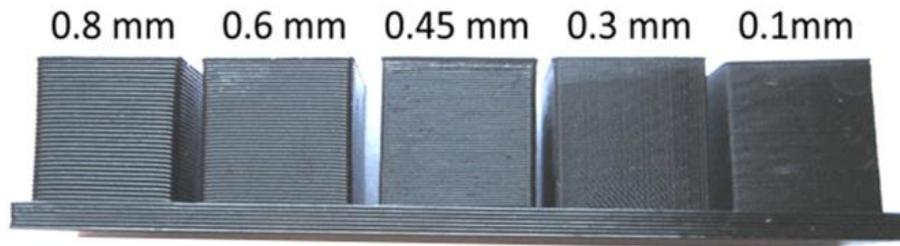
#### ***2.4.6 Altura de camada***

A altura da camada é outro parâmetro de elevada influência, e como o próprio nome diz, se refere à altura de cada camada da impressão. À medida que a altura da camada é diminuída, mais camadas vão ser impressas. Isso significa que a impressora terá mais espaço para fazer pequenos detalhes. Por outro lado, mais camadas geram maiores tempos de impressão e peças mais fracas. Ao definir a altura da camada, é necessário encontrar um equilíbrio adequado entre o tempo de impressão, os detalhes e a resistência da peça (O'CONNELL, 2021).

A quantidade de camadas em que um objeto é dividido relaciona-se com a resolução da impressora, sendo esse um parâmetro que pode ser alterado pelo usuário. Quanto melhor for a resolução da impressora, é possível imprimir peças com uma camada mais baixa, e uma altura de camada baixa fornece um melhor acabamento e fidelidade a peça original. Para escolher a altura de camada, também deve-se levar em consideração o diâmetro do bico extrusor, a espessura do filamento e velocidade de impressão (ABREU, 2017; FERNANDES, 2016).

A Figura 13 apresenta impressões com diversas alturas de camada.

Figura 13 – Variações de altura de camada na impressão 3D

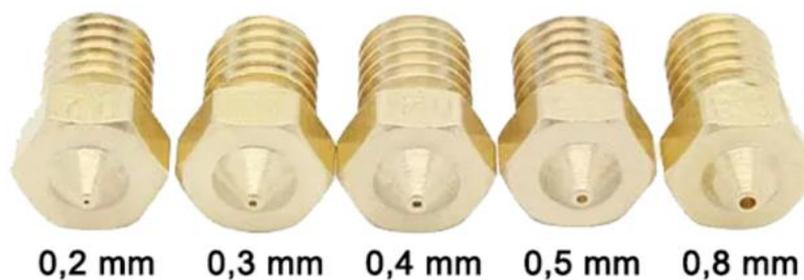


Fonte: Mccollum (2021)

#### 2.4.7 Diâmetro do bico

A forma e o tamanho do filamento extrudado é determinada pelo bico de extrusão. O material é extrudado com maior facilidade e mais rápido quando se utiliza um bico com um diâmetro maior, mas isso pode gerar um produto com baixa precisão, pois o diâmetro do filamento extrudado tem relação direta com a precisão da peça. É indicado que o menor detalhe do objeto que está sendo impresso não seja menor que o diâmetro do bico, pois poderá alterar a resistência da peça. Ainda é indicado que as peças possuam paredes com no mínimo o dobro do valor do diâmetro (CASAGRANDE, 2013). A Figura 14 ilustra bicos de extrusão com diversos diâmetros.

Figura 14 – Bicos de extrusão



Fonte: Acelera3D (2019, com adaptações)

O bico que é normalmente utilizado pela grande maioria dos fornecedores de impressoras 3D é o de 0,4 mm, pois ele fornece uma boa velocidade de produção e uma boa resolução. O bico de 0,4 mm pode imprimir peças com 0,10 mm que garantem mais detalhes na peça, ou com uma altura de 0,30 mm, mas com menores detalhes, porém, com menores tempos de impressão (3DFILA, 2021).

## 2.5 Ensaio de resistência à tração em materiais poliméricos

Segundo Hibbeler (2010), o ensaio de tração é um método experimental usado para determinar a resistência mecânica de um material, ou seja, é determinada a capacidade que um corpo de prova tem de suportar uma carga sem deformação excessiva ou ruptura, esse tipo de ensaio pode ser usado em diversos materiais de engenharia, como polímeros, compósitos, metais e cerâmicas. No ensaio de tração são utilizados corpos de prova de tamanho e forma padronizadas.

Diversas são as propriedades que podem ser obtidas por meio do ensaio de tração, como: resistência à tração, módulo de elasticidade, deformação na ruptura, alongamento no escoamento e ruptura. Essas propriedades podem sofrer variações conforme a velocidade do ensaio, a preparação dos corpos de prova e condições do ambiente de teste. Em materiais poliméricos, utiliza-se o ensaio de tração para caracterização dos materiais e para determinar as propriedades mecânicas. A norma ASTM D638, e a norma ISO 527-1 são equivalentes, e ambas definem as condições necessárias para a realização de testes em polímeros (CARUSO, 2015).

Segundo (PALLAROLAS, 2013) tomando como base os gráficos de tensão-deformação dos polímeros, podemos classificá-los de três formas:

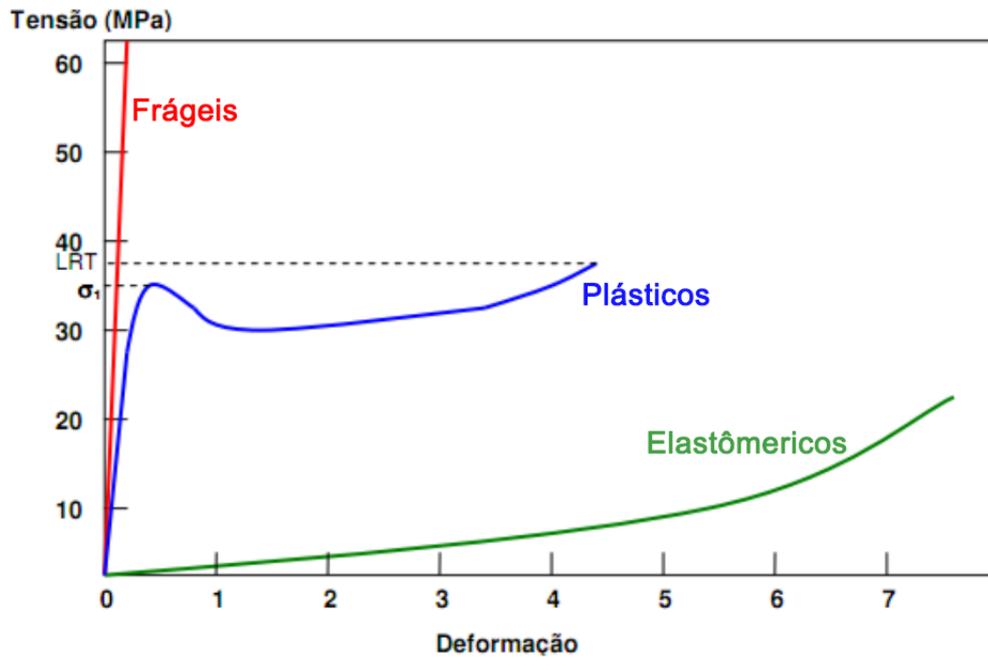
I - Polímeros com comportamento frágil, a fratura ocorre enquanto o polímero se deforma elasticamente.

II - Polímeros com comportamento plástico, o polímero apresenta um comportamento bastante semelhante aos metais possuindo um comportamento dúctil, apresentando uma deformação inicial elástica, posteriormente ocorre um escoamento e em seguida uma deformação plástica até a ruptura.

III - Polímeros com comportamento elástico (elastômericos), nesse polímero a deformação é predominantemente elástica.

A Figura 15 ilustra o comportamento da curva tensão-deformação dos materiais poliméricos.

Figura 15 - Curvas tensão-deformação para polímeros



Fonte: Pallarolas (2013, com adaptações)

Fernandes (2016), analisou a influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA. Nesse estudo, variou-se quatro parâmetros, densidade de preenchimento, temperatura de extrusão, orientação de preenchimento e espessura da camada. O estudo foi realizado em uma Máquina de Testes Universal Instron 3369, seguindo a norma ASTM D638-02a. O autor concluiu que o aumento do nível de preenchimento do corpo de prova acarreta o aumento da resistência do mesmo.

Silva (2019), realizou um estudo dos materiais PLA e ABS impressos a partir da manufatura aditiva. Nesse estudo ele avaliou o comportamento dos materiais PLA e ABS para os níveis de preenchimento de 25%, 50%, 75% e 100% com uma orientação de preenchimento de 45°. Ele observou que com o preenchimento de 100% ocorreu a maior tensão, tanto para o ABS como para o PLA. Na Tabela 6 é possível visualizar os valores de tensão máxima obtidas para cada material.

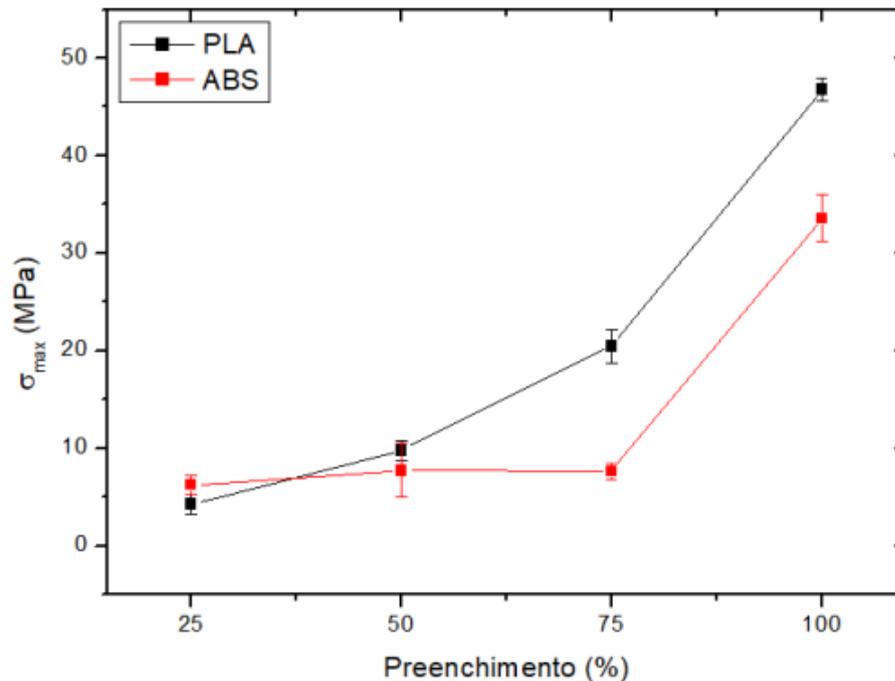
Tabela 6 – Tensões máximas para diferentes preenchimentos e materiais (PLA e ABS)

Preenchimento	25%		50%		75%		100%	
Material	PLA	ABS	PLA	ABS	PLA	ABS	PLA	ABS
$\sigma_{\max}$ (Mpa)	4,273	6,227	9,753	7,71	20,44	7,65	46,759	33,54

Fonte: Silva (2019, com adaptações).

A Figura 16, apresenta o gráfico da tensão máxima para cada nível de preenchimento utilizado, Silva (2019) concluiu que os corpos de prova que possuem um maior nível de preenchimento são os mais resistentes, pois não existe espaços vazios entre as camadas, facilitando a união das camadas.

Figura 16 - Efeito do Nível de preenchimento sobre a tensão máxima



Fonte: Silva (2019)

Galina (2017) realizou um estudo da influência da espessura da camada de impressão 3D nas propriedades mecânicas de peças fabricadas o ABS. Nesse estudo o autor identificou que para as alturas de camadas de 0,25 mm, 0,30 mm, 0,35 mm e 0,40 mm o maior valor de tensão máxima obtido foi de 31,14Mpa, para o corpo de prova com espessura de camada de 0,25 mm.

Tymrak, Kreiger e Pearce (2014) realizaram um estudo para avaliar a resistência à tração e o módulo de elasticidade de corpos de prova impressos a partir do ABS. As amostras

com altura de camada de 0,2 mm tiveram a maior resistência à tração. A partir do ensaio de tração, foi possível obter a resistência à tração média das peças, que foi de 28,50 MPa e módulo de elasticidade de 1,807 GPa.

De Rezende Martins (2021), realizou um estudo com o material PLA, as peças foram impressas com três tipos de preenchimento: Cúbico, Octeto e Giróide. O autor também utilizou três níveis de preenchimento: 25%, 50% e 75%. Foram fabricados 3 corpos de prova para cada nível e tipo diferente de preenchimento seguindo as especificações da norma ASTM D638-02a. O corpo de prova com maior tempo de impressão foi o de preenchimento Giróide com 75% de preenchimento. Com o nível de preenchimento de 25%, o tipo Giróide foi o que apresentou o maior valor de tensão máxima de 12,01Mpa em comparação a 10,18 MPa para o Cúbico e 9,03 Mpa para o Octeto. As amostras com nível de preenchimento de 50% apresentaram os maiores valores de tensão máxima específica [MPa/g], com destaque para o Giróide. Já para o preenchimento de 75% as tensões máximas ficaram valores próximos de 18,65 MPa para Giróide, 18,61 MPa para Octeto e 18,75 MPa para o Cúbico.

### 3 MATERIAIS E METODOLOGIA

#### 3.1 Material e Equipamentos

##### 3.1.1 Filamento de impressão 3D

Os corpos de prova (CPs) foram fabricados em ABS, com 1,75 mm de espessura. Como já mencionado anteriormente, o ABS é um dos filamentos mais utilizados na atualidade, por possuir características, como, ser resistente a impacto, ter boa resistência térmica, ser durável, apresentar facilidade de impressão e possuir baixo custo. A Figura 17 apresenta o filamento ABS utilizado.

Figura 17 – Filamento ABS



Fonte: Autor (2022)

### 3.1.2 Impressora 3D

Foi utilizada a impressora do laboratório da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus Russas. A impressora em questão é uma Core XY, modelo Core H5 da GTMax3d, que possui tecnologia FDM/FFF, assim dizendo, fabricação por filamento fundido, área de impressão (XYZ) de 300 mm x 300 mm x 500 mm e mesa aquecida, podendo chegar até 135 °C. A impressora utilizada pode ser visualizada na Figura 18.

Figura 18 – Impressora Core H5



Fonte: Autor (2022)

### 3.1.3 Equipamento para ensaio de tração

Foi utilizado uma máquina de testes de compressão/tração do laboratório de ensaios mecânicos da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus Russas, Figura 19, fabricada pela EMIC.

Figura 19 – Máquina de ensaios de tração



Fonte: Autor (2022)

### 3.1.4 Equipamentos de medição

Com o intuito de verificar as variações dimensionais e de massas apresentadas pelos CPs impressos, foram utilizados instrumentos adequados para medir com precisão as diversas variações dimensionais existentes entre os corpos de prova. Os equipamentos utilizados pertencem ao laboratório da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus Russas. A Figura 20, ilustra o paquímetro digital Zaas, utilizado para verificar se todos os CPs impressos estavam dentro do padrão dimensional da norma ASTM D638-02a. Já a Figura 21, apresenta a balança eletrônica de precisão da HL-Series, utilizada para averiguar a massa de cada CP.

Figura 20 – Paquímetro digital



Fonte: Autor (2022)

Figura 21 – Balança eletrônica de precisão



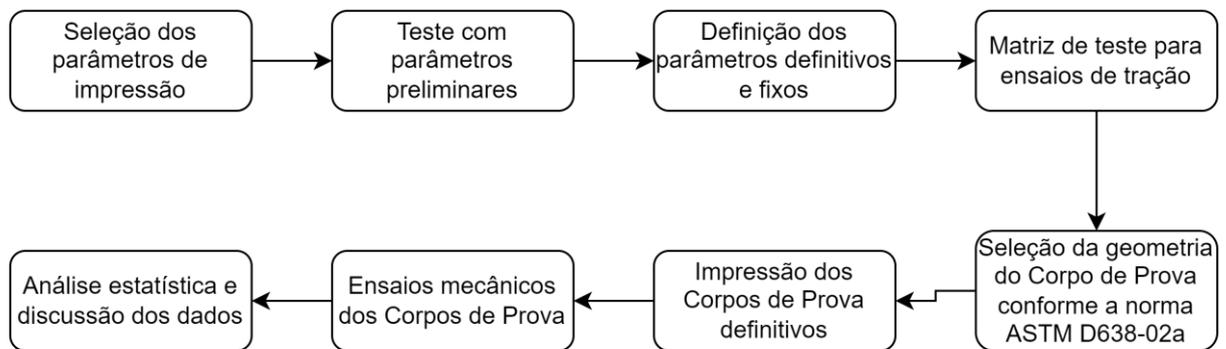
Fonte: Autor (2022)

## 3.2 Metodologia

Neste tópico será explicado como foram definidos os parâmetros de impressão, por meio de parâmetros preliminares, parâmetros definitivos e parâmetros fixos. Será mostrado como foi calculada a quantidade de experimentos, a seleção da geometria e modelagem dos corpos de prova, o procedimento de ensaio de tração e a coleta dos dados.

O fluxograma apresentado abaixo descreve as metodologias adotadas para elaboração de pesquisa, e cada etapa contida no fluxograma será detalhada nos tópicos seguintes a Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma metodológico



Fonte: Autor (2022)

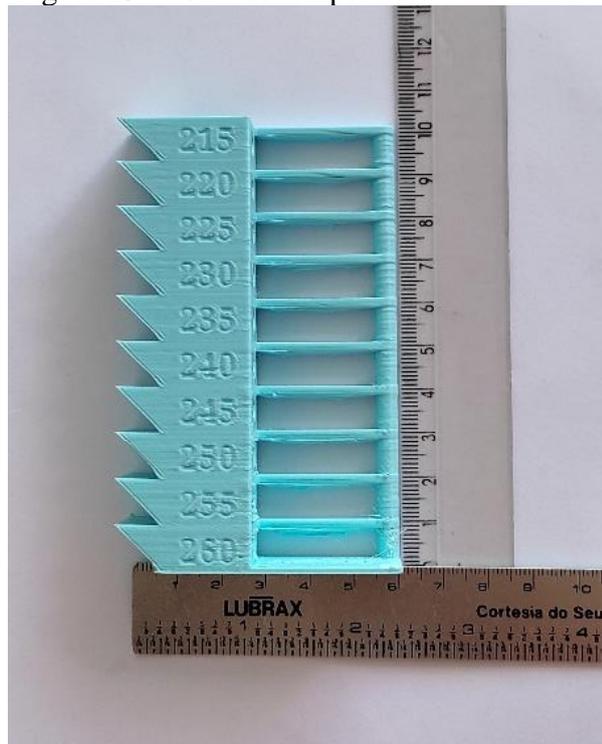
### 3.2.1 Parâmetros de impressão 3D

#### 3.2.1.1 Parâmetros preliminares

Para esse estudo foram selecionados dois parâmetros para análise: nível de preenchimento e tipo de preenchimento. Onde será analisada a influência que esses parâmetros exercem na resistência a tração do corpo de prova impresso utilizando o material ABS.

Foi realizada uma impressão preliminar de uma torre de temperatura, Figura 23, onde foi possível identificar a melhor temperatura para o bico extrusor. Utilizando essa torre de temperatura foi possível verificar como o objeto impresso se comporta para diferentes temperaturas, analisando em qual camada a impressão ficou com uma qualidade melhor, pois, foi feito um ajuste que a cada 10 camadas depositadas de material a temperatura do bico extrusor iria diminuir em 5 °C, quando comparado a temperatura anterior.

Figura 23 - Torre de temperatura



Fonte: Autor (2022)

### 3.2.1.2 Parâmetros definitivos

O número de combinações foi reduzido devido a quantidade limitada de material. Portanto, foram definidas 4 variáveis para cada parâmetro. A Tabela 7 apresenta o valor utilizado para cada parâmetro.

Tabela 7 – Parâmetros definitivos

<b>Preenchimento (%)</b>	<b>Tipo de preenchimento</b>
25	Grade
50	Cúbico
75	Giróide
100	Linha

Fonte: Autor (2022).

### 3.2.1.3 Parâmetros fixos

A Tabela 8 apresenta algum dos demais parâmetros de impressão que permaneceram fixos durante todo processo da pesquisa.

Tabela 8 - Parâmetros fixos

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Altura de camada	0,2	mm
Largura de extrusão	0,5	mm
Velocidade de impressão	40	mm/s
Temperatura de impressão	235	°C
Temperatura da mesa	100	°C
Fluxo	100	%
Orientação do preenchimento	0, 90	°
Camadas superiores / inferiores	5	

Fonte: Autor (2022)

A direção das linhas das camadas superiores e inferiores foram colocadas de maneira que elas ficassem orientadas na direção da força, com o intuito de não gerar influência da resistência em outras direções. Foi definido que todos os CPs teriam a mesma orientação. Para isso a orientação do preenchimento foi definida em [0, 90].

### 3.2.2 Matriz de experimentos

Com os parâmetros determinados, vamos definir a quantidade de experimentos (QE), que é igual a quantidade de combinações possíveis com os parâmetros determinados, e é função do nível de preenchimento (NP) e do tipo de preenchimento (TP). A quantidade de experimentos é expressa pela equação 1.

$$QE = NP * TP \quad (1)$$

Com base na expressão anterior, podemos determinar a quantidade de combinações possíveis que serão impressas de acordo com os parâmetros selecionados, atribuindo os valores a expressão,  $QE = 4 \times 4$ , dessa forma,  $QE = 16$  combinações, que foram nomeadas de  $P_1$  a  $P_{16}$  na matriz experimental para ensaios de tração (Tabela 9). Devido a

quantidade limitada de material, foram fabricados 3 corpos de provas para cada combinação, totalizando 48 corpos de prova fabricados.

Tabela 9 - Matriz experimental para ensaios de tração

<b>Combinação</b>	<b>Nível de preenchimento (%)</b>	<b>Tipo de preenchimento</b>
P1	25	Grade
P2	25	Cúbico
P3	25	Giróide
P4	25	Linhas
P5	50	Grade
P6	50	Cúbico
P7	50	Giróide
P8	50	Linhas
P9	75	Grade
P10	75	Cúbico
P11	75	Giróide
P12	75	Linhas
P13	100	Grade
P14	100	Cúbico
P15	100	Giróide
P16	100	Linhas

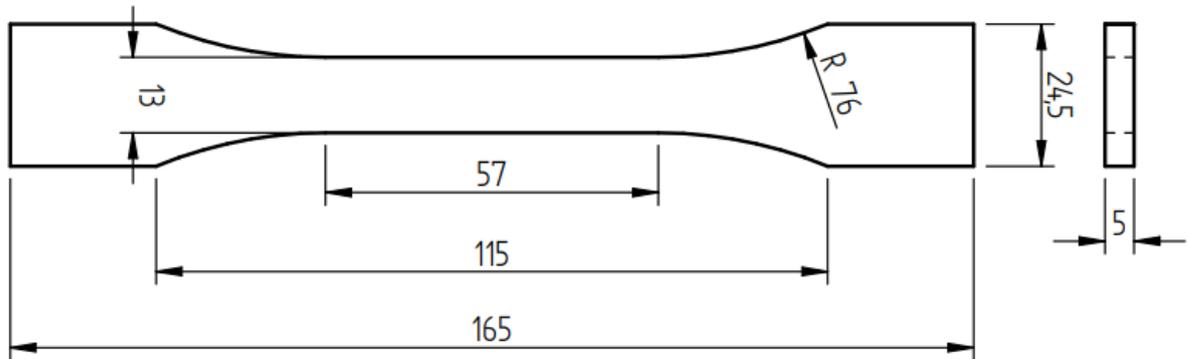
Fonte: Autor (2022)

### 3.2.3 Corpos de prova para ensaio de tração

Os corpos de prova foram modelados de acordo com a norma ASTM D638-02a (ASTM, 2019), para ensaios de tração em plástico, que dispõe de 4 modelos de corpos de prova, cada qual com geometrias distintas. Para os ensaios preliminares foram impressos os tipos I e IV, com o intuito de analisar o comportamento da curva tensão-deformação, para assim escolher o tipo do corpo de prova.

A partir dos ensaios preliminares, optou-se por utilizar o tipo I (Figura 24), que é aplicado para materiais rígidos e semirrígidos com espessura de 7 mm ou menos. Os corpos de prova definitivos foram modelados utilizando o *software* SolidEdge®, onde o arquivo foi exportado no formato *Standard Template Library* - STL, que é o formato utilizado pelos programas fatiadores.

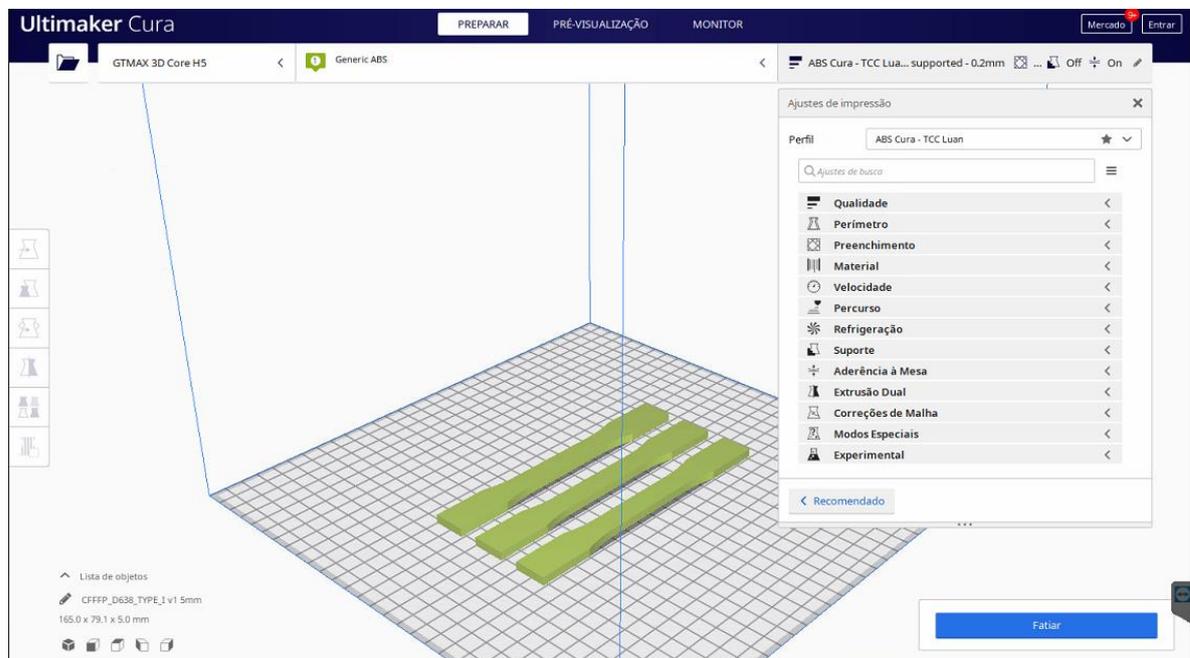
Figura 24 – Corpo de prova segundo a norma ASTM D638-02a (Tipo I)



Fonte: Autor (2021)

O arquivo STL foi inserido no *software* Cura® 4.6.2 (Figura 25), onde também foi realizado o fatiamento dos corpos de prova e inserido os parâmetros definidos. Para este trabalho foi utilizado um perfil personalizado para o uso da impressora Core H5 e do filamento ABS.

Figura 25 - Corpo de prova no software Ultimaker Cura®



Fonte: Autor (2022)

Com isso, os corpos de prova foram exportados no formato G-CODE, formato padrão para a leitura do modelo e suas configurações pela impressora 3D. Em outros termos,

o G-CODE é uma linguagem de programação que ordena a máquina a fazer algo, nesse código está contido quais parâmetros serão utilizados e as coordenadas para onde a máquina deve ir.

Os corpos de prova foram impressos e identificados, onde foi feita uma inspeção visual com o intuito de identificar possíveis defeitos. Não foi identificado nenhum defeito. À medida que os corpos de prova foram impressos, eles foram armazenados hermeticamente com a presença de sílica gel, para que eles não absorvessem umidade do ambiente.

#### ***3.2.4 Procedimento de ensaio de tração***

Após a confecção dos corpos de prova, foram realizados os ensaios de tração na máquina. Para esse ensaio, foi utilizado uma velocidade de 2 mm/min, segundo a norma ASTM D638-02a. Os CPs foram fixados nas garras da máquina de tração, onde as extremidades das garras estão a uma distância (d) de 67,5 mm do centro do corpo de prova.

Os dados do ensaio foram todos salvos em arquivos no formato TXT, onde, posteriormente foram inseridos para serem analisados em um software de estatística utilizando a ferramenta de Análise de Variância (ANOVA), ferramenta que possibilita verificar se as variáveis independentes exercem influência em alguma variável dependente.

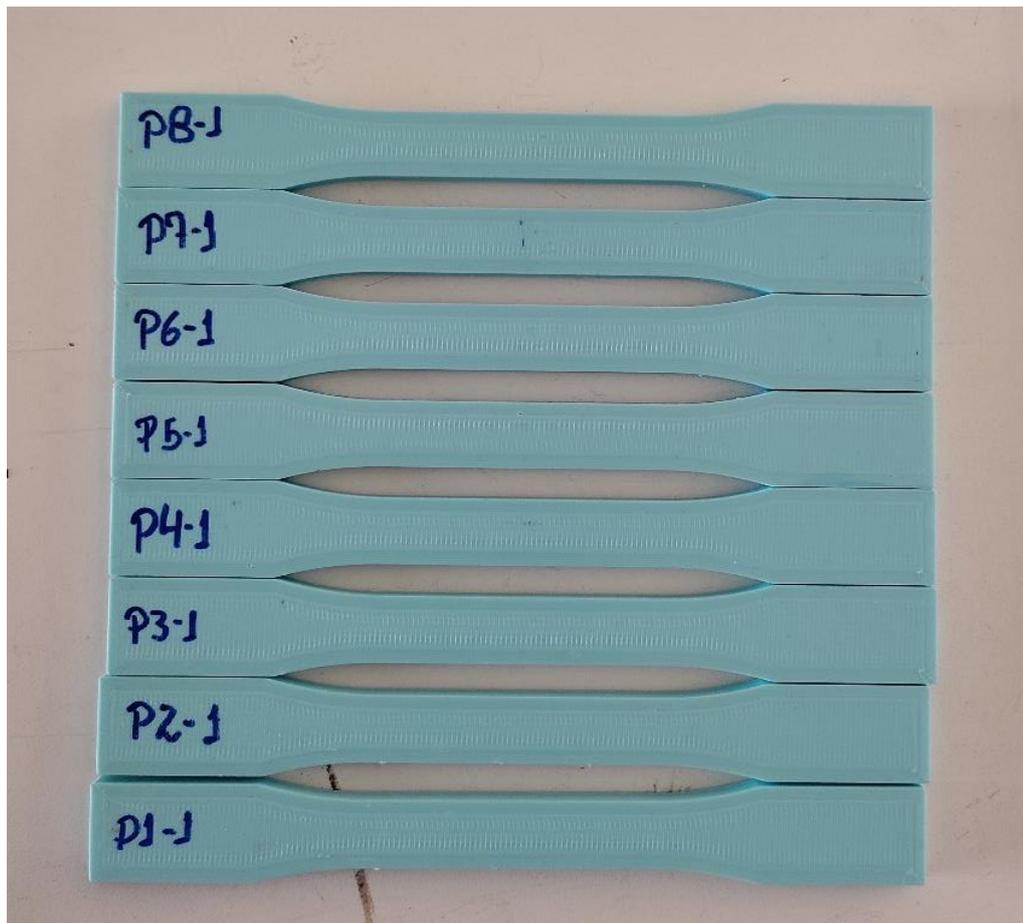
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da ferramenta ANOVA, obtivemos os gráficos necessários para a análise da influência dos parâmetros independentes sobre os parâmetros dependentes. Todos os gráficos obtidos possuem intervalo de confiança de 95%. Neste capítulo também é apresentado as curvas de tensão-deformação de alguns dos corpos de prova que foram ensaiados.

### 4.1 Análise dimensional dos corpos de prova impressos

A Figura 26 abaixo, representa os corpos de prova impressos e identificados.

Figura 26- Corpos de Prova Impressos



Fonte: Autor (2022)

Na Tabela 10, é apresentado as dimensões dos CPs impressos.

Tabela 10 - Dimensões dos CPs impressos

<b>Combinação</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Largura (mm)</b>
P1	5,14 ± 0,04	13,40 ± 0,07
P2	5,07 ± 0,03	13,29 ± 0,10
P3	5,16 ± 0,05	13,22 ± 0,04
P4	5,11 ± 0,04	13,34 ± 0,06
P5	5,11 ± 0,01	13,48 ± 0,01
P6	5,12 ± 0,05	13,42 ± 0,04
P7	5,13 ± 0,03	13,42 ± 0,03
P8	5,11 ± 0,06	13,41 ± 0,02
P9	5,10 ± 0,03	13,46 ± 0,02
P10	5,15 ± 0,05	13,36 ± 0,12
P11	5,09 ± 0,04	13,41 ± 0,07
P12	5,12 ± 0,04	13,40 ± 0,08
P13	5,29 ± 0,03	13,42 ± 0,04
P14	5,27 ± 0,09	13,47 ± 0,01
P15	5,21 ± 0,04	13,37 ± 0,07
P16	5,18 ± 0,05	13,40 ± 0,07

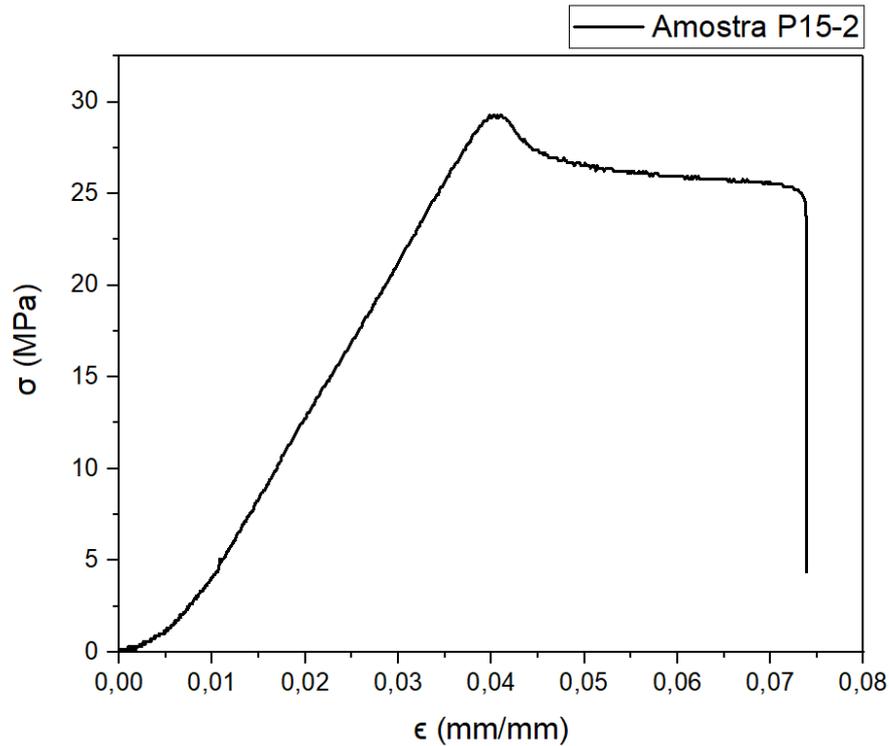
Fonte: Autor (2022)

Analisando a Tabela 10, é possível comprovar que todos os corpos de prova apresentam dimensões apropriadas de acordo com as tolerâncias apresentadas na norma ASTM D638-02a, pois a espessura medida permaneceu dentro do intervalo de  $5 \pm 0,4$  mm e a largura medida permaneceu dentro do intervalo de  $13 \pm 0,5$  mm.

## 4.2 Ensaio de tração

Na Figura 27, é ilustrado o comportamento das curvas tensão-deformação nos corpos de provas impressos em ABS no ensaio de Tração.

Figura 27 - Curva tensão-deformação da combinação impressa



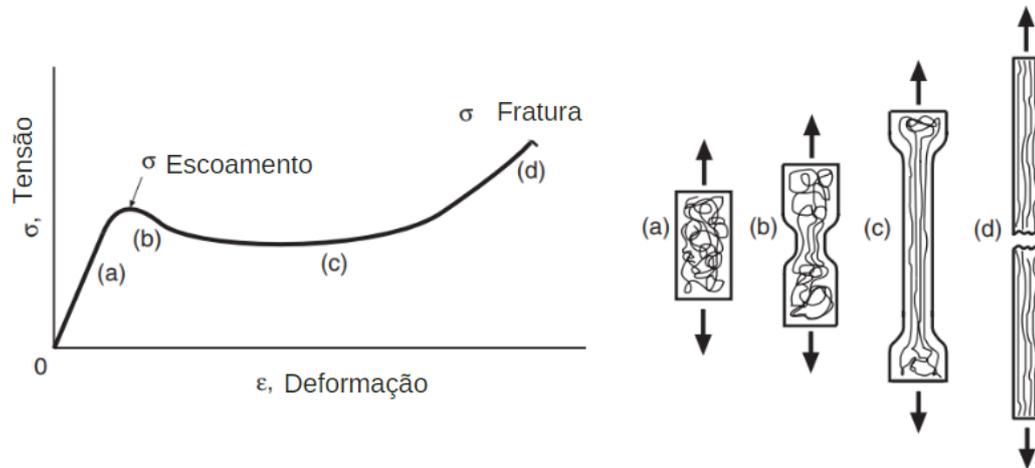
Fonte: Autor (2022)

Por meio da análise da curva tensão deformação da Figura 27, é possível perceber que o corpo de prova sofre uma deformação plástica antes da ruptura. Assim como já foi apresentado na Figura 15, que ilustra as curvas tensão-deformação para polímeros submetidos a ensaios de tração, percebe-se que nas curva tensão-deformação dos polímeros frágeis não há ponto de escoamento. Já nos polímeros dúcteis, fica evidente o ponto de escoamento e a deformação plástica do mesmo. Portanto, podemos afirmar que o ABS é um material dúctil.

Podemos observar na Figura 27, que após o ponto de escoamento, a tensão passou a ter um comportamento praticamente constante, esse comportamento acontece no ensaio de tração de um material polimérico, onde ocorre uma reorganização das cadeias moleculares, que tendem a se desenrolar se alinhando na direção da carga aplicada. Ao longo do ensaio, esse fenômeno perdura com o material se alongando de forma contínua, até que, em um certo ponto, quase todas as cadeias moleculares se alinham de forma anisotrópica. Após esse ponto,

as ligações moleculares primárias que passam a suportar a carga, que continua aumentando, até o ponto da fratura, em que as tensões máximas suportadas pelas ligações moleculares primárias são atingidas (FERNANDES, 2016). Esse comportamento pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 - Curva tensão-deformação de engenharia e geometria de deformação típica de alguns polímeros



Fonte: Dowling (2013, com adaptações)

#### 4.2.1 Análise visual dos corpos de prova

A Figura 29, mostra alguns dos corpos de prova após o ensaio de tração, onde foi feita uma inspeção visual para melhor entender o comportamento das fraturas.

Figura 29 - Corpos de prova ensaiados



Fonte: Autor (2022)

A forma como ocorreu a falha dos corpos de prova também foi observado por Thompson et al. (2019), onde na orientação de preenchimento de  $0^\circ/90^\circ$ , as camadas de preenchimento em  $90^\circ$  tendem a se descolar, aumentando assim, a tensão nas linhas de  $0^\circ$ , a partir da redução da área da seção transversal, fazendo com que as linhas em  $0^\circ$  falhem. A Figura 30 mostra a orientação de preenchimento de  $0^\circ/90^\circ$  com a direção do carregamento aplicada.

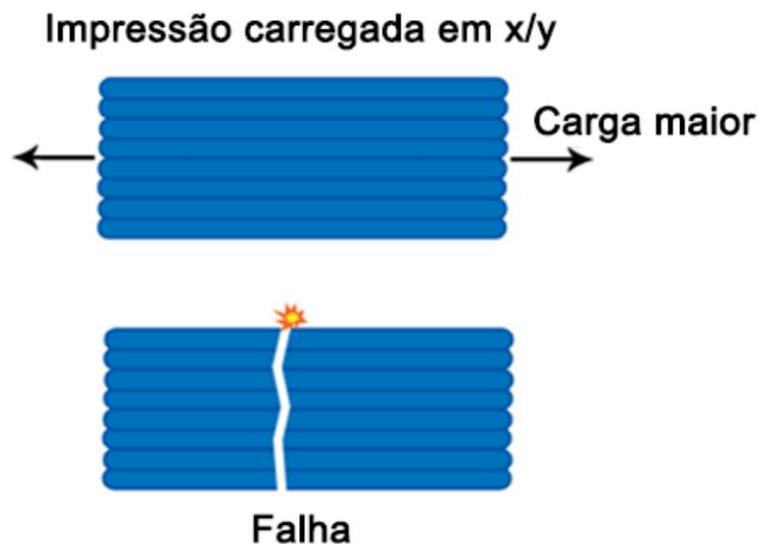
Figura 30 - Orientação de preenchimento de  $0^\circ/90^\circ$  com a direção do carregamento aplicada



Fonte: Thompson et al. (2019, com adaptações)

Com isso, o comportamento da fratura do corpo de prova tende a ser de maneira perpendicular a aplicação da força, como pode ser observado na Figura 31.

Figura 31 - Fratura do CP perpendicular a aplicação da força



Fonte: Thompson et al. (2019, com adaptações)

Analisando a Figura 29, é possível perceber uma variação no ponto de falha dos CPs, Lee e Huang (2013) também observaram essa variação. Segundo os autores, um corpo de prova homogêneo falhará diretamente no meio, onde a tensão é mais alta. Mas, em seus resultados, eles mostraram que o ponto de falha variou ao longo de todo o comprimento da parte útil do corpo de prova. Pois a impressão desses corpos de prova resultou em falhas que atuaram como concentrações de tensões e o perfil de falha foi influenciado diretamente pela orientação de preenchimento.

#### 4.2.2 Limite de resistência à tração

Com ensaio de tração dos corpos de prova foi possível coletar os dados de força aplicada e alongamento resultante durante todo o período do ensaio. Com isso, foi possível determinar os valores do limite de resistência à tração (LRT). Na Tabela 11, é possível visualizar os valores do limite de resistência à tração de cada combinação, como também os intervalos de confiança.

Tabela 11 - Matriz experimental do LRT

Combinação	Nível de preenchimento (%)	Tipo de preenchimento	Limite de resistência à tração (MPa)
P1	25	Grade	21,31 ± 0,3
P2	25	Cúbico	22,45 ± 0,41
P3	25	Giróide	22,17 ± 0,58
P4	25	Linhas	21,94 ± 0,27
P5	50	Grade	23,19 ± 0,31
P6	50	Cúbico	23,95 ± 0,27
P7	50	Giróide	23,29 ± 0,26
P8	50	Linhas	24,27 ± 0,34
P9	75	Grade	24,56 ± 0,67
P10	75	Cúbico	26,79 ± 0,32
P11	75	Giróide	27,92 ± 0,51
P12	75	Linhas	26,65 ± 0,81
P13	100	Grade	28,02 ± 0,69
P14	100	Cúbico	28,37 ± 0,54
P15	100	Giróide	29,53 ± 0,51
P16	100	Linhas	28,36 ± 0,57

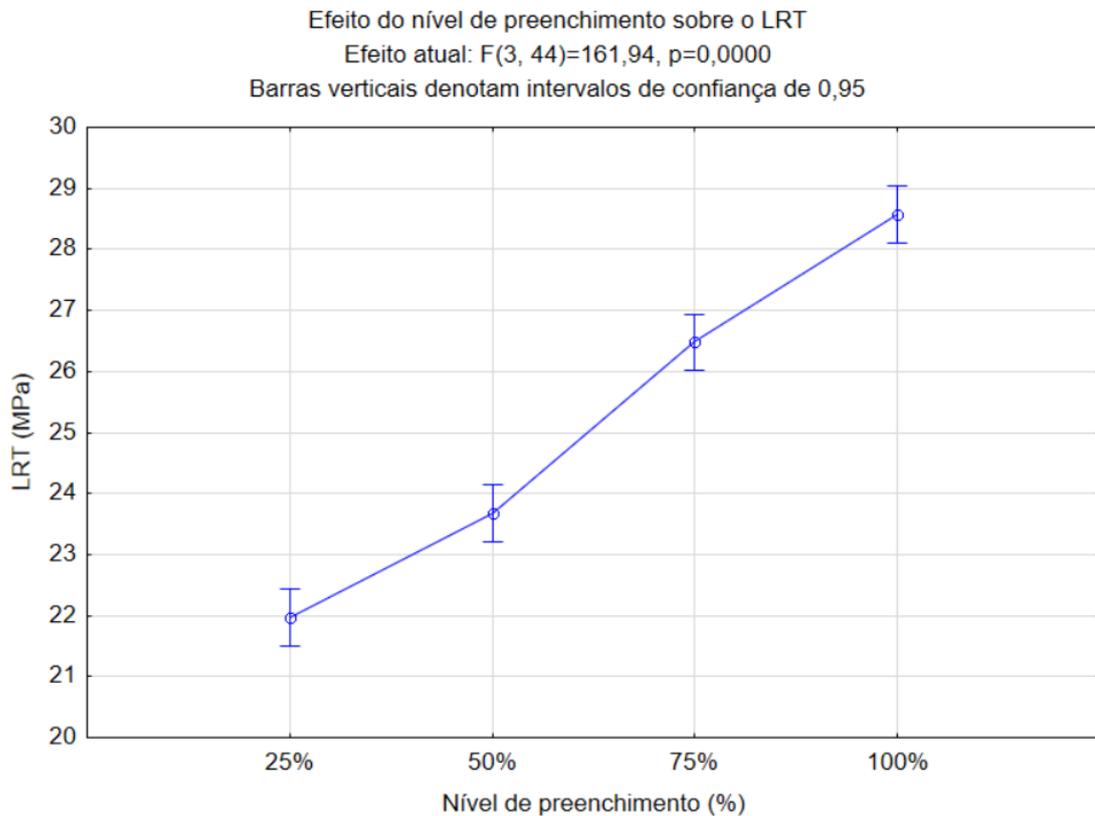
Fonte: Autor (2022)

Analisando a Tabela 11 é possível determinar que a combinação P15 que possui nível de preenchimento de 100% e tipo de preenchimento Giróide, apresentou um LRT médio

de 29,53 MPa, que se configurou como o maior limite de resistência a tração entre as combinações. Em contrapartida, a combinação P1 que possui nível de preenchimento de 25% e tipo de preenchimento Grade, obteve o menor LRT médio entre todas as combinações de 21,31 MPa. Por meio da matriz experimental, percebe-se que o nível de preenchimento foi o principal parâmetro que influenciou na resistência dos corpos de prova, já que, com o aumento do nível de preenchimento houve o aumento do LRT médio, efeito esse que será visualizado na Figura 32.

Através da ferramenta ANOVA, pode-se quantizar a influência de cada parâmetro alterado sobre o LRT, que serão apresentadas nas próximas figuras.

Figura 32 – Efeito do nível de preenchimento sobre o LRT



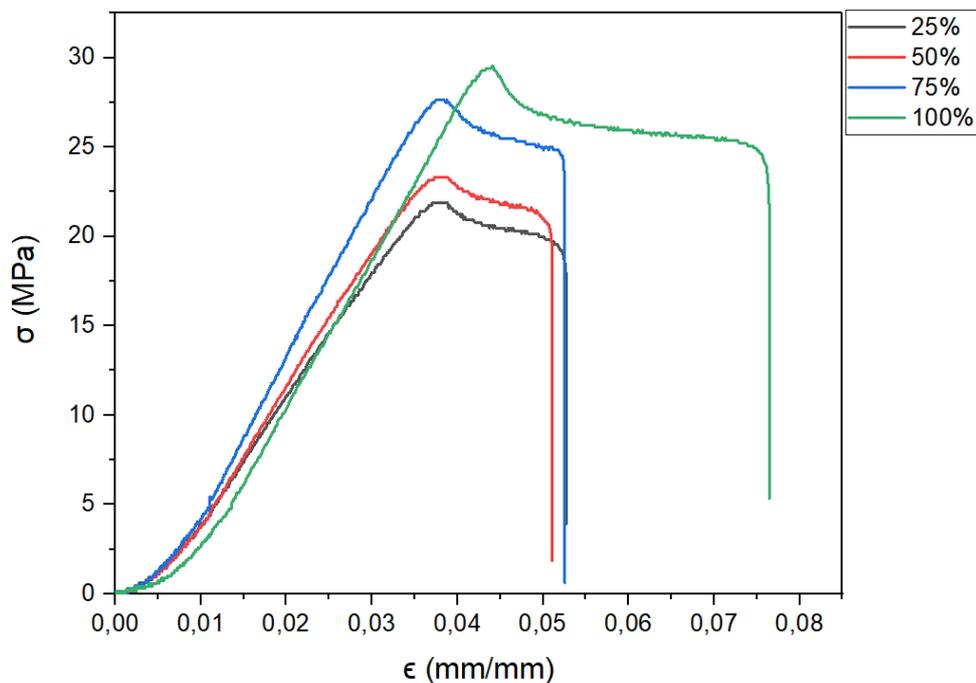
Fonte: Autor (2022)

Por meio da análise da Figura 32, é possível afirmar que o nível de preenchimento é um parâmetro que exerce elevada influência sobre o LRT, pois é perceptível o aumento significativo que o LRT apresentou com o aumento do nível de preenchimento. Visto que, quanto maior a quantidade de material é depositado no corpo de prova, maior será sua resistência. Estatisticamente, no teste de variância o  $P \ll 0,05$  e  $F > 1$ , confirmando a significância do parâmetro.

Corroborando com os resultados obtidos, Fernandez-Vicente et al. (2016), confirmou que um nível mais alto de preenchimento resultou em uma menor quantidade de vazios no preenchimento e, conseqüentemente, uma maior resistência à tração. Onde, o autor identificou que o maior valor de resistência a tração foi encontrado para o nível de preenchimento de 100%. O autor observou que de 20% a 50% o valor aumenta, mas a variação é mais significativa entre 50% e 100%.

Na Figura 33, é possível observar as curvas tensão-deformação para as combinações com níveis de preenchimento de 25%, 50%, 75% e 100%.

Figura 33 - Curva tensão-deformação para os diferentes níveis de preenchimentos estudados.

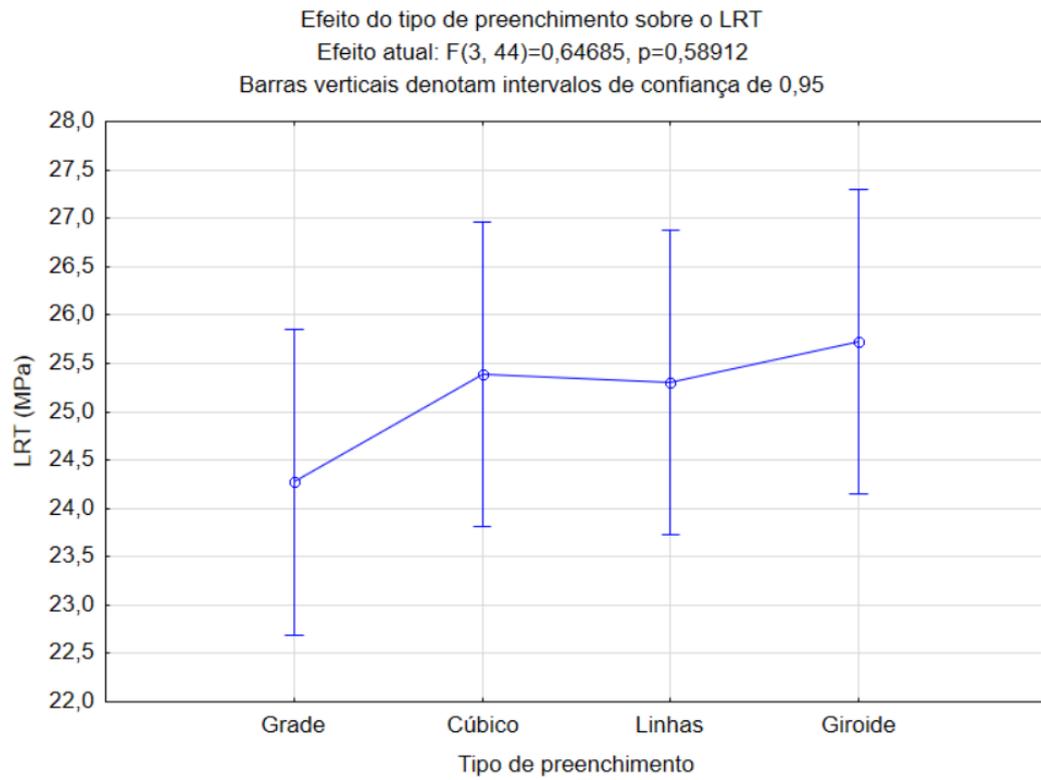


Fonte: Autor (2022)

Por meio da Figura 33, observa-se que as amostras romperam de forma dúctil para todos os níveis de preenchimento, onde é possível observar também o comportamento das curvas tensão-deformação para cada nível de preenchimento e comprovar que as combinações com maior nível de preenchimento são as que possuem maior resistência.

Uma redução na porcentagem de preenchimento significará uma redução na área da seção transversal do plástico. Portanto, como regra geral, uma porcentagem de preenchimento menor significa uma força de resistência menor, assumindo que as demais propriedades da impressão sejam as mesmas. E a magnitude dessa diminuição dependerá do tipo de preenchimento usado (THOMPSON et al., 2019).

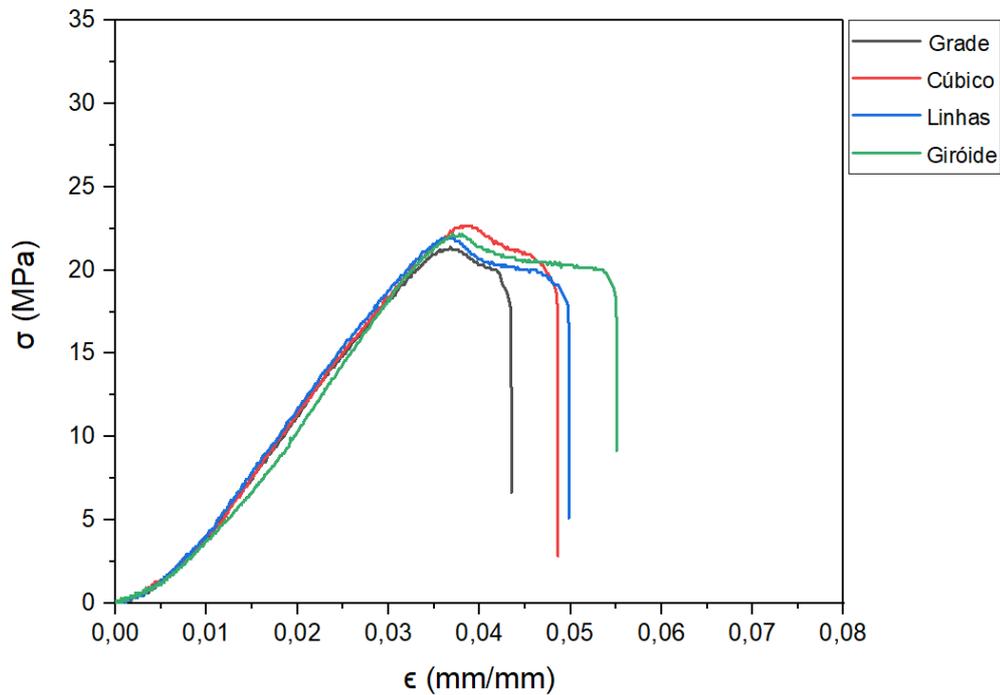
Figura 34 – Efeito do tipo de preenchimento sobre o LRT



Fonte: Autor (2022)

O tipo de preenchimento não apresentou efeitos significativos sobre o LRT, como observado na Figura 34. Mesmo não apresentando resultados significativos, percebe-se que o tipo Grade foi o que apresentou menor desempenho dentre os quatro tipos de preenchimento estudados. O comportamento da curva tensão-deformação é apresentado na Figura 35.

Figura 35 - Curva tensão-deformação para os diferentes tipos de preenchimentos estudados.



Fonte: Autor (2022)

Por meio da Figura 35, percebe-se que os CPs apresentam uma fase elástica semelhante e diferem na fase plástica. Nessa figura, fica mais evidente como o tipo Grade apresentou o menor LRT dentre os quatro tipos. É possível observar também que as tensões de escoamento, resistência à tração e ruptura são similares quando considerado o mesmo nível de preenchimento.

### 4.2.3 Alongamento na ruptura

Na Tabela 12 é possível visualizar os valores médios de alongamento de cada combinação, como também os intervalos de confiança.

Tabela 12 - Matriz experimental do alongamento na ruptura

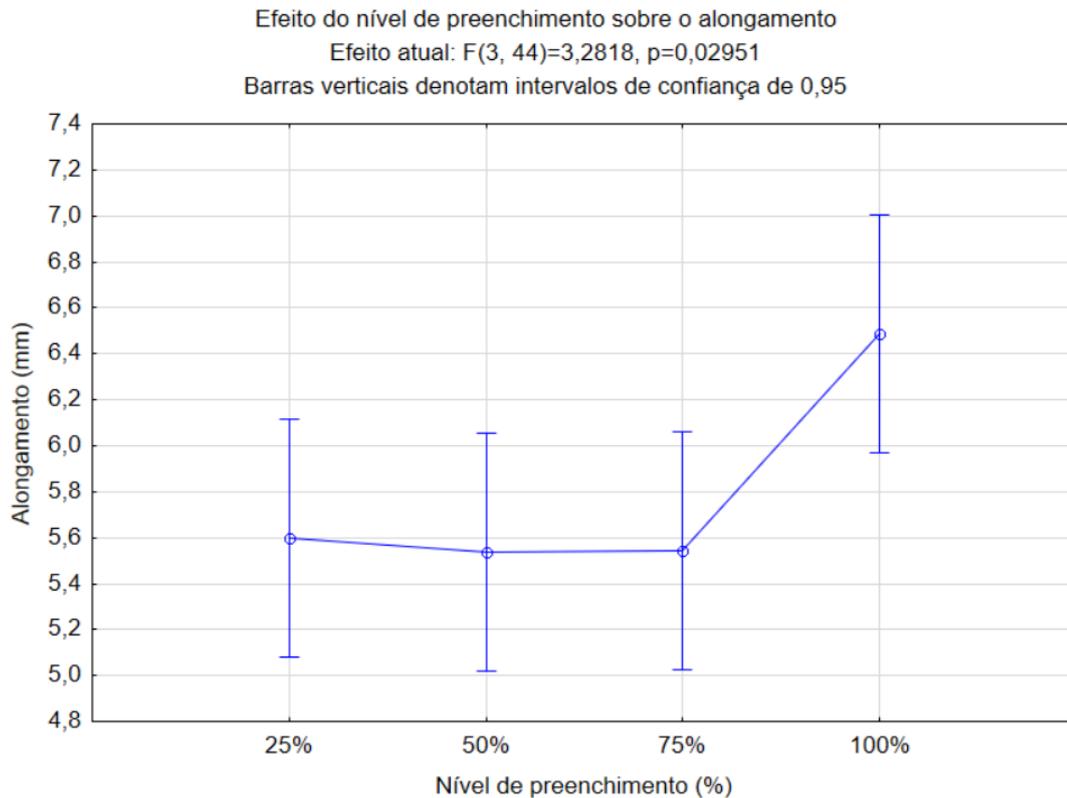
Combinação	Nível de preenchimento (%)	Tipo de preenchimento	Alongamento na ruptura (mm)
P1	25	Grade	5,09 ± 0,24
P2	25	Cúbico	5,38 ± 0,42
P3	25	Giróide	6,4 ± 0,79
P4	25	Linhas	5,51 ± 0,4
P5	50	Grade	4,41 ± 0,3
P6	50	Cúbico	5,54 ± 0,78
P7	50	Giróide	5,73 ± 0,65
P8	50	Linhas	6,46 ± 0,71
P9	75	Grade	4,72 ± 0,18
P10	75	Cúbico	5,97 ± 0,11
P11	75	Giróide	5,91 ± 0,33
P12	75	Linhas	5,58 ± 0,03
P13	100	Grade	4,76 ± 0,35
P14	100	Cúbico	6,63 ± 1,18
P15	100	Giróide	7,95 ± 2,47
P16	100	Linhas	6,6 ± 1,97

Fonte: Autor (2022)

Por meio da Tabela 12, é possível averiguar que a combinação P15 apresentou o maior alongamento entre todas as combinações estudadas. Com nível de preenchimento de 100% e tipo de preenchimento Giróide, a combinação apresentou um valor médio de 7,95 mm de alongamento até a ruptura. Em contrapartida, a combinação P5, com nível de preenchimento de 50% e tipo de preenchimento Grade, obteve o menor valor de alongamento entre todas as combinações, com um alongamento de 4,41 mm até a ruptura.

Por meio da ANOVA, é possível analisar a influência que os parâmetros estudados exercem sobre o alongamento do corpo de prova estudado quando submetido ao ensaio de tração. A Figura 36 apresenta o efeito do nível de preenchimento sobre o alongamento.

Figura 36 – Efeito do nível de preenchimento sobre o alongamento



Fonte: Autor (2022)

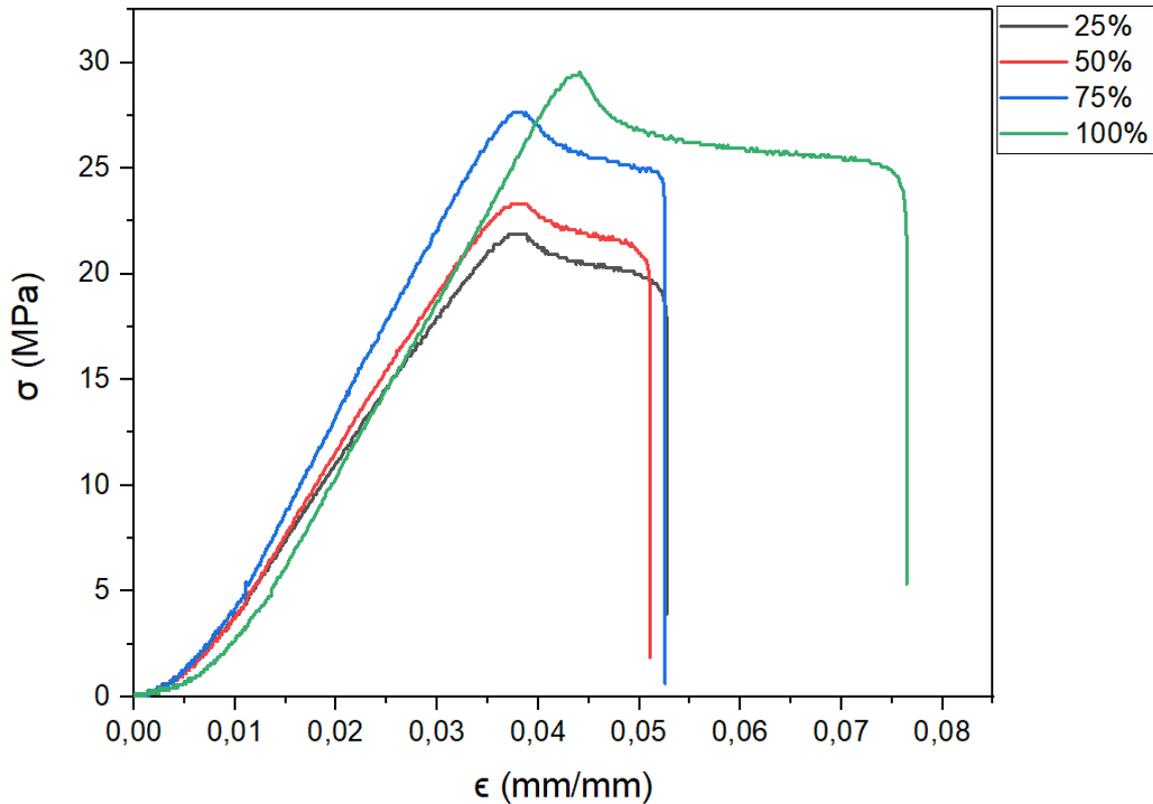
Por meio da análise da Figura 36, é possível identificar que a combinação com 100% de preenchimento se destacou dentre as demais, apresentando maiores valores de alongamento, sendo um resultado considerado significativo, pois  $P < 0,05$ . Já as combinações com 25%, 50% e 75% apresentaram um alongamento semelhante, e inferior ao de 100%. Esse comportamento pode ser explicado por meio do nível de preenchimento, onde, com a densidade de 100%, os espaços vazios no interior do CP são quase inexistentes, acarretando uma maior capacidade de deformação do objeto.

Corroborando com os dados obtidos, Sousa (2022), ao fazer a análise dos seus resultados identificou que o nível de preenchimento foi o parâmetro que teve maior influência no alongamento, o aumento do nível de preenchimento de 50% para 100% foi estatisticamente significativo, onde a combinação com 100% de preenchimento obteve um maior alongamento. Segundo o autor, o aumento da porcentagem de preenchimento gera uma maior capacidade de deformação, devido a maior aderência entre as camadas.

Para Fernandez-Vicente et al. (2016), à capacidade das fibras de preenchimento de se deformar e absorver o estresse antes a uma ruptura nas ligações entre as diferentes fibras aumenta à medida que a densidade também aumenta.

Na Figura 37 é possível visualizar a curva tensão-deformação para os 4 níveis de preenchimento estudado.

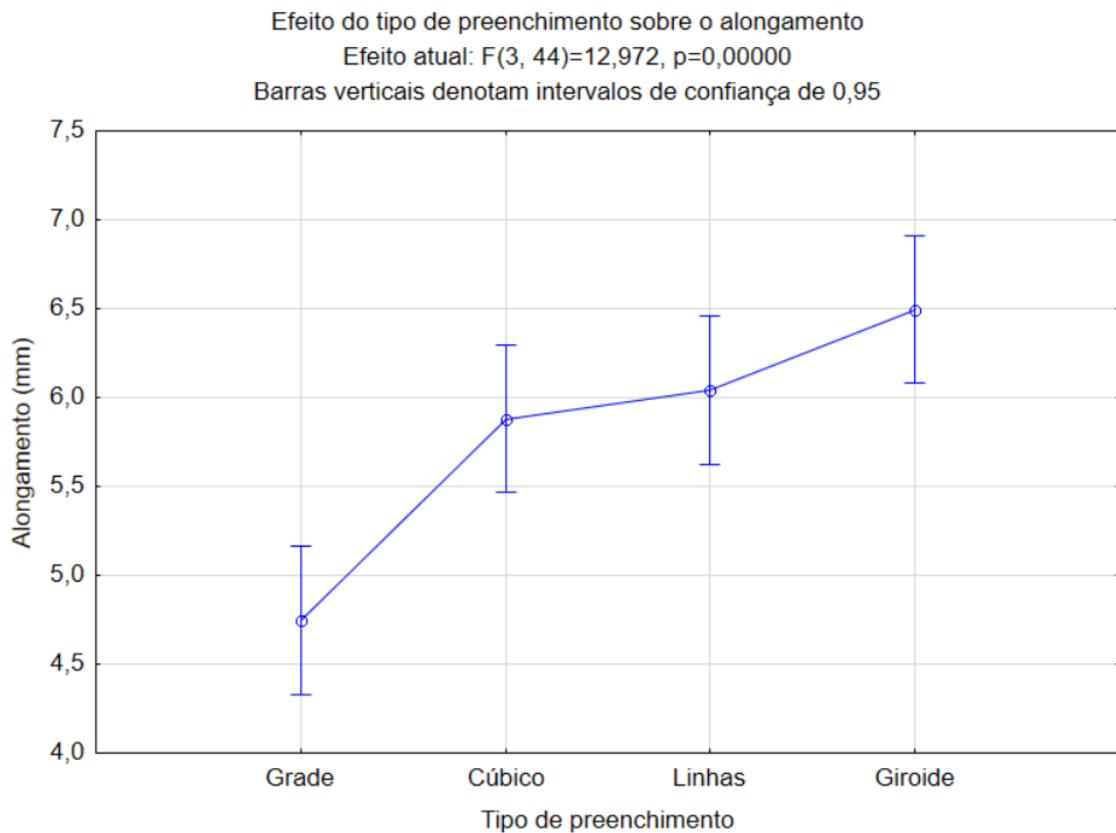
Figura 37 - Curva tensão-deformação para os diferentes níveis de preenchimentos estudados



Fonte: Autor (2022)

Por meio da Figura 37, é possível perceber com maior clareza a diferença do alongamento para os diferentes níveis de preenchimento como apresentado na Figura 36. Analisando a curva tensão-deformação percebe-se que para os níveis de 25%, 50% e 75%, os corpos de prova apresentam um comportamento semelhante, onde a ruptura ocorre aproximadamente no mesmo ponto, e conseqüentemente os valores de alongamento entre eles são bastante similares. Já os corpos de prova com 100% apresentaram um maior alongamento, levando a conclusão de que eles são mais dúcteis.

Figura 38 – Efeito do tipo de preenchimento sobre o alongamento



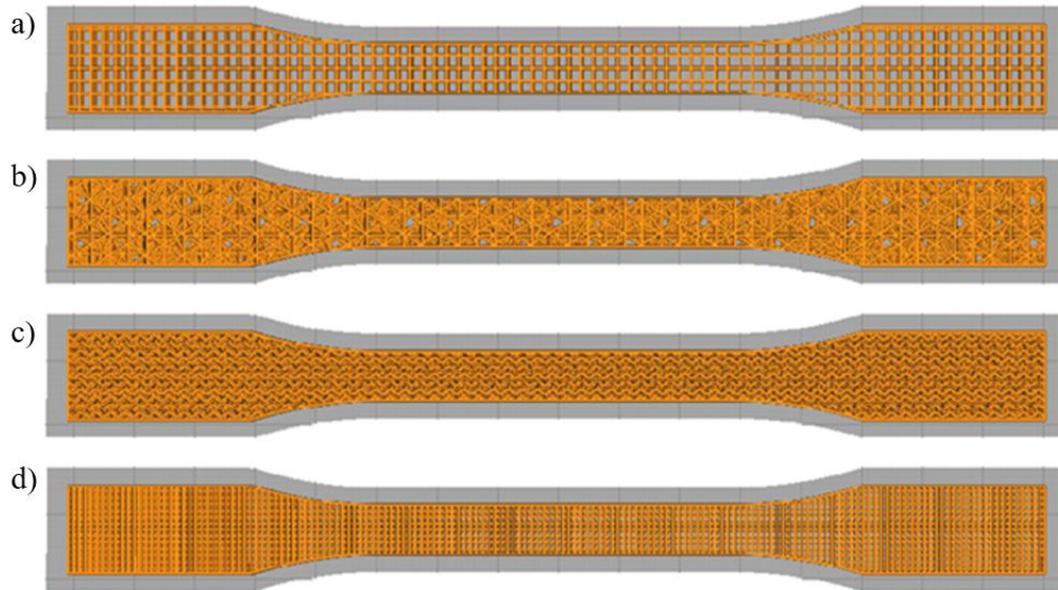
Fonte: Autor (2022)

Por meio da análise da Figura 38, é possível identificar que a combinação com tipo de preenchimento Grade apresentou o pior desempenho entre os padrões estudados, apresentando os menores valores de alongamento, sendo um resultado considerado significativo, pois  $P \ll 0,05$ . Já as combinações com o tipo de preenchimento Cúbico, Linhas e Giróide apresentaram um alongamento semelhante, com uma leve tendência de aumento nos valores de alongamento, onde o Giróide apresentou os maiores intervalos de confiança.

De Rezende Martins (2021), explica que o maior alongamento do padrão de preenchimento Giróide antes da ruptura, acontece devido a forma de ondas que o padrão apresenta, que comporta-se feito uma mola quando submetido a tensões trativas.

A Figura 39 mostra quatro corpos de prova com os tipos de preenchimento Grade, Cúbico, Giróide e Linhas, respectivamente.

Figura 39 – Corpos de prova com os tipos de preenchimentos estudados: a) Preenchimento Grade; b) Preenchimento Cúbico; c) Preenchimento Giróide; d) Preenchimento Linhas.



Fonte: Autor (2022)

Como já citado anteriormente, O'Connell (2022) afirma que visualmente o tipo Grade é semelhante ao tipo Linhas, só que diferente do tipo Linhas que apresenta linhas unidirecionais a cada duas camadas, o tipo Grade apresenta linhas bidimensionais a cada camada, com o dobro de espaço entre as linhas, como pode ser observado na Figura 39. Lima e Santos (2018), mostraram que com o aumento da porcentagem de preenchimento dos corpos de prova, o valor do alongamento dos corpos de prova aumentou.

Diante disso, o menor alongamento na ruptura apresentado pelo tipo Grade pode estar atrelado a presença de mais espaços vazios em relação aos outros tipos de preenchimento, quando compara ao tipo Linhas, por exemplo, ele possui o dobro de espaço entre as linhas. Em consequência disso, o tipo de preenchimento grade apresenta uma menor área da seção transversal para suportar as forças de tração para o mesmo nível de preenchimento, onde os esforços não são distribuídos de maneira muito eficiente em relação aos outros tipos de preenchimento. Para Khan et al. (2018), uma melhor distribuição de força entre a superfície do padrão interno do objeto gera uma maior capacidade de deformação. A Figura 40, mostra a seção transversal dos corpos de prova ensaiados para o mesmo nível de preenchimento.

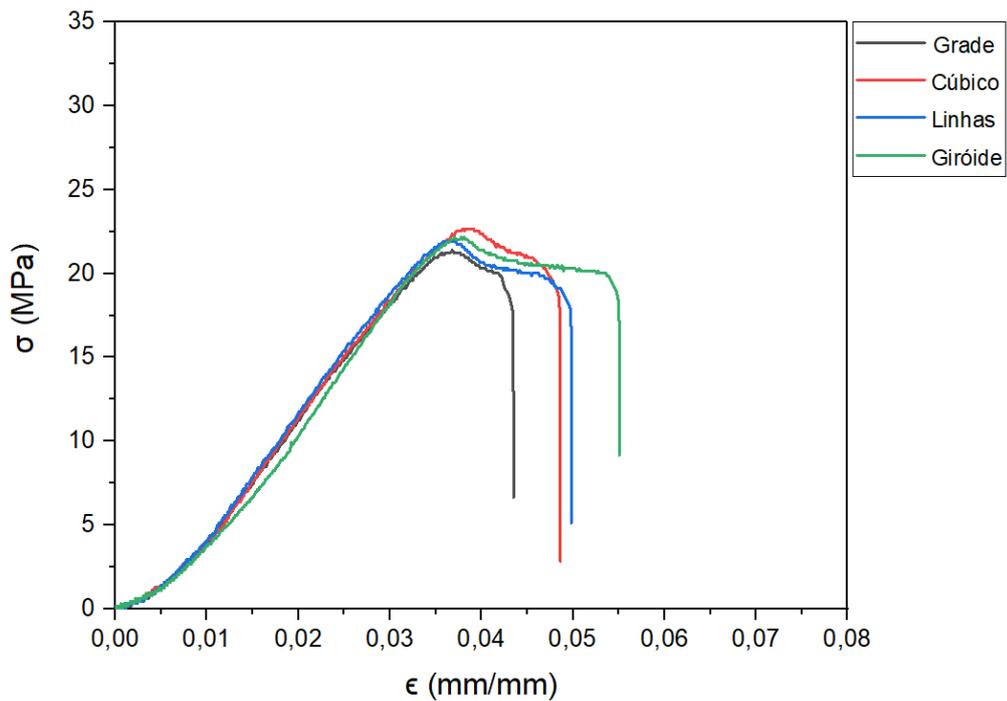
Figura 40 – Efeito do tipo de preenchimento na seção transversal dos corpos de prova: a) Preenchimento Grade; b) Preenchimento Cúbico; c) Preenchimento Giróide; d) Preenchimento Linhas.



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 41, é possível visualizar a curva tensão-deformação para os 4 tipos de preenchimento estudados.

Figura 41 - Curva tensão-deformação para os diferentes tipos de preenchimentos estudados



Fonte: Autor (2022)

Visualizando a Figura 41, é possível perceber o comportamento do alongamento para os diferentes tipos de preenchimento. Visualizando a figura, fica mais evidente o baixo desempenho do padrão Grade em termos de alongamento, onde podemos averiguar que este tipo de preenchimento foi o que apresentou menor ductilidade, onde a fratura ocorreu pouco depois do limite de escoamento. Percebe-se também, que o padrão Giróide se destacou em relação aos outros tipos, apresentando um maior alongamento.

### 4.3 Tempo de impressão

O tempo de impressão para cada combinação e seus respectivos intervalos de confiança estão representados na Tabela 13.

Tabela 13 - Matriz experimental do tempo de impressão

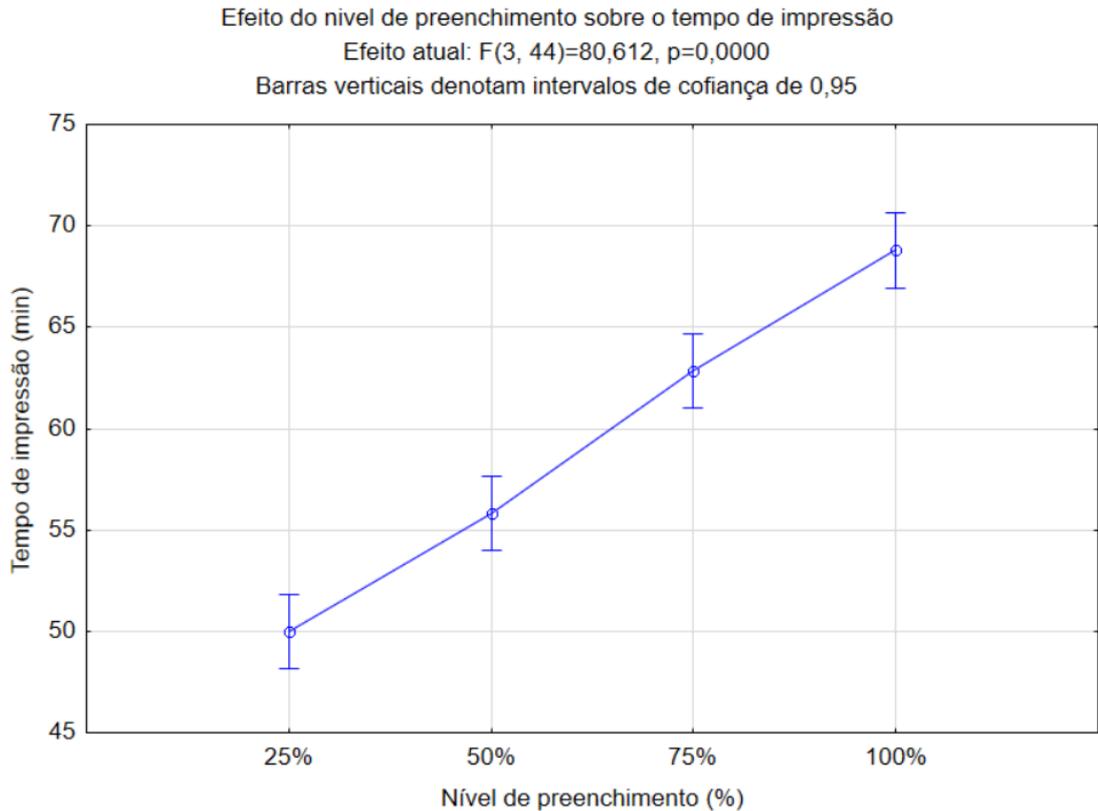
<b>Combinação</b>	<b>Nível de preenchimento (%)</b>	<b>Tipo de preenchimento</b>	<b>Tempo de impressão (min)</b>
P1	25	Grade	148,58
P2	25	Cúbico	151,20
P3	25	Giróide	150,13
P4	25	Linhas	149,75
P5	50	Grade	167,85
P6	50	Cúbico	165,53
P7	50	Giróide	170,92
P8	50	Linhas	165,88
P9	75	Grade	184,85
P10	75	Cúbico	180,75
P11	75	Giróide	205,50
P12	75	Linhas	183,00
P13	100	Grade	196,93
P14	100	Cúbico	197,28
P15	100	Giróide	232,40
P16	100	Linhas	198,87

Fonte: Autor (2022)

Por meio da Tabela 13, é possível verificar que a combinação P15 apresentou o maior tempo de impressão entre todas as combinações estudadas. Com nível de preenchimento de 100% e tipo de preenchimento Giróide, a combinação levou cerca de 232,4 minutos para ser impressa. Já a combinação P1 apresentou o menos tempo de impressão entre todas as combinações estudadas. Com nível de preenchimento de 25% e tipo de preenchimento Grade, levou cerca de 148,5 minutos para ser impressa. Por meio da Matriz, é perceptível a influência dos parâmetros no tempo de impressão.

Por meio da ANOVA, é possível analisar a influência que os parâmetros exercem sobre o tempo de impressão dos corpos de prova. A Figura 42 apresenta o efeito do nível de preenchimento sobre o tempo de impressão.

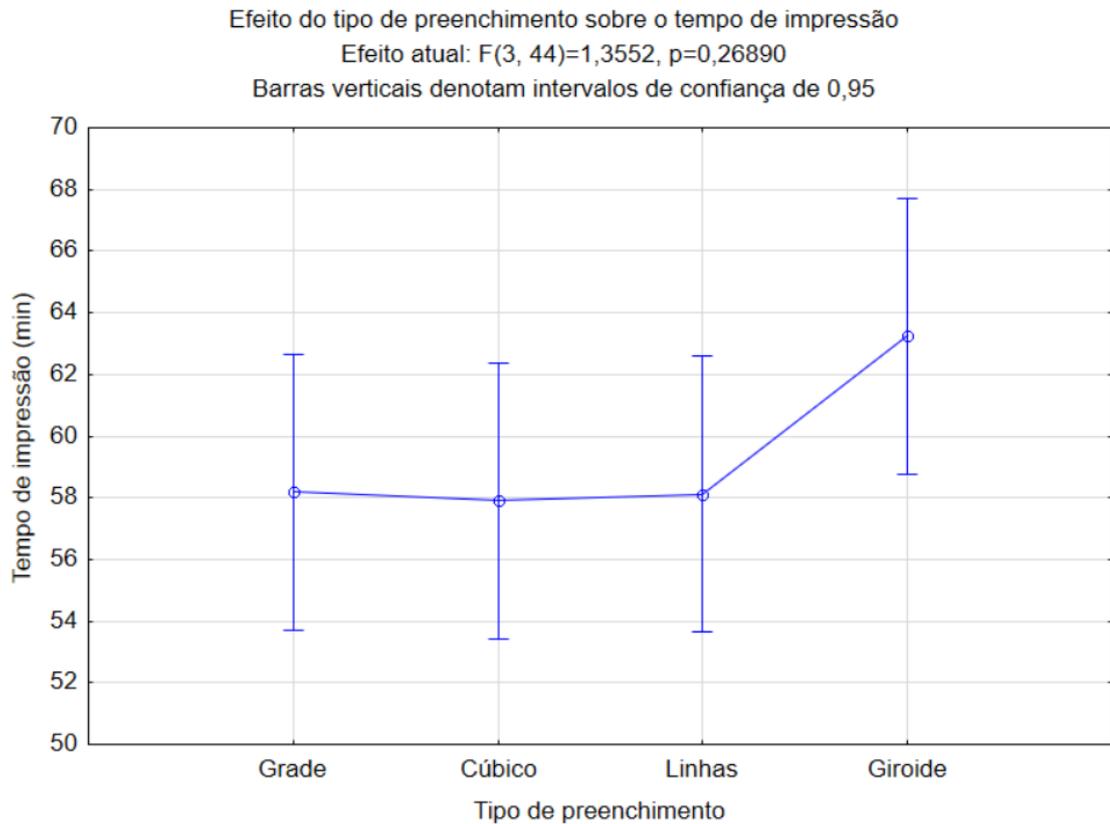
Figura 42 - Efeito do nível de preenchimento sobre o tempo de impressão



Fonte: Autor (2022)

Estatisticamente, dentre os parâmetros estudados o nível de preenchimento foi o que apresentou maior significância, pois foi encontrado um  $P \ll 0,05$ . É perceptível que o tempo de impressão é proporcional ao nível de preenchimento, visto que, ao aumentar o nível de preenchimento, mais material será depositado, ocasionando um maior tempo de impressão. A influência do nível de preenchimento sobre o tempo de impressão já era esperada, visto que, após a etapa fatiamento no software Cura® 4.6.2, uma estimativa de tempo de impressão sempre era gerada e ficava explícito o aumento do tempo de impressão com o aumento do nível de preenchimento.

Figura 43 - Efeito do tipo de preenchimento sobre o tempo de impressão



Fonte: Autor (2022)

Analisando a Figura 43, podemos perceber que o tipo de preenchimento não apresentou efeitos significantes sobre o tempo de impressão dos corpos de prova, pois  $P < 0,05$ . Mas já era esperado que o tipo de preenchimento Giróide apresentasse maiores tempos de impressão, visto que, após a etapa fatiamento no *software* Cura® 4.6.2, o Giróide sempre apresentou uma estimativa de tempo de impressão maior que os outros tipos estudados.

O fator que pode ter ocasionado um maior tempo de impressão do Giróide é a sua forma mais complexa com padrão ondulado, fazendo com que a impressora percorra um maior percurso para produzir o padrão. Corroborando com essa ideia, De Rezende Martins (2021), afirma que o Giróide é um preenchimento muito semelhante a ondas no eixo X e Y, e demanda um tempo de impressão elevado devido as várias mudanças de direção que o cabeçote realiza.

#### 4.4 Massa dos corpos de prova

Na Tabela 14 é possível visualizar os valores médios da massa de cada combinação, como também os seus respectivos intervalos de confiança.

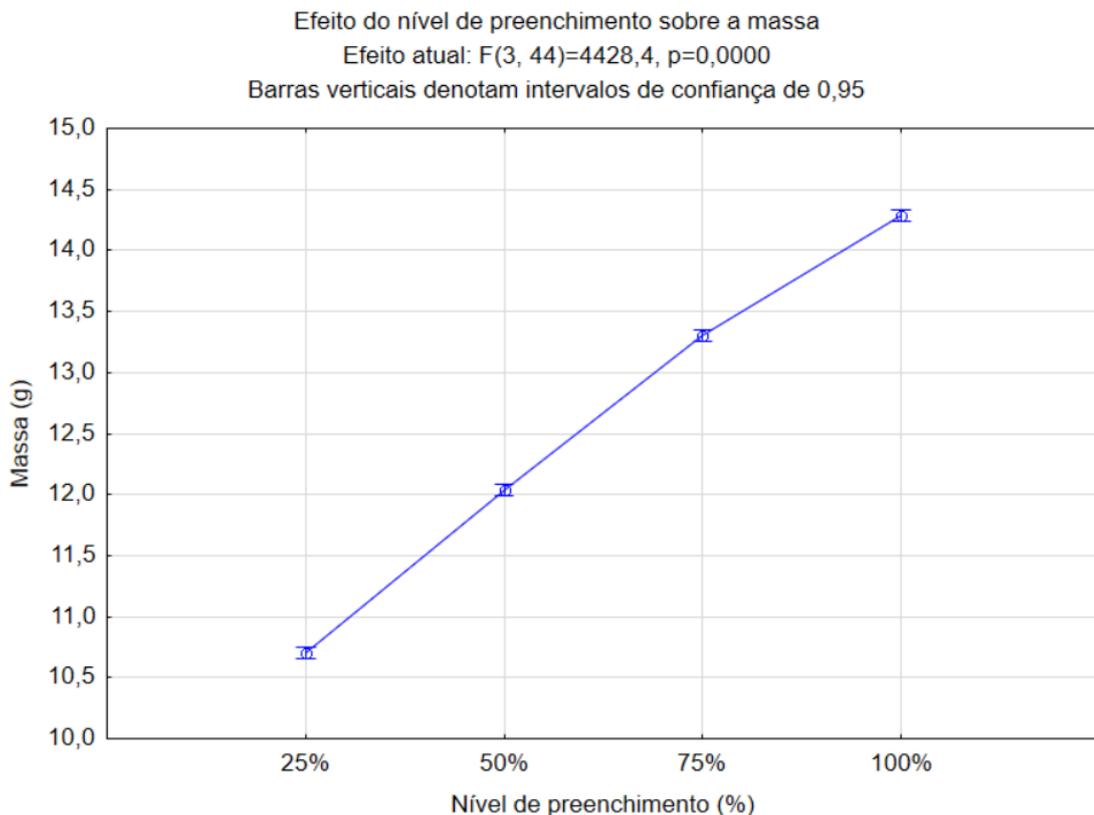
Tabela 14 - Matriz experimental da massa do corpo de prova

<b>Combinação</b>	<b>Nível de preenchimento (%)</b>	<b>Tipo de preenchimento</b>	<b>Massa (g)</b>
P1	25	Grade	10,62 ± 0,05
P2	25	Cúbico	10,74 ± 0,03
P3	25	Giróide	10,73 ± 0,06
P4	25	Linhas	10,74 ± 0,04
P5	50	Grade	11,96 ± 0,02
P6	50	Cúbico	12,06 ± 0,07
P7	50	Giróide	12,07 ± 0,11
P8	50	Linhas	12,08 ± 0,09
P9	75	Grade	13,19 ± 0,06
P10	75	Cúbico	13,2 ± 0,07
P11	75	Giróide	13,42 ± 0,1
P12	75	Linhas	13,38 ± 0,03
P13	100	Grade	14,27 ± 0,07
P14	100	Cúbico	14,39 ± 0,13
P15	100	Giróide	14,21 ± 0,07
P16	100	Linhas	14,3 ± 0,11

Fonte: Autor (2022)

Por meio da Tabela 14, é possível verificar que combinação P14 apresentou a maior massa média entre todas as combinações estudadas. Com nível de preenchimento de 100% e tipo de preenchimento cúbico, a combinação apresentou uma massa média de aproximadamente 14,39g. Já a combinação P1 apresentou a menor massa média entre todas as combinações estudadas. Com nível de preenchimento de 25% e tipo de preenchimento Grade, apresentou uma massa média de aproximadamente 10,62g. Percebe-se por meio da matriz que o nível de preenchimento causa influência na massa do corpo de prova.

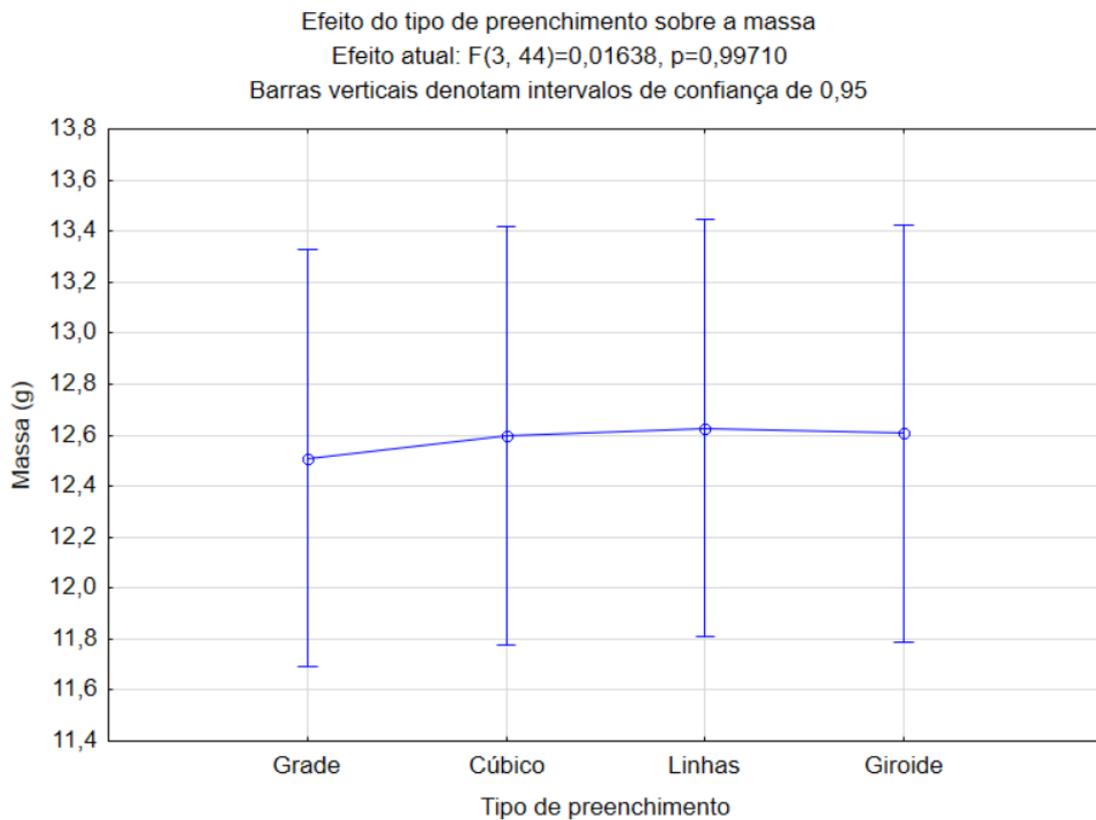
Figura 44 - Efeito do nível de preenchimento sobre a massa



Fonte: Autor (2022)

Dentre os parâmetros estudados, percebemos por meio da Figura 44, que o nível de preenchimento é o que apresenta maior influência na massa dos corpos de prova. Estatisticamente, o nível de preenchimento é muito significativo, pois, foi encontrado um  $P \ll 0,05$ . A influência do nível de preenchimento sobre a massa pode ser explicada de forma simples, pois quanto mais material é depositado (aumento do nível de preenchimento) mais pesado será o objeto. Através do *software* Cura® 4.6.2 já tinha sido gerado uma estimativa do peso de cada combinação, e essa influência do nível de preenchimento sobre a massa já era esperada, visto que, após a etapa fatiamento foi perceptível o aumento da massa com o aumento da porcentagem de preenchimento.

Figura 45 - Efeito do tipo de preenchimento sobre a massa



Fonte: Autor (2022)

Como podemos constatar pela Figura 45, o tipo de preenchimento não apresentou efeitos significativos sobre a massa das combinações, visto que os intervalos de confiança não apresentam grandes modificações com a alteração do tipo de preenchimento. Além do que, o valor de  $P \gg 0,05$ .

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve o objetivo de verificar a influência do nível e tipo de preenchimento no limite de resistência à tração, alongamento na ruptura, no tempo de impressão e na massa do material utilizado nos corpos de prova impressos em ABS pelo processo FDM.

Por meio dos dados e discussões apresentados nesse trabalho, pode-se concluir que:

O limite de resistência à tração é influenciado diretamente pelo nível de preenchimento, visto que, com o aumento do nível de preenchimento dos corpos de prova, o limite de resistência à tração dos corpos de prova aumentou. Em contrapartida, estatisticamente, o tipo de preenchimento não apresentou efeitos significativos sobre o limite de resistência à tração dos corpos de prova.

No alongamento na ruptura, ficou evidente que o nível de preenchimento de 100% se destacou em relação aos demais, enquanto os níveis de preenchimento de 25%, 50% e 75% apresentaram um alongamento na ruptura semelhante. Comportamento esse, que pode ser explicado devido no nível de 100% de preenchimento ser quase inexistente os espaços vazios no interior do CP, gerando uma maior capacidade de deformação do objeto e uma maior aderência entre as camadas. Em relação ao tipo de preenchimento, os corpos de prova do tipo Grade apresentaram o pior desempenho, com os menores valores de alongamento na ruptura e menores ductilidades, enquanto os corpos de prova com os tipos de preenchimento Cúbico, Linhas e Giróide apresentaram alongamentos semelhantes entre si e superiores ao tipo Grade, com uma leve tendência de aumento nos valores de alongamento, respectivamente, onde o tipo Giróide apresentou os maiores intervalos de confiança.

No tempo de impressão dos corpos de prova, apenas o nível de preenchimento foi relevante, uma vez que o nível de preenchimento representa a quantidade de material que é depositado no objeto, e para uma mesma velocidade de impressão o aumento da quantidade de material depositado ocasionará no aumento do tempo de impressão. Já, ao variar o tipo de preenchimento não foi encontrado resultados significativos no tempo de impressão, mas o padrão Giróide se destacou, apresentando maiores tempos de impressão, gerados pela maior complexidade do padrão ondulado que o Giróide apresenta.

Na massa, novamente apenas o nível de preenchimento apresentou efeitos significativos. Pois, com o aumento do nível de preenchimento mais material será depositado

no objeto, aumentando a massa das combinações. E para o tipo de preenchimento, não houve efeitos significativos sobre a massa das combinações.

Podemos concluir que o nível de preenchimento foi o parâmetro que apresentou influência significativa sobre todas as variáveis analisadas. Enquanto o tipo de preenchimento só apresentou influência significativa sobre o alongamento na ruptura.

Por fim, o objetivo proposto no trabalho foi cumprido, além de conceder um referencial teórico do processo FDM que poderá ser utilizado para trabalhos futuros.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Analisar a influência desses parâmetros, nível de preenchimento e tipo de preenchimento, utilizando outros filamentos, por exemplo o PLA.
- Analisar a influência desses parâmetros, nível de preenchimento e tipo de preenchimento, em outros tipos de ensaios mecânicos.
- Analisar a influência de outros tipos de preenchimento sobre as propriedades mecânicas dos corpos de prova.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, J. T. F. **Desenvolvimento de uma impressora FDM tipo delta**. 2017. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de engenharia, Universidade de Porto. Porto, Portugal, 2017.
- ACELERA3D. Qual Bico Escolher para Minha Impressora 3D? **Acelera3D**. 2019. Disponível em: <<https://acelera3d.com/qual-bico/>>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- ALSOP, T. Which 3D printing technologies do you use? **Statista**, 2021. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/#:~:text=In%202021%2C%20the%20most%20commonly,utilizing%20this%20technology%20in%20house>>. Acesso em: 5 abr. 2022.
- ALZHRANI, M. **Modification of Recycled Poly(ethylene terephthalate) for FDM 3D-Printing Applications**. 2017. Dissertação de Mestrado, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada., 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-02a**. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. United States, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/ASTM 52900, Manufatura aditiva – Princípios gerais – Terminologia**. Rio de Janeiro. 2018.
- AUMNATE, C. et al. **Fabrication of ABS/Graphene Oxide Composite Filament for Fused Filament Fabrication (FFF) 3D Printing**. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2018, 2018.
- BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. **Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D**. Gestão, Tecnologia e Inovação: Revista eletrônica dos Cursos de Engenharia Curitiba, v. 1, n. 3, p. 9–18, 2017.
- BRESEGHELLO, L. **A performative approach to 3d printed architecture**. 2015. Tese de bacharelado - Ciências da Arquitetura - Politecnico di Milano, 2015.
- BRISCHETTO, S.; TORRE, R.; FERRO, C. G. **Experimental Evaluation of Mechanical Properties and Machine Process in Fused Deposition Modelling Printed Polymeric Elements**. AHFE 2019 International Conference on Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping, p. 377–389, 2019.
- CARNEIRO, O. S.; SILVA, A. F.; GOMES, R. Fused deposition modeling with polypropylene. **Materials & Design**, v. 83, p. 768–776, 2015.
- CARUSO, J. G. **Desenvolvimento numérico-experimental de corpos de prova Aplicáveis a ensaios de tração, compressão e torção de Polímeros**. 2015. Dissertação de Mestrado - Engenharia Mecânica - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, 2015.
- CASAGRANDE, M. V. S. **Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida fdm**. 2013. Projeto de Graduação - Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2013.

CICALA, G. et al. **Engineering thermoplastics for additive manufacturing: A critical perspective with experimental evidence to support functional applications.** Journal of applied biomaterials & functional materials, v. 15, n. 1, p. 10-18, 2017.

Cinco áreas-chave para aplicação da impressora 3d. **Wishbox.** 2018. Disponível em: <<https://www.wishbox.net.br/blog/cinco-areas-para-aplicacao-da-impressora-3d/>>. Acesso em: 3 jun. 2022.

DA CRUZ FERREIRA, G.; KRÜGER, T. R.; DOS SANTOS, C. B. **Utilização da impressão 3d na manufatura para a otimização de processos: um estudo de caso em indústrias automobilísticas.** 2016. Memorial de Trabalho de Conclusão de Curso – FAE Centro Universitário, Curitiba, PR, 2016.

DA SILVA, M. V. B. **Caracterização Mecânica de Materiais Utilizados em Prototipagem Rápida por Deposição de Material Fundido para Aplicação Aeroespacial.** 2018. Monografia - Engenharia Aeroespacial - Universidade de Brasília, 2018.

DE ARAÚJO, J. P.; AGRAWALL, P.; DE MÉLO, T. J. A. **Blendas PLA/PEgAA: Avaliação da reatividade entre os polímeros e da concentração de PEgAA nas propriedades e na morfologia.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 10, n.3, p. 118–127, 2015.

DE BARROS, Â. M. P. C. **Síntese e Caracterização de um Polímero Biodegradável.** 2011. Tese de mestrado - Química - Universidade do Minho, 2011.

DE MORAES, E. A. **Estudo da influência do teor de acetato de vinila na morfologia e biodegradabilidade de blendas poli(ácido láctico)/polietileno-co-acetato de vinila.** 2017. Tese de mestrado - Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2017.

DE REZENDE MARTINS, J. F. **Estudo do efeito do tipo de preenchimento no comportamento mecânico de peças fabricadas por fused deposition modelling usando o compósito pla-fibra de carbono.** 2021. Tese de mestrado - Engenharia de Produção - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2021.

DIVYATHEJ, M. V.; VARUN, M.; RAJEEV, P. **Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments.** International Journal of Scientific & Engineering Research v. 7, n. 3, p. 116–124, 2016.

DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue.** 4. ed. Edinburgh Gate, Harlow, Reino Unido: Pearson Education Limited, 2013.

Ender-3. **Creality.** 2017. Disponível em: <[https://www.creality.com/products/ender-3-3d-printer?spm=..index.products\\_tab\\_1.1](https://www.creality.com/products/ender-3-3d-printer?spm=..index.products_tab_1.1)>. Acesso em: 28 maio. 2022.

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

FERNANDEZ-VICENTE, M. et al. **Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing**. 3D printing and additive manufacturing, v. 3, n. 3, p. 183–192, 2016.

FRANTZ, G. W. Estudo dos processos de prototipagem rápida e iniciativas de código aberto para impressão tridimensional. **XXIII Seminário de Iniciação Científica, Salão do conhecimento Injuí**, 2015.

FREY, S. The Best PETG Filaments of 2021. **All3DP**. 2021. Disponível em: <<https://all3dp.com/1/petg-filament-3d-printing/>>. Acesso em: 7 nov. 2021.

GALINA, D. M. **Influência da espessura da camada de impressão 3D nas propriedades mecânicas de peças fabricadas com o copolímero ABS**. 2017. Monografia - Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES, 2017.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies**. 2 ed. New York: Springer, 2015.

GOLDSCHMIDT, B. The Best Cura Infill Pattern for Every Application. **All3DP**. 2021 Disponível em: <<https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>>. Acesso em: 29 maio. 2022.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

IMPRESSORA 3D PRO - GTMAX3D CORE H5. **GT Max 3D**. 2022 Disponível em: <<https://www.gtmax3d.com.br/imprensa-3d-pro/gtmax3d-core-h5-simplify3d>>. Acesso em: 25 mar. 2022.

JÚNIOR, S. V. C. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

KHAN, S. F. et al. **Effect of infill on tensile and flexural strength of 3D printed PLA parts**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018.

KONDO, H. The Best 3D Print Speed Settings for PLA & More. **All3DP**. 2021. Disponível em: <<https://all3dp.com/2/3d-printing-speed-optimal-settings/>>. Acesso em: 9 abr. 2022.

LEE, J.; HUANG, A. **Fatigue analysis of FDM materials**. Rapid Prototyping Journal, v. 19, n. 4, p. 291–299, 2013.

LIMA, E. D.; SANTOS, J. R.; **Estudo sobre novos componentes fabricados pela indústria automobilística com o auxílio da manufatura**. 2018. Monografia - Faculdade de Tecnologia de Santo André, Santo André, SP, 2018

LIU, Z.; LEI, Q.; XING, S. **Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM**. Journal of Materials Research and Technology, v. 8, n. 5, p. 3741–3751, 2019.

LIZARDO, B. F. et al. **Utilização do Método de Taguchi para Estudos da Influência dos Parâmetros de Fabricação nas Propriedades Mecânicas de Peças em PLA Obtidas por Manufatura Aditiva**. IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2016.

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](http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/seed_lab/caderno_impresao_3d.pdf)> Acesso em: 06 abr. 2022.

LOVO, J. F. P.; FORTULAN, C. A. **Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo fdm**. 1º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, p. 1–6, 2016.

MARTEL, A. The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar). **3D Natives**. 2017. Disponível em: <<https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/#!>>. Acesso em: 16 maio. 2022.

MATTERHACKERS. How to Succeed when 3D Printing with PETG Filament. **MatterHackers**. 2021. Disponível em: <<https://www.matterhackers.com/news/how-to-succeed-when-printing-with-petg-filament>>. Acesso em: 7 out. 2021.

MCCOLLUM, W. What Is Layer Height in 3D Printing? Use This Knowledge to Improve the Quality! Source: <https://43dprint.org/layer-height-3d-printing>. **43D**. 2021. Disponível em: <<https://43dprint.org/layer-height-3d-printing/>>. Acesso em: 4 maio. 2022.

MOREIRA, R. M. D. **Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM**. 2016. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de engenharia, Universidade de Porto. Porto, Portugal, 2016.

NARENDRAN, N.; PERERA, I. U. 3D Printing: Can it work for lighting. **Illuminating Engineering Society**. 2019 Disponível em: <<https://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/pdf/Narendran-Perera-IES-3D-2019.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2022.

O Que é Impressão 3D? Para Que Serve a Impressora 3D? [Guia Definitivo 2021]. **OALOO Impressão 3D**, 2021. Disponível em: <<https://www.oaloo.com.br/impresao-3d-vantagens-desvantagens/>>. Acesso em: 5 abr. 2022.

O'CONNELL, J. 3D Printing Infill: The Basics Simply Explained. **All3DP**. 2022. Disponível em: <<https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>>. Acesso em: 6 abr. 2022.

O'CONNELL, J. FDM 3D Printers Explained: Cartesian, Delta, CoreXY, & More. **ALL3DP**. 2020 Disponível em: <<https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scarab-corexy-polar>>. Acesso em: 9 dez. 2021.

O'CONNELL, J. The Most Important 3D Printer Slicer Settings. **All3DP**. 2021. Disponível em: <<https://m.all3dp.com/2/3d-slicer-settings-3d-printer/>>. Acesso em: 13 out. 2021.

PALLAROLAS, E. A. F. F. **Revisão Técnica de Processos de Manufatura Aditiva e Estudo de Configurações para Estruturas de Impressoras Tridimensionais**. 2013. Monografia de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

PANDA, B. N.; RAJU BAHUBALENDRUNI, M. V.; BISWAL, B. B. **Comparative Evaluation of Optimization Algorithms at Training of Genetic Programming for Tensile Strength Prediction of FDM Processed Part**. Procedia Materials Science, v. 5, p. 2250–2257, 2014.

Qual a influência da temperatura na impressão 3D? **3DLAB**. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/temperatura-na-impressao-3d/>>. Acesso em: 26 abr. 2022.

SAMPAIO, C. L. M. **Guia Maker de Impressão 3D - Teoria e Prática Consolidadas**. 2017.

SHAIK, Y. P.; SCHUSTER, J.; SHAIK, A. **A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used in 3D Printing FDM Processes**. Open Access Library Journal, v. 8 e7698, 2021.

SILVA, F. L. F. **Comissionamento e estudo dos materiais PLA e ABS processado através da manufatura aditiva**. 2019. Relatório de projeto de iniciação científica – Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, Sorocaba, SP, 2019.

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.

SRIVATSAN, T. S.; SUDARSHAN, T. S. **Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications**. Boca Raton, USA: CRC Press, 2015.

SUN, Q. et al **Effect of processing conditions on the bonding quality of fdm**. 2008. Rapid Prototyping Journal, v. 14, n. 2, p. 72–80, 2008

Super Racer (SR) So fast. **Flsun3D**. 2022. Disponível em: <<https://flsun3d.com/products/super-racer-sr/>>. Acesso em: 28 maio. 2022.

TAKAGAKI, L. K. Tecnologia de Impressão 3D. **Revista Inovação Tecnológica**, v. 2, n. 2, p. 28 - 40, 2012.

Tamanho de bico para Impressora 3D: Qual usar? Prós e Contras? **3DFila**. 2021. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/tamanho-de-bico-para-impressora-3d-qual-usar-pros-e-contras/>>. Acesso em: 27 abr. 2022.

THOMAZETTI, J. L. **Integração eletrônica em impressora 3D com cinemática delta invertida**. 2019. Trabalho de conclusão de curso – Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2019.

THOMPSON, R. et al. Properties of FDM Prints. **Universidade of Cambridge**. 2019. Disponível em: <[https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/add\\_manuf/fdm.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/add_manuf/fdm.php)>. Acesso em: 12 maio. 2022.

TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. **2014. Rapid Prototyping Journal**, v. 20 n. 3, p. 192–204, 2014.

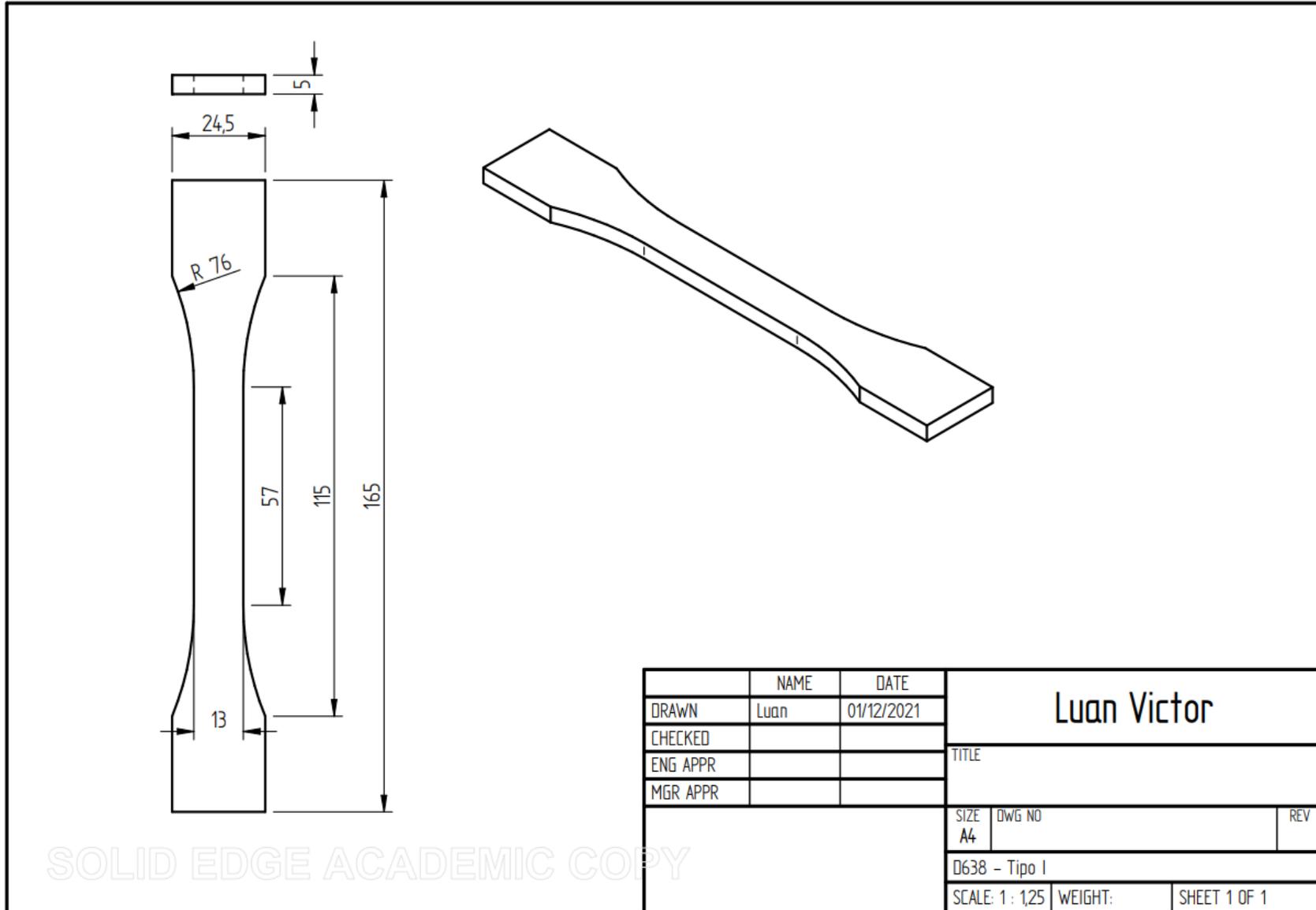
TYMRAK, B. M.; KREIGER, M.; PEARCE, J. M. **Mechanical Properties of Components Fabricated with Open-Source 3-D Printers Under Realistic Environmental Conditions**. 2014. *Materials & Design*, v. 58, p. 242–246, 2014.

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2017

WANG, X. et al. **3d printing of polymer matrix composites: A review and prospective**. *Composites Part B*, v. 110, p. 442–458, 2017.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de engenharia tecnologia e aplicações 2005**. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO CORPO DE PROVA CONFORME NORMA ASTM D638-02a



	NAME	DATE	Luan Victor		
DRAWN	Luan	01/12/2021			
CHECKED			TITLE		
ENG APPR					
MGR APPR					
			SIZE	DWG NO	REV
			A4		
			D638 - Tipo I		
			SCALE: 1 : 1,25	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY