



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

JOSÉ GUILHERME QUEIROZ SOUSA

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NA RESISTÊNCIA À
TRAÇÃO DE PEÇAS IMPRESSAS COM FILAMENTO ABS**

RUSSAS

2022

JOSÉ GUILHERME QUEIROZ SOUSA

EFEITO DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO
DE PEÇAS IMPRESSAS COM FILAMENTO 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)

- S697e Sousa, José Guilherme Queiroz.
Efeito dos parâmetros de impressão 3D na resistência à tração de peças impressas com filamento ABS /
José Guilherme Queiroz Sousa. – 2022.
86 f. : il.
- 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. manufatura aditiva. 2. FDM. 3. parâmetros de impressão. 4. ABS. 5. ensaios mecânicos. I. Título.
CDD 620.1
-

JOSÉ GUILHERME QUEIROZ SOUSA

EFEITO DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO
DE PEÇAS IMPRESSAS COM FILAMENTO 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: 07/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Ms. Ramon Rudá Brito Medeiros
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me proteger em tempos difíceis, principalmente nos que estamos enfrentando e por ter me dado forças para superar todas as adversidades encontradas na vida acadêmica.

Agradeço também aos meus pais, Roberto e Vânia, por todo o amor e esforço para que esse sonho fosse concretizado, além de me ensinarem a importância da educação.

A minha irmã, Sara, por me incentivar em todos os momentos, além de todo o carinho.

A minha namorada, Rayane, por todo o carinho e por me motivar e auxiliar nos momentos fáceis e difíceis na graduação.

A toda minha família, que fazem parte da minha vida e me incentivaram para que este sonho fosse alcançado, em especial para meus avós e minha tia pepé.

Ao meu orientado, Dr. Pedro Helton, pela amizade, além de todo o suporte, conselhos e pela disponibilidade para a elaboração desse trabalho.

Agradeço também meus amigos, James, Patric, Carlos Eduardo e Luan, que estiveram presente comigo durante a graduação, me ajudando e apoiando, tornando esta trajetória mais agradável.

Também estendo meus agradecimentos a todos os amigos de graduação, por todos os momentos compartilhados e suporte durante esses anos.

A todos os professores e técnicos da UFC que contribuíram para a minha formação acadêmica, pois a contribuição de todos foi fundamental.

RESUMO

Ao longo da história os processos produtivos sofreram diversas alterações, sempre visando inovação, melhor aproveitamento de matéria-prima, bem como redução de custos. Nesse cenário a manufatura aditiva (MA) surge como uma alternativa aos meios de fabricação convencionais. O método de fusão e deposição de material (FDM), tornou-se o mais utilizado na MA, diante desse cenário, a uma crescente nos estudos dos parâmetros relacionados a essa tecnologia, a fim de determinar quais os níveis são os mais adequados para otimizar o processo. Desta forma, o objetivo geral do trabalho é analisar o efeito dos parâmetros de nível de preenchimento, altura de camada e velocidade de impressão na resistência à tração dos corpos de prova impressos em filamentos de material ABS. No presente trabalho, analisou-se como a variação dos parâmetros de nível de preenchimento, altura de camada e velocidade de impressão influenciavam sobre o limite de resistência a tração, alongamento na ruptura, tempo de impressão e massa, para o material ABS. Esta análise foi feita através de um *software* estatístico por meio da ferramenta de Análise de Variância (ANOVA), onde possibilitou averiguar quais parâmetros exercem influência significativa nas variáveis de resposta. Os resultados obtidos mostraram que ao aumentar a altura de camada e/ou diminuir o nível de preenchimento haverá redução nos resultados obtidos para a resistência a tração, alongamento na ruptura, tempo de impressão e na massa, o comportamento inverso é obtido ao diminuir a altura de camada e/ou aumentar a densidade de preenchimento. Já a velocidade de impressão apresenta efeito significativo apenas sobre o tempo de impressão, visto que, ao aumentar a velocidade o tempo para produzir uma peça caíra consideravelmente.

Palavras-chaves: manufatura aditiva; FDM; parâmetros de impressão; ABS; ensaios mecânicos.

ABSTRACT

Throughout history, production processes have undergone several changes, always aiming at innovation, better use of raw materials, as well as cost reduction. In this scenario, additive manufacturing (AM) emerges as an alternative to conventional manufacturing methods. The fusion and material deposition (FDM) method has become the most used in AM, in view of this scenario, there is an increasing number of studies on parameters related to this technology, in order to determine which levels are the most suitable to optimize the process. In this way, the general objective of the work is to analyze the effect of the parameters of filling level, layer height and printing speed on the tensile strength of specimens printed on filaments of ABS material. In the present work, it was analyzed how the variation of the filling level, layer height and printing speed parameters influenced the tensile strength limit, elongation at break, printing time and mass, for the ABS material. This analysis was performed using statistical software using the Analysis of Variance (ANOVA) tool, which made it possible to determine which parameters have a significant influence on the response variables. The results obtained showed that when increasing the layer height and/or decreasing the filling level, there will be a reduction in the results obtained for tensile strength, elongation at break, printing time and mass, the opposite behavior is obtained when decreasing the height. layer and/or increase the fill density. Printing speed, on the other hand, has a significant effect only on printing time, since, by increasing speed, the time to produce a part will decrease considerably.

Keywords: additive manufacturing; FDM; print parameters; ABS; mechanical tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Nomenclaturas da MA.....	18
Figura 2 - Método de Blantner para a construção de mapas topográficos.....	20
Figura 3 - Principais setores industriais que utilizam impressão 3D.....	22
Figura 4 - Evolução do mercado de impressoras 3D.....	22
Figura 5 - Métodos de MA mais utilizados no mundo.....	23
Figura 6 - Representação esquemática do processo de FDM.....	23
Figura 7 - Representação de uma impressora 3D cartesiana.....	24
Figura 8 - Representação de uma impressora 3D CoreXY.....	25
Figura 9 - Representação da impressora 3D tipo Delta.....	26
Figura 10 - Influência dos monômeros nas propriedades do ABS.....	27
Figura 11 - Representação das principais camadas da peça.....	31
Figura 12 - Efeitos da altura de camada sobre a qualidade superficial.....	32
Figura 13 - Bicos de extrusão com diferentes diâmetros.....	32
Figura 14 - Tipos de preenchimentos disponíveis no Cura.....	34
Figura 15 - Níveis de preenchimento.....	34
Figura 16 - - Tipos de orientação usados na impressão 3D: a) 0° ; b) 90° ; c) 45 ° ; d) - 45°.....	35
Figura 17 - Influência do nível de preenchimento na tensão máxima suportada.....	37
Figura 18 - Curva tensão-deformação. a) ABS; b) PLA.....	38
Figura 19 - Valores de módulo de elasticidade para os principais materiais do FDM... 39	39
Figura 20 - Comparação dos módulos de elasticidade do PLA e ABS para diferentes níveis de preenchimento.....	40
Figura 21 - Fluxograma metodológico.....	41
Figura 22 - Filamento ABS.....	42
Figura 23 - Impressora Core H5.....	42
Figura 24 - Paquímetro digital.....	43
Figura 25 - Balança eletrônica de precisão.....	43
Figura 26 - Máquina de ensaios de tração.....	44
Figura 27 - Torre de temperatura.....	45
Figura 28 - Representação do CP.....	48
Figura 29 - Corpo de prova no <i>software</i> Ultimaker Cura®.....	48
Figura 30 - Corpos de Prova Impressos.....	49

Figura 31 - Curva tensão-deformação da amostra impressa.....	52
Figura 32 - Comportamento da curva tensão-deformação para polímeros dúcteis	53
Figura 33 - Corpos de prova após o ensaio mecânico	54
Figura 34 - Efeito do Preenchimento sobre o LRT.....	56
Figura 35 - Comportamento da curva tensão-deformação para os diferentes níveis de preenchimento	57
Figura 36 - Efeito da altura de camada sobre o LRT.....	58
Figura 37 - Comportamento da curva tensão-deformação para as diferentes alturas de camada.....	59
Figura 38 - Efeito da velocidade de impressão sobre o LRT	60
Figura 39 - Comportamento da curva tensão-deformação para as diferentes velocidades de impressão	61
Figura 40 - Efeito do nível de preenchimento sobre o alongamento.....	63
Figura 41 - Comportamento da curva tensão-deformação para os diferentes níveis de preenchimento	64
Figura 42 - Efeito da altura de camada sobre o alongamento.....	65
Figura 43 - Comportamento da curva tensão-deformação para as diferentes alturas de camada.....	66
Figura 44 - Efeito da velocidade de impressão sobre o alongamento	67
Figura 45 - Comportamento da curva tensão-deformação para as diferentes velocidades de impressão	68
Figura 46 - Efeito do nível de preenchimento sobre o tempo de impressão.....	70
Figura 47 - Efeito da altura de camada sobre o tempo de impressão	71
Figura 48 - Efeito da velocidade de impressão sobre o tempo de impressão	72
Figura 49 - Efeito do nível de preenchimento sobre a massa do CP.....	74
Figura 50 - Efeito da altura de camada sobre a massa do CP.....	74
Figura 51 - Efeito da altura de camada no preenchimento interno dos CPs com: a) 0,12 mm; b) 0,20 mm; c) 0,32 mm.....	75
Figura 52 - Efeito da velocidade de impressão sobre a massa dos CPs	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais propriedades mecânicas do plástico ABS	27
Tabela 2 - Intervalo de temperaturas de impressão para os principais materiais	29
Tabela 3 - Temperaturas da mesa de impressão para os principais materiais	30
Tabela 4 - Relação diâmetro de bico x altura da camada	33
Tabela 5 - Níveis dos parâmetros adotados	46
Tabela 6 - Parâmetros fixos	46
Tabela 7 - Matriz de combinações.....	47
Tabela 8 - Dimensão dos CPs.....	51
Tabela 9 - Matriz experimental de limite de resistência à tração	55
Tabela 10 - Matriz experimental do alongamento do corpo de prova.....	62
Tabela 11 - Matriz experimental tempo de impressão	69
Tabela 12 - Matriz experimental da massa do corpo de prova.....	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens da MA.....	19
--	----

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

3D	Tri-dimensional
A	Amostra
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for testing and materials
C	Combinações
CAD	Computer-Aided Design
CNC	Computer Numeric Control
CPs	Corpos de prova
FDM	Modelagem por fusão deposição
FFF	Fused Filament Fabrication
g	Gramas
H	Altura de camada
LRT	Limite de Resistência à Tração
MA	Manufatura aditiva
min	Minuto
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
Np	Nível de Preenchimento
PETG	Poli Tereftalato de Etileno Glicol
PLA	Poli Ácido Lático
PR	Prototipagem rápida
RepRap	Replicator for rapid prototyping
SLA	Máquina de estereolitografia
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
STL	Standard Template Library
V	Velocidade de impressão

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivos.....	18
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>18</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>18</i>
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	Manufatura Aditiva.....	19
2.2	Processo de impressão 3d.....	20
<i>2.2.1</i>	<i>Histórico.....</i>	<i>20</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Aplicações da manufatura aditiva com os principais materiais.....</i>	<i>22</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Fused Deposition Modeling - FDM.....</i>	<i>24</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Tipos de impressoras.....</i>	<i>25</i>
<i>2.2.4.1</i>	<i>Cartesiana.....</i>	<i>25</i>
<i>2.2.4.2</i>	<i>CoreXY.....</i>	<i>26</i>
<i>2.2.4.3</i>	<i>Delta.....</i>	<i>26</i>
2.3	Materiais de impressão 3D.....	27
2.4	Parâmetros de impressão 3D.....	30
<i>2.4.1</i>	<i>Temperatura de impressão 3D.....</i>	<i>30</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Temperatura da mesa de impressão 3D.....</i>	<i>31</i>
<i>2.4.3</i>	<i>Velocidade de impressão 3D.....</i>	<i>31</i>

2.4.4	<i>Altura de camada</i>	32
2.4.5	<i>Diâmetro do bico</i>	33
2.4.6	<i>Tipo e nível de preenchimento</i>	34
2.4.7	<i>Orientação do preenchimento</i>	36
2.5	Propriedades mecânicas dos principais materiais polímeros	37
2.5.1	Limite de resistência a tração para os principais polímeros	37
2.5.2	Ductilidade e fragilidade dos principais polímeros	38
2.5.3	Tenacidade dos principais polímeros	39
2.5.4	Módulo de elasticidade dos principais polímeros	40
3.1	Material e equipamentos de impressão 3D	42
3.1.1	<i>Filamento de impressão 3D</i>	42
3.1.2	<i>Impressora 3D</i>	43
3.1.3	<i>Instrumentos de medição</i>	44
3.1.4	<i>Equipamento para ensaio de tração</i>	45
3.2	Parâmetros de impressão 3D	45
3.2.1	<i>Parâmetros preliminares</i>	45
3.2.2	<i>Parâmetros definitivos</i>	46
3.2.3	<i>Parâmetros fixos</i>	47
3.3	Matriz experimental	47
3.4	Procedimento de impressão 3D	48
3.5	Procedimento de ensaio de tração	50

4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Corpos de prova impressos	52
4.2	Resistência a tração	53
<i>4.2.1</i>	<i>Análise da fratura dos CPs</i>	<i>55</i>
<i>4.2.2</i>	<i>Limite de resistência à tração</i>	<i>56</i>
<i>4.2.3</i>	<i>Alongamento</i>	<i>63</i>
4.3	Tempo de impressão	70
4.4	Massa da amostra	74
5.	CONCLUSÃO	78
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A - DESENHO TÉCNICO CORPO DE PROVA	86

1. INTRODUÇÃO

Diante de um cenário cada vez mais acirrado entre as empresas, tecnologias de ponta no processo de fabricação contribuem para um diferencial competitivo no mercado, pois garantem qualidade aos seus produtos e propriedades mecânicas adequadas para as funções desejadas, além de ser um fator preponderante para a redução de custos e de tempo de produção.

Atualmente os métodos mais utilizados nas indústrias para a fabricação de protótipos referem-se aos processos tradicionais de usinagem. Porém, dependendo da complexidade da prototipagem, o processo pode demandar muito tempo até ser finalizado. Diante desse cenário, a prototipagem rápida (PR) surgiu como uma alternativa para a fabricação dessas peças, de maneira que reduz os prazos de entrega ao máximo possível, podendo utilizar como técnica a modelagem por fusão deposição (FDM), que realiza a adição do material em camadas. Para a fabricação dessas peças o *Software CAD (Computer-Aided Design)* auxilia na produção sem a necessidade de criação de moldes, visto que o projeto é elaborado e executado pelo hardware (GROOVER, 2017).

Segundo Pipes (2010), a impressão 3D por ser um método de PR, torna-se uma alternativa viável para o processamento do projeto, visto que haverá a redução do tempo e do custo da produção, além de eliminar o uso de ferramentas. Tal redução é possível, pois primeiramente é realizado um modelo computacional para que posteriormente haja de fato a manufatura da peça.

Sendo assim, as diversas maneiras de impressão 3D (Extrusão, polimerização, fusão de pó) quando comparado com os métodos de manufaturas tradicionais, têm um grande diferencial, visto que a fabricação reduz ao máximo o desperdício de matéria prima, uma vez que as peças são produzidas camada por camada, diferentemente da manufatura redutiva, onde grande parte do material é perdido no processo de remoção do cavaco. Com isso, há a redução significativa nos custos envolvidos para a fabricação de um determinado objeto ou ferramenta.

Dentre os principais polímeros para produção de objetos no FDM, o Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS) é um dos materiais mais utilizados, visto que ele oferece boas propriedades mecânicas, como por exemplo, boas resistências tanto mecânicas quanto ao impacto, além de apresentar um ótimo aspecto visual, sendo ideal para aplicação em diversos setores da economia (RODA, 2014).

A qualidade das impressões 3D, bem com as propriedades mecânicas dos objetos impressos, sofre grande influência de diversos fatores, como: variação dos parâmetros, material do filamento utilizado, tipo de impressora, dentre outros. Dessa forma, identificar quais parâmetros terão maior influência nas propriedades das peças impressas é de suma importância, além de ajustá-los para níveis adequados para que promovam resultados desejáveis, tanto no aspecto superficial quanto melhorando as propriedades mecânicas do material (FERNANDES, 2016; IVANOVA *et al.*, 2013).

Com isso, os parâmetros de impressão podem ser alterados para diferentes finalidades, seja para obter melhor acabamento superficial, quanto para suportar cargas mais elevadas sofrendo o mínimo de deformações possível, ou seja, melhores propriedades mecânicas.

Diante disso, o objetivo desse trabalho é avaliar como os parâmetros níveis de preenchimento, altura de camada e velocidade de impressão influenciarão no comportamento das propriedades mecânicas de tração em corpos de prova impressos em ABS.

1.1 Objetivos

Para melhorar a compreensão do presente trabalho, os objetivos serão divididos entre objetivos gerais e específicos, o primeiro é responsável por apresentar a ideia principal do trabalho, além de seu objetivo, já o segundo detalhará as etapas necessárias para alcançar as metas traçadas no objetivo geral.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o efeito dos parâmetros de nível de preenchimento, altura de camada e velocidade de impressão na resistência à tração dos corpos de prova impressos em filamentos de 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) Realizar um estudo sobre o tema abordado por meio da literatura disponível;
- b) Avaliar a influência dos parâmetros no tempo de impressão;
- c) Avaliar a influência dos parâmetros na massa das amostras;
- d) Avaliar a influência no aspecto superficial dos corpos de prova;
- e) Avaliar qual parâmetro possui uma influência mais significativa nas propriedades mecânicas das amostras.

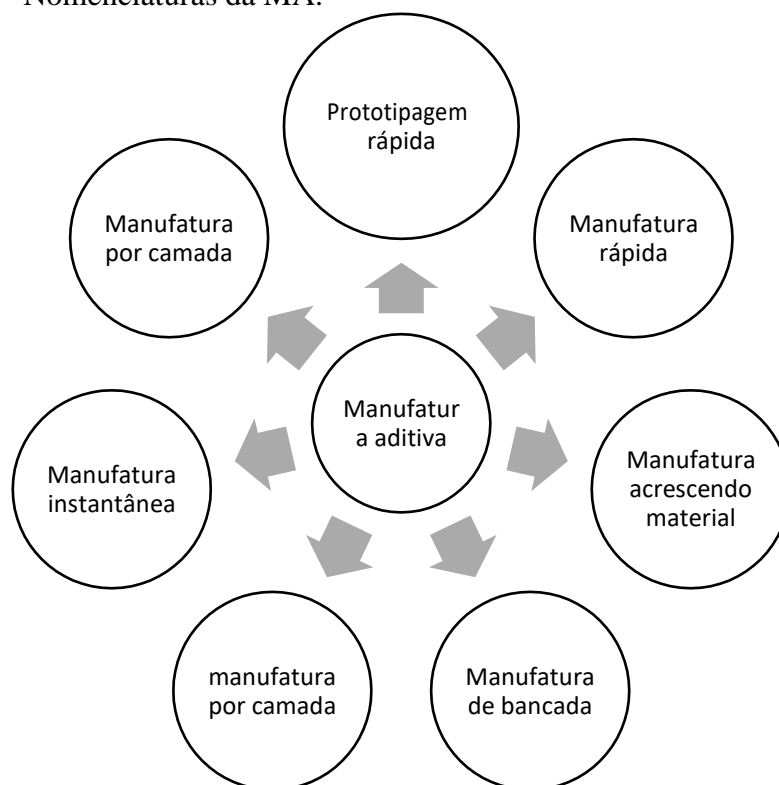
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Manufatura Aditiva

Através da norma ASTM F2792-12a, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), com o intuito de estabelecer um único termo que representasse o processo que realiza a deposição de material para construção de um objeto, criou a terminologia Manufatura Aditiva (MA), ela tem o propósito de facilitar a compreensão entre seus usuários (ASTM, 2013).

Porém, são vários os termos que ainda podem ser utilizados para se referir a MA. A Figura 1 apresenta as nomenclaturas mais utilizadas na MA.

Figura 1 - Nomenclaturas da MA.



Fonte: Adaptado de Volpato (2017)

O processo de MA é um modelo que se utiliza do sistema de manufatura por camadas, ou seja, o material é depositado em forma de camadas até formar a geometria desejada. Esse processo é possível a partir do fatiamento de protótipos que foram gerados em *softwares* de CAD, onde possibilitam a obtenção de geometrias em 3 dimensões. As peças são fatiadas com o intuito de identificar quais regiões devem receber o material de adição (VOLPATO, et al., 2007). Dessa forma, é possível alterar parâmetros e dimensões

do objeto no *software* responsável pelo fatiamento, ajustando-o de acordo com a preferência e necessidade do operador, antes mesmo que o produto seja impresso.

O Quadro 1, apresenta algumas vantagens e desvantagens referentes ao processo de MA.

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens da MA

Características Tecnológicas da MA	
Vantagens	Desvantagens
- Por ser um processo que se utiliza de softwares, é possível transformar os dados 3D em peças físicas, sem que haja a necessidade de moldes;	- Tamanho da peça é limitado, pois a peça deve ser menor que a câmara de construção
- Possibilidade de alteração do projeto sem custos de manufatura, uma vez que o projeto pode ser visualizado nos softwares;	- Velocidade de Produção baixa
- Possibilidade de variar a complexidade do projeto sem prejuízos financeiros;	- Necessita de mão de obra qualificada
- Baixo nível de desperdício, utilizando menos matéria-prima;	- O acabamento superficial é inferior aos processos convencionais
- Produção em uma única etapa	- Falta de diretrizes que possibilitasse maior exploração da MA

Fonte: Adaptada de WELLER (2015)

2.2 Processo de impressão 3d

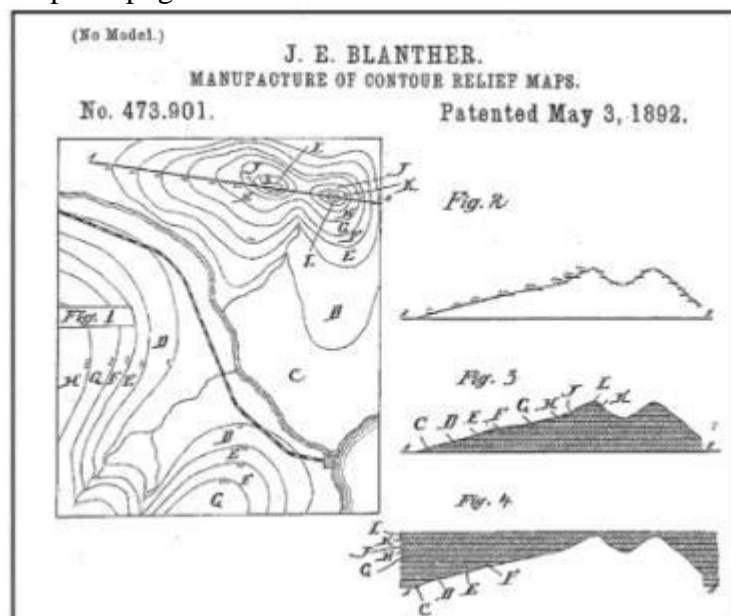
2.2.1 Histórico

O conceito presente para a criação de uma impressão 3D é antigo, desde a criação das pirâmides egípcias com as sobreposições de blocos já era possível observar conceitos utilizados na MA. Tanto a topografia quanto a fotoescultura, tiveram grandes contribuições para que os conceitos presentes na MA fossem desenvolvidos (VOLPATO, 2017).

Conforme Sampaio (2019), em 1860 o artista francês François Willème foi o responsável por criar o processo de fotoescultura, quando colocou 24 câmeras ao redor de uma plataforma, para obter uma visão de 360° do objeto colocado em cima dessa plataforma. Já a topografia só foi idealizada 3 décadas depois, a partir das ideias de J.E. Blather que produzia mapas de relevos topográficos em três dimensões, utilizando camadas com suavização de placas de cera, esse método foi constantemente aperfeiçoado

no decorrer dos anos utilizando-se outros materiais. A figura 2 ilustra o método de Blanthier.

Figura 2 - Método de Blanthier para a construção de mapas topográficos



Fonte: Volpato (2017).

As pesquisas sobre os processos citados anteriormente, possibilitaram o amplo desenvolvimento do processo de impressão 3D, impulsionado por empresas que viam nesse mercado um grande potencial, foi nesse contexto que inúmeros métodos para a fabricação de peças tridimensionais surgiram.

A partir da década de 80, houve um crescente desenvolvimento de metodologias alternativas que possibilitassem a impressão 3D, é o caso da sinterização seletiva a laser (SLS), porém apenas em 1991 o método mais conhecido nos dias atuais foi desenvolvido, a modelagem por material fundido (*Fused Deposition Modeling* -FDM), criado por Scott Crump cofundador da empresa *Stratasys* LTDA. Esse é um processo que consiste em depositar material fundido em camadas para o objeto ser modelado em 3 dimensões. Um ano mais tarde, a *Systems Corp.* foi a responsável por desenvolver a primeira máquina de Estereolitografia (SLA), onde utilizava laser para o endurecimento das camadas de resinas, além disso a startup DMT criou as primeiras impressoras de Sinterização Seletiva a Laser (SLS), caracterizada por construir em 3 dimensões adicionando uma camada sobre a outra através de polímeros em pó (LIRA, 2021).

Apesar de todas essas novas tecnologias possuírem patentes, que impossibilitavam a criação e comercialização dessas máquinas por outros fabricantes por

um determinado período de tempo, o engenheiro e matemático Adrian Bowyer revolucionou mais uma vez o mercado da impressão 3D, ele foi o responsável por criar o projeto “RepRap” que significa *Replicator for Rapid Prototyping*, ou Replicador para Prototipagem Rápida. Esse processo significava a democratização dessa tecnologia, visto que a mesma possuía código aberto, possibilitando a fabricação de impressoras 3D capaz de produzir muitos de seus componentes. Como não poderiam chamá-la de FDM devido a marca já ser registrada, decidiram chamar de *Fused Filament Fabrication* – FFF, que traduzido significa: Fabricação por Filamento Fundido (SAMPAIO, 2019).

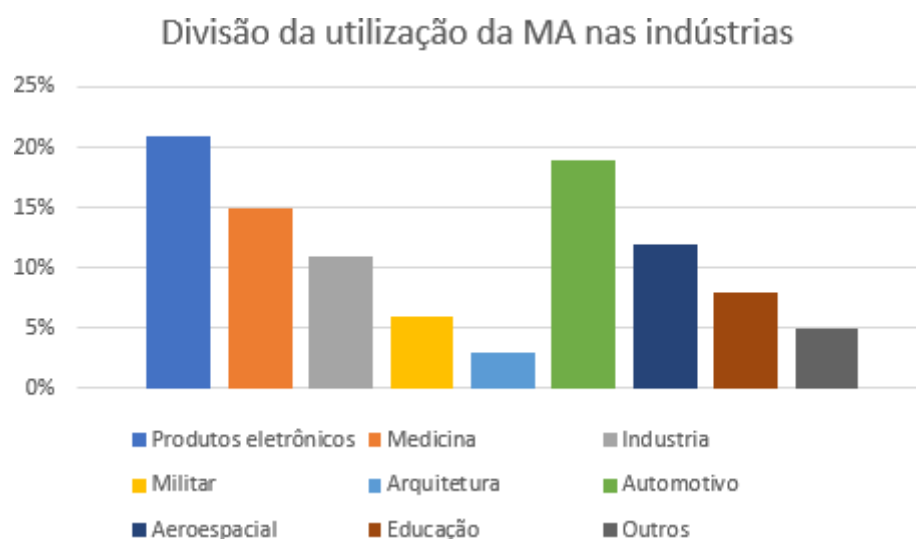
A *Stratasys* impediu que a tecnologia do FDM se disseminasse em maior escala por quase 20 anos, porém em 2009 a patente que a empresa era detentora se venceu, possibilitando que tecnologias semelhantes ao do FDM fossem replicadas, porém com preços quase 100 vezes menores comparadas aquelas já disponíveis no mercado. A empresa Makerbot Industries foi a responsável por produzir a “*CupCake*”, primeira impressora 3D de código aberto para ser comercializada. Outra empresa que contribuiu para esse processo de popularização e democratização foi a Ultimaker que além de fabricar impressoras 3D foi a responsável por desenvolver o fatiador Cura (RAZGRIZ, 2020; SAMPAIO, 2019).

2.2.2 Aplicações da manufatura aditiva com os principais materiais.

Os modelos de manufatura aditiva demoraram até se consolidar no mercado, tendo como justificativa os custos para aquisição das máquinas serem elevados, porém vários estudiosos apontavam que tal investimento se pagaria a longo prazo, tornando-se até mesmo mais econômico que os modelos já existentes. Porém, com o passar do tempo grandes empresas viram uma oportunidade e decidiram investir nessa tecnologia, tornando-a utilizável nas mais diversas aplicações, além de desenvolver suas características, tornando-as mais rápidas, compactas, mais fácil de manusear e o mais importante, com custos para aquisição menores (WOHLERS, 2008).

Com esse crescimento, diversas indústrias começaram a utilizar a MA para fabricação de seus produtos. A Figura 3 apresenta a distribuição da utilização da impressão 3D nos mais diversos setores.

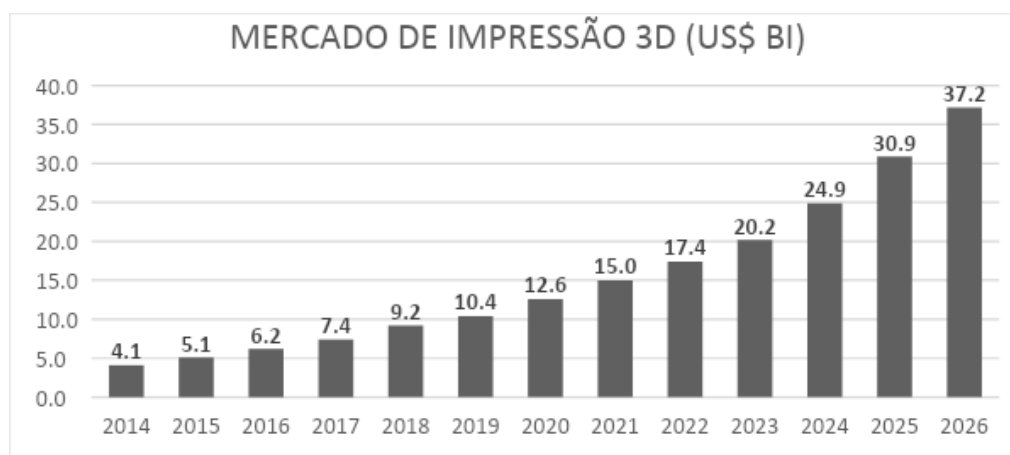
Figura 3 - Principais setores industriais que utilizam impressão 3D



Fonte: Adaptada de Wohlers Report (2014).

Esse crescimento na utilização de impressoras 3D nas indústrias, também refletiram em um crescimento nas receitas. Observa-se na Figura 4 que o mercado de Impressoras 3D tem projeção de arrecadar cerca de US\$ 37,2 bilhões em 2026, comparando ao ano de 2014, haverá um acréscimo de mais de 800% nos lucros advindos desse mercado.

Figura 4 - Evolução do mercado de impressoras 3D

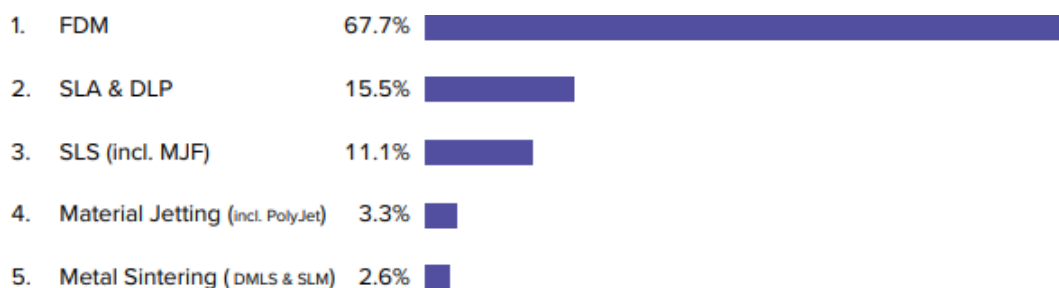


Fonte: Adaptado de 3D HUBS (2021)

Segundo pesquisas da plataforma 3D HUBS (2018), que é especialista em fornecer serviços de manufatura online nas áreas de Impressão 3d e usinagem CNC (*Computer Numeric Control*), afirma que a impressora FDM ocupa a primeira colocação mundial das impressoras mais utilizadas, com uma expressiva margem de 67,7%, portanto o FDM tem grande influência sobre as receitas desse mercado, além de

responsável pelo grande número de protótipos fabricados. A Figura 5, mostra a representatividade de cada processo de impressão 3D nas indústrias.

Figura 5 - Métodos de MA mais utilizados no mundo

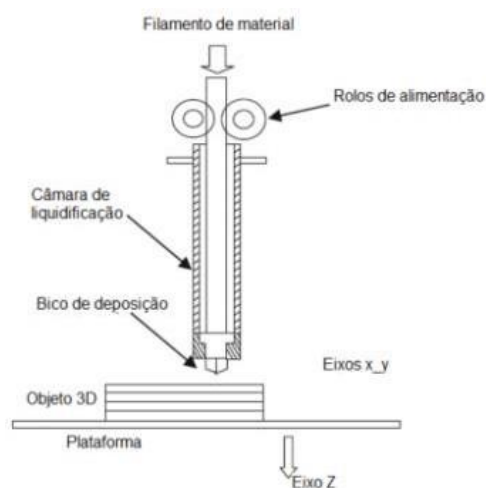


Fonte: 3D HUBS (2018)

2.2.3 Fused Deposition Modeling - FDM

Esse é o processo caracterizado por depositar material fundido na forma de filamento, onde o material é submetido a temperaturas superiores à de fusão, tornando possível realizar a extrusão do material através de um bico calibrado, que deposita material fundido sobre uma mesa. A formação do objeto desejado consiste em sobrepor camadas de filamentos fundidos até obter a geometria desejada (CUNICO, 2015). A Figura 6 apresenta a representação esquemática do processo de FDM.

Figura 6 - Representação esquemática do processo de FDM



Fonte: (CUNICO, 2015).

Durante o processo de deposição de material, a cabeça realiza movimentos nas direções X-Y, onde a geometria é então formada realizando o preenchimento da peça do contorno até o núcleo. Quando a camada é totalmente preenchida, a mesa de extrusão

se ajusta, realizando movimento no eixo Z, possibilitando o início da deposição de uma nova camada sobre a anterior (RELVAS, 2018). Esse processo se repetirá até que o protótipo esteja completamente terminado.

2.2.4 Tipos de impressoras

Com a democratização das impressoras 3D as empresas iniciaram o processo fabricação dessa tecnologia, a partir desse momento inúmeras impressoras 3D chegaram ao mercado. As impressoras de FDM em sua grande maioria são diferenciadas de acordo com o modo de translação do extrusor no espaço, além de possuir classe de impressoras abertas ou fechadas que vão ter impactos significantes na qualidade final da peça.

2.2.4.1 Cartesiana

As impressoras 3D cartesianas são as mais conhecidas e utilizadas pelos amantes desse ramo, como o próprio nome já diz, essa máquina tem como particularidade que cada eixo segue o plano cartesiano. A Figura 7 representa uma impressora cartesiana.

Figura 7 - Representação de uma impressora 3D cartesiana



Fonte: Creality (2021)

As impressoras cartesianas utilizam um hardware capaz de realizar o movimento mecânico nos eixos de coordenadas X, Y e Z, ou seja, cada eixo conta com um motor responsável apenas por movimentar naquela direção, possibilitando maior precisão na construção de peças e protótipo, assemelhando-se aos mecanismos existentes em máquinas CNC (BELL, 2015).

2.2.4.2 CoreXY

Semelhante às cartesianas, as impressoras 3D coreXY apresentam volume cúbico, porém a principal diferença entre as duas é que a coreXY possui motores que são responsáveis por realizar o movimento no plano X e Y em conjunto, enquanto os movimentos no eixo Z são realizados de maneira independentes por outro motor, enquanto nas impressoras cartesianas cada plano possui um motor independente responsável por realizar esses movimentos (THOMAZETTI, 2019).

Esse sistema possui uma vantagem em relação ao cartesiano, pois quando está bem calibrado pode ter um processo mais estável e mais rápido (RAZGRIZ, 2020).

Figura 8 - Representação de uma impressora 3D CoreXY



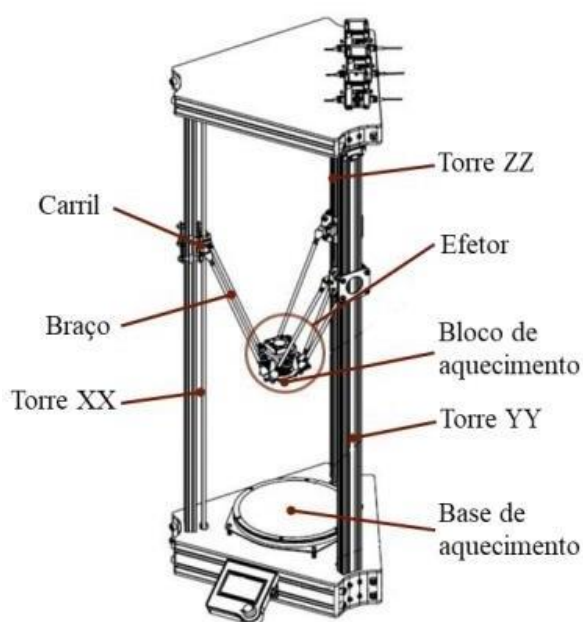
Fonte: GTMax 3D (2022)

2.2.4.3 Delta

As impressoras 3D Delta apesar de ter uma cinemática complexa também trabalham no sistema de eixos cartesiano, onde para que o movimento seja bem executado é necessário que os três motores que estão contidos nas torres trabalhem em conjunto, sendo assim é possível alcançar qualquer coordenada dentro do volume de trabalho. Uma particularidade desse tipo de impressora é que a mesa de trabalho é circular e como o ponto inicial é localizado no centro desse círculo e tem coordenadas (0, 0, 0), implica que

o movimento pode ser realizado tanto no sentido positivo quanto negativo dos eixos X e Y (ABREU, 2017).

Figura 9 - Representação da impressora 3D tipo Delta



Fonte: Costa (2019)

2.3 Materiais de impressão 3D

Os materiais para a fabricação de peças variam de acordo com o processo utilizado na MA, além de que para cada processo há uma gama de materiais para serem utilizados, cada um com suas características e particularidades que influenciam na qualidade de impressão e até mesmo na resistência final do produto.

Para o FDM, utiliza-se de filamentos termoplásticos, que de acordo com Manrich (2005, p. 20): “são polímeros que podem ser fundidos e solidificados repetidas vezes, com pouca ou nenhuma variação em suas propriedades básicas”. Dentre os mais variados filamentos, os mais usuais são o Poli ácido lático (PLA), Acrilonitrila butadieno Estireno (ABS) e o Politereftalato de Etileno Glicol (PETG).

2.3.1 Material Acrilonitrila butadieno Estireno - ABS

O Acrilonitrila butadieno Estireno (ABS) faz parte do grupo de plásticos de estireno, sendo este obtido através da união de três monômeros responsáveis em influenciar as propriedades das resinas, como garantir alta resistência mecânica, bom aspecto superficial e média resistência à temperatura. Os monômeros responsáveis pela obtenção do ABS, têm suas concentrações distribuídas em 20 a 30% de acrilonitrila, 20 a 30% de butadieno e 20 a 60% de estireno (WIEBECK; HARADA, 2005). A Figura 10 ilustra como cada monômero influencia nas propriedades do ABS.

Figura 10 - Influência dos monômeros nas propriedades do ABS

Acrilonitrila fornece	Estireno fornece	Butadieno fornece
Resistências térmica e química	Brilho, moldabilidade e rigidez	Resistência ao impacto e alongamento

Fonte: WIEBECK; HARADA (2005, p. 57).

Esse material é derivado do petróleo e possui como características ótima flexibilidade e resistência a impactos elevados, geralmente, os filamentos desse material apresentam-se em cores opacas (LOPES et al., 2018).

Por ser um material considerado de fácil processamento e por unir boas características, principalmente por ser resistente a grandes esforços mecânicos, torna-se um material muito utilizado em vários setores, sendo os mais comuns na indústria automobilística e eletrodoméstica (WIEBECK; HARADA, 2005). Porém de acordo com Silva (2017), esse material possui como peculiaridade baixa resistência a intempéries, devido a composição do ABS, pois esse possui uma fase rígida de SAN (estireno-acrilonitrila) e uma fase soft constituída por butadieno (borracha). A Tab. 1 apresenta as propriedades mecânicas do termoplástico ABS.

Tabela 1 - Principais propriedades mecânicas do plástico ABS

Propriedades	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade - E	2200	MPa
Tensão de Ruptura	29	MPa
Resistência à tração	41	MPa
Tensão de Escoamento	38	MPa
Coef. Poisson	0,35	

Fonte: (3D LAB, 2021).

2.3.2 Material Poli Ácido Lático - PLA

O Poli Ácido Lático (PLA), é um polímero termoplástico biodegradável derivado do amido de milho e cana-de-açúcar, ou seja, de fontes renováveis, produzidas a partir de uma síntese química do ácido lático para a obtenção do PLA. Esse material é caracterizado por ser extremamente rígido, possibilitando maior detalhamento nas peças que serão produzidas. Diferente do ABS, esse material pode ser encontrado em cores brilhantes e opacas, inclusive translúcido (LOPES et al., 2018).

O PLA é considerado um material promissor por possui ótimas propriedades mecânicas, que possibilita sua ampla aplicação nas mais diversas áreas, como por exemplo em dispositivos de liberação controlada de drogas, tal feito só é possível devido ser um material bioabsorvível, ou seja, que pode ser absorvido pelo corpo sem causar danos à saúde (ZHANG; WANG, 2008).

Esse material também apresenta desvantagem, tal como, baixa resistência a tração, tornando-se um material quebradiço, impossibilitando a utilização desse material em aplicações que necessitem de deformações plásticas como por exemplo, elementos de fixação (RASAL; JANORKAR; HIRT, 2010).

2.3.3 Material Poli Tereftalato de Etileno Glicol - PETG

O Poli (Tereftalato de etileno glicol) - (PETG), é um polímero amorfo, resultante do acréscimo do CHDM na composição do poliéster, esse monômero é responsável pelo o aumento da ductilidade e resistência ao impacto, além de reduzir a cristalinidade. Suas principais aplicações acontecem principalmente no mercado de chapas extrudadas (WIEBECK; HARADA, 2005).

O PETG possui algumas similaridades com o ABS, tendo alta durabilidade e resistência, além de garantir facilidade na impressão 3D, mesma característica encontrada no PLA, ou seja, o PETG uni características dos dois filamentos mais utilizados no FDM, ideal para ocasiões que sejam necessários construir peças flexíveis e duráveis. Outra característica importante nesse tipo de material é a possibilidade de reciclagem. Garrafas de bebidas, embalagens de produtos de limpeza doméstica e cosméticos são alguns exemplos de aplicações deste polímero na MA (LEFTERI, 2015).

2.4 Parâmetros de impressão 3D

Para realizar o pré-processamento da peça ou de um protótipo, alguns parâmetros podem ser ajustados para atender as condições desejadas pelo operador, além de possuírem grande influência na qualidade final da peça, podendo conferir melhores propriedades mecânicas se ajustada em padrões corretos. Nesse tópico serão apresentados os principais parâmetros utilizados nos processos de MA, bem como suas influências nas propriedades mecânicas das peças.

2.4.1 Temperatura de impressão 3D

Parâmetro responsável por ajustar a temperatura do bico de extrusão até uma temperatura que é capaz de fundir o material que está sendo extrudado, essa temperatura deve ser ajustada de acordo com as especificações do fabricante e da composição do material a ser utilizado, uma vez que eles possuem temperaturas de fusão diferentes.

Para Bellini (2002), a temperatura de extrusão do material termoplástico deve atender três requisitos fundamentais:

I - Com a finalidade de facilitar o processo de extrusão através do bico extrusor, é ideal que o material apresente baixa viscosidade;

II - O filamento deve estar em temperatura que seja possível a fusão entre camadas, para que haja a perfeita união entre elas;

III - Garantir que no momento de deposição o material tenha alta viscosidade, garantindo características de adesão entre camadas.

Tendo como referência filamentos da empresa 3DFila, é possível verificar a faixa ideal de temperatura para determinadas matérias primas que compõem esses materiais. A Tabela 2 apresenta essas faixas de temperaturas para os principais materiais utilizados.

Tabela 2 - Intervalo de temperaturas de impressão para os principais materiais

Filamento	Temperatura de impressão (°C)
ABS	220-240
PLA	180-230
PETG	245-260

Fonte: 3DFila (2020)

2.4.2 Temperatura da mesa de impressão 3D

A temperatura da mesa torna-se fundamental para que o objeto impresso tenha boa adesão a mesa, visto que, alguns filamentos só conseguem uma boa fixação da primeira camada caso a mesa esteja na temperatura adequada para esses materiais. Corroborando com essa ideia, Fischer (2018) afirma que a temperatura é ao se aquecer a temperatura da mesa tem-se como resultado uma maior adesão do material, bem como, uma melhor qualidade final da peça, visto que o material não sofrerá com empenamento.

Visto isso, é imprescindível a verificação da temperatura adequada da mesa para o material que estará sendo utilizado na impressão, uma vez que a temperatura incorreta causará problemas na impressão.

Tabela 3 - Temperaturas da mesa de impressão para os principais materiais.

Filamento	Temperatura de impressão (°C)
ABS	100
PLA	60
PETG	85

Fonte: 3DFila (2020)

2.4.3 Velocidade de impressão 3D

A velocidade de trabalho terá grande influência no tempo de impressão da peça que está sendo fabricada, pois esse parâmetro representa a velocidade em que os motores das impressoras vão se mover para realizar a impressão.

Desse modo, torna-se intuitivo que se ao aumentar a velocidade de impressão, haverá uma redução no tempo de produção da peça. De fato, esse pensamento é verdadeiro, entretanto o ajuste na velocidade torna-se essencial, pois altas velocidades fazem com que a camada anterior não tenha tempo suficiente de resfriamento, para receber a deposição da camada seguinte. Ademais, vale ressaltar que velocidades baixas também possuem lados prejudiciais, uma vez que acarretará na deformação do material, pois o mesmo ficará muito tempo em contato com o bico extrusor (WISHBOX, 2020). Ficando perceptível assim, que o meio termo de velocidades é de suma importância para obtenção de características adequadas.

De acordo com Fernandes (2016), as velocidades de impressão devem ser divididas em cinco categorias diferentes no processo de impressão, que serão apresentadas abaixo.

I) Velocidade de primeira camada: como essa camada será a base para todas as outras camadas, deve aderir perfeitamente a mesa extrusora, portanto a velocidade deve ser baixa para que haja a perfeita adesão.

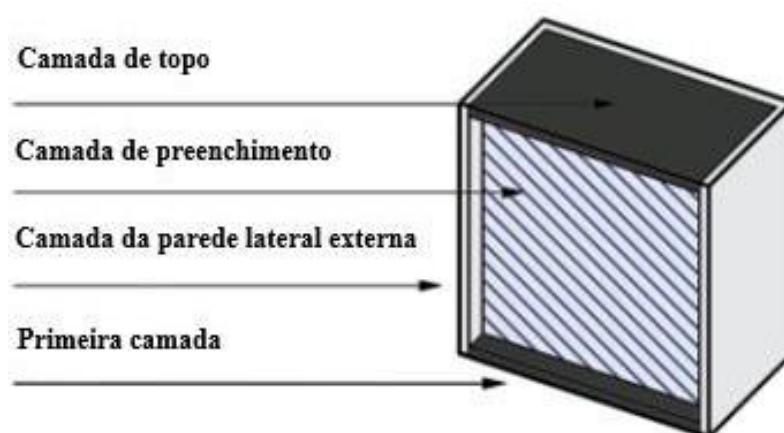
II) Velocidade de preenchimento: Como será a camada de enchimento e não uma camada responsável pela sustentação das demais camadas, não é necessário velocidades baixas.

III) Velocidade das paredes de topo e fundo: Devido ser uma camada de sustentação, utiliza-se velocidade de trabalho baixa, podendo ser igual à da primeira camada.

IV) Velocidade da parede lateral externa: Geralmente é definido baixas velocidades, com o intuito de garantir ao perímetro externo da peça uma boa qualidade superficial.

V) Velocidade da parede lateral interna: Responsável pelo perímetro interno da peça, deve-se ajustar essa velocidade para ficar entre a velocidade de enchimento e velocidade de parede lateral externa.

Figura 11 - Representação das principais camadas da peça



Fonte: Adaptado de Moustá (2018)

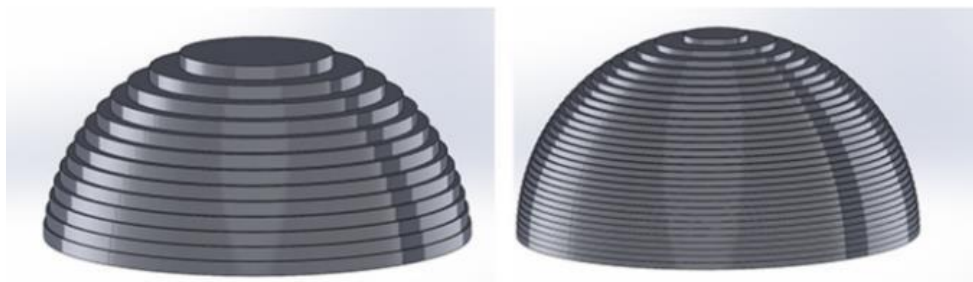
2.4.4 Altura de camada

A altura da camada na impressão 3D pode ser entendida como a altura em que a camada de adição de material tem ao ser depositada sucessivamente sobre a camada anterior, portanto é a dimensão no eixo z (SCULPTEO, 2016).

A altura da camada ou simplesmente a espessura de camada é um parâmetro que tem grande influência dentro da impressão 3D e que deve ser configurado com o devido cuidado, uma vez que vai influenciar em inúmeros aspectos da peça impressa.

Segundo Araújo (2016), a altura da camada influencia diretamente na qualidade superficial, tempo de fabricação, resistência, aparência externa e etc. Quanto menor a altura escolhida, maior será a qualidade superficial, porém maior o tempo de impressão final, ou seja, a altura de camada é inversamente proporcional ao tempo de impressão. A Figura 12 ilustra a qualidade superficial da peça ao diminuir a altura de camada.

Figura 12 - Efeitos da altura de camada sobre a qualidade superficial



Fonte: Brasília Fab Lab (2017)

2.4.5 Diâmetro do bico

O diâmetro do bico extrusor possui a função de depositar o material fundido sobre a mesa com o diâmetro desejado, porém deve-se levar em consideração que a altura de camada é diretamente dependente do diâmetro do bico, visto que a altura da camada não deve ter uma proporção maior que 80% do diâmetro do bico extrusor. Sendo assim quanto maior o diâmetro do bico extrusor, menor será o tempo gasto na impressão e maior a resistência mecânica das peças impressas, porém como consequência haverá uma brusca queda em níveis de detalhes na peça, uma vez que quanto menor a altura de camada melhor processamento de detalhes (3DLAB, 2017).

Figura 13 – Bicos de extrusão com diferentes diâmetros



Fonte: Acelera 3D (2019)

A Tabela 4, apresenta o diâmetro bico e a altura máxima da camada que o bico pode suportar.

Tabela 4 - Relação diâmetro de bico x altura da camada

Diâmetro do bico (mm)	Altura da camada máxima (mm)
0,2	0,16
0,3	0,24
0,4	0,32
0,5	0,4
0,8	0,64

Fonte: Adaptado 3DLAB (2017)

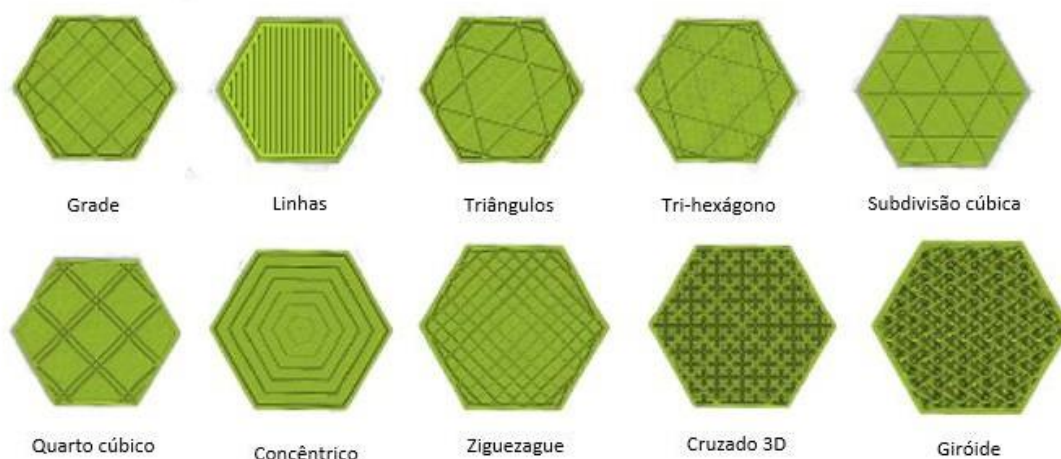
2.4.6 Tipo e nível de preenchimento

Uma característica do processo FDM é a possibilidade de fabricação de peças sem a necessidade de as mesmas possuírem um corpo maciço. Para que a peça seja impressa sem ser maciça e sem perder a resistência, o preenchimento assume o formato de algumas geometrias para garantir que a peça tenha um nível considerado de resistência mecânica.

Segundo Lopes et al. (2018), as principais geometrias de preenchimento são: hexagonal, grade, triângulos, linhas, concêntrico e etc. O tipo de preenchimento hexagonal é o mais utilizado pelos usuários das impressoras 3D, além de ser o que confere maior resistência mecânica quando comparado com os demais, utilizando o mesmo nível de preenchimento.

A Figura 14 apresenta os padrões de preenchimento disponibilizados pelo *Software Ultimaker Cura*.

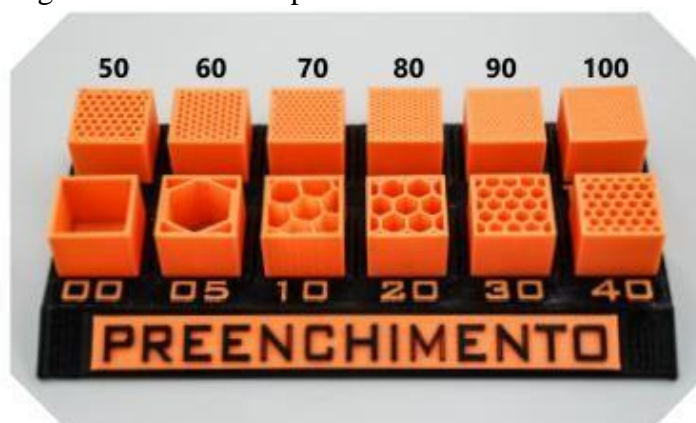
Figura 14 - Tipos de preenchimentos disponíveis no Cura



Fonte: Autor (2021)

Definido o tipo de preenchimento é possível configurar o nível desse preenchimento, que será responsável por determinar a quantidade de material que será depositado no interior da peça (SOUTO, 2019). Para peças vazadas a densidade de material pode variar de 0% até 99%, onde o zero representa a peça completamente vazada e os demais valores de 1% à 99% correspondem às peças parcialmente vazadas. Já o preenchimento de 100% corresponde a uma peça maciça.

Figura 15 - Níveis de preenchimento



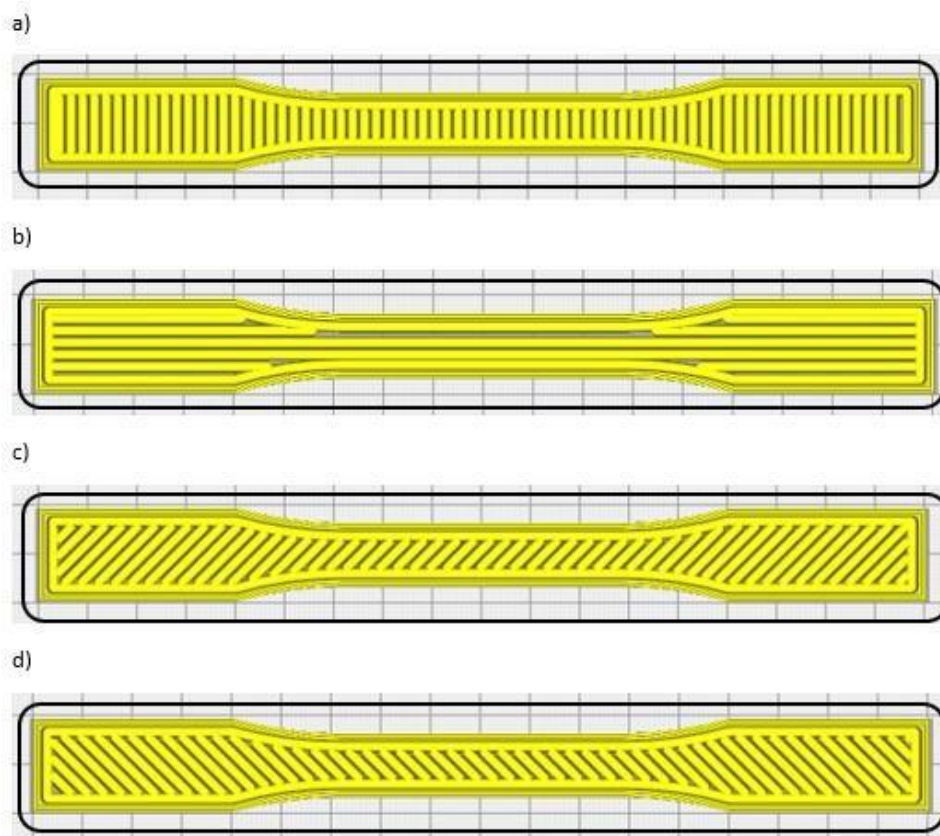
Fonte: LOPES et al. (2018)

2.4.7 Orientação do preenchimento

Esse é o parâmetro responsável por determinar em qual direção as linhas de preenchimento vão seguir até que a peça esteja totalmente impressa. Deve-se atentar para esse parâmetro, visto que a orientação dessas camadas irá influenciar diretamente nas propriedades mecânicas das peças.

Segundo Carneiro, Silva e Gomes (2015), ao produzir amostras com diferentes orientações ($\pm 45^\circ$, 0° , 90° , 45° e $0^\circ/90^\circ$) descobriu-se que essas orientações têm grandes influências em ensaios de tração dos Corpos de Prova (CPs), uma vez que, os CPs obtiveram melhor performance nos conjuntos com 0° de orientação do preenchimento, já os conjuntos com $\pm 45^\circ$ foram os que tiveram pior desempenho.

Figura 16 - - Tipos de orientação usados na impressão 3D: a) 0° ; b) 90° ; c) 45° ; d) -45° .



Fonte: Autor (2021)

2.5 Propriedades mecânicas dos principais materiais polímeros

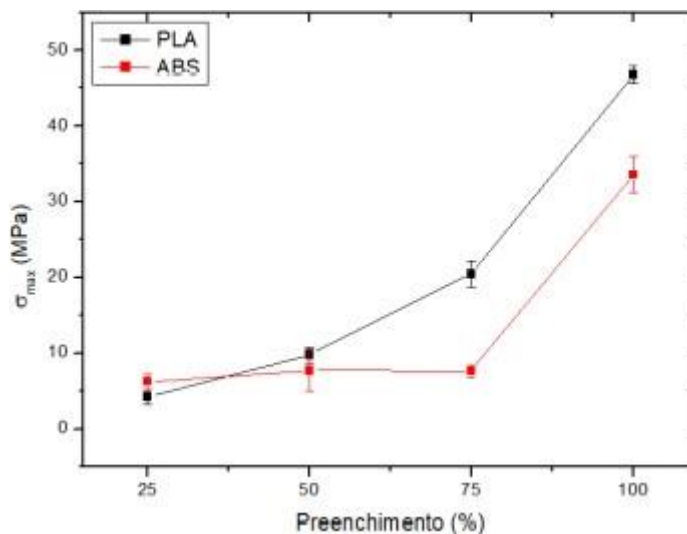
Cada vez mais torna-se imprescindível conhecer as propriedades mecânicas que um material possui, para que haja confiabilidade nas aplicações, visto que, alguns trabalhos expõem os componentes a situações críticas, sendo necessário propriedades adequadas para suportar as condições impostas, caso contrário vão falhar em meio ao processo. Diante desse cenário, os ensaios mecânicos de tração, compressão, flexão, cisalhamento, etc. determinam as propriedades do material, como o módulo de elasticidade, tensão de escoamento e a máxima tensão obtida, ductilidade e tenacidade. (CANEVAROLO, 2002)

2.5.1 Limite de resistência a tração para os principais polímeros

De acordo com Norton (2011), o limite de resistência à tração é o valor máximo de tensão que pode ser aplicada ao objeto sem que esse frature, ou seja, caso o material seja exposto a tensão maior que essa, tenderá a falhar. Diante disso, é possível determinar a faixa de tensão que pode ser aplicada aos polímeros sem que haja a ruptura do mesmo.

Os resultados obtidos em trabalhos de outros autores indicam que as amostras fabricadas com o material PLA apresenta valores de resistência a tração maiores que as amostras fabricadas em ABS, uma vez que o intervalo de tensão máxima do material PLA pode variar de 4,2 a 46,7 MPa e o ABS 6,2 até 33,54 MPa, essa variação de tensão nos materiais estão associadas aos parâmetros utilizadas no processo de impressão no FDM, uma vez que ao aumentar os níveis de preenchimento e/ou diminuir a espessura da camada, haverá uma elevação no LRT das amostras, vale ressaltar que outros parâmetro também terão influência no limite de resistência a tração do material. (FERNANDES, 2016; GALINA et. al, 2018; SILVA, 2019)

Figura 17 - Influência do nível de preenchimento na tensão máxima suportada



Fonte: Silva (2019).

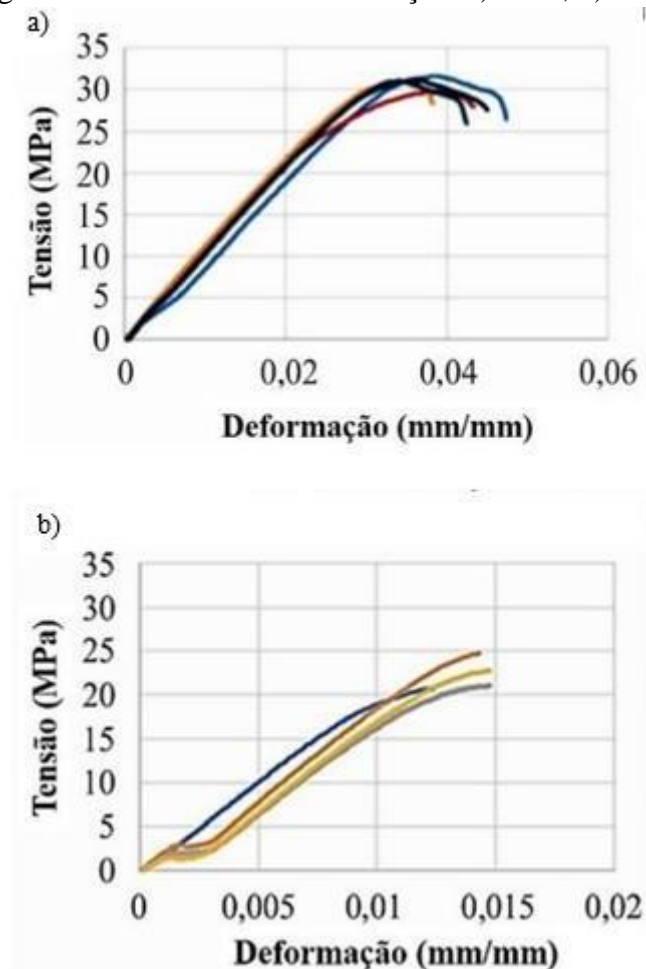
2.5.2 Ductilidade e fragilidade dos principais polímeros

De acordo com Norton (2011) um material pode ter comportamento frágil, quando não suporta grandes deformações ou dúctil, quando suporta grandes deformações antes de sofrer a fratura.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração, indicam que o PLA praticamente não apresenta fase plástica, ou seja, apresenta-se como um material frágil. Em vias contrárias, o ABS apresenta-se com a transição bem definida do limite elástico para o plástico, por tanto, pode-se considerar como um material dúctil, uma vez que apresenta maior fase plástica. (LIMA et. al, 2021; SILVA, 2019)

Esse comportamento pode ser observado na curva tensão-deformação da Figura 18, onde os CPs foram fabricados com os mesmos parâmetros, porém com materiais diferentes.

Figura 18 - Curva tensão-deformação. a) ABS; b) PLA



Fonte: Lima et. al (2021)

2.5.3 Tenacidade dos principais polímeros

Siewert *et al.* (2000) explica que a tenacidade de um material pode ser obtida através do ensaio de impacto Charpy. Este tipo de ensaio tem como princípio a transformação da energia potencial de um pêndulo em energia cinética, onde ao entrar em contato com o provete parte da energia cinética será absorvida durante a deformação da amostra, essa energia absorvida pode ser interpretada como a tenacidade do material. Joseph (2004), explica que é possível determinar a tenacidade de um material a partir dos resultados extraído da curva tensão-deformação, uma vez que ao atingir o regime plástico toda a área a baixo da curva representa a energia absorvida.

Em testes realizados por outros autores comprovou-se que dentre os principais materiais utilizados no FDM, aquele que apresenta a menor tenacidade é o PLA, resultado característico de materiais com comportamento frágil, ou seja, que apresenta pouca ou nenhuma deformação no regime plástico. Já o ABS, por ser um

polímero que apresenta deformações consideráveis na fase plástica do material, apresenta-se com uma ótima tenacidade (LAURES, 2021; VOSSEN, 2009).

2.5.4 Módulo de elasticidade dos principais polímeros

De acordo com Norton (2011) a razão entre a tensão e a deformação resulta no módulo de elasticidade e através dele pode-se determinar o quão rígido é o objeto, visto que, quanto maior o valor obtido da razão, maior será a rigidez do polímero. A Equação 1, apresenta como o módulo de elasticidade pode ser calculado.

$$E = \frac{\sigma}{s} \quad (1)$$

Lima *et. al* (2018), mediu o módulo de elasticidade a partir da inclinação da curva tensão-deformação, e ficou perceptível que os valores encontrados para o material PLA apresenta maior módulo de elasticidade em relação aos matérias ABS e o *Nylon*. A Figura 19, apresenta os resultados obtidos pelo o autor.

Figura 19 - Valores de módulo de elasticidade para os principais materiais do FDM

<i>Valores médios / Material</i>	<i>Nylon 6</i>	<i>ABS</i>	<i>PLA</i>
Módulo de elasticidade (MPa)	774,23	1075,12	1762,07

Fonte: Lima *et. al* (2021)

Resultados semelhantes foram obtidos por Silva (2019), onde ao avaliar o comportamento do módulo de elasticidade para os materiais ABS e PLA para diferentes configurações de níveis de preenchimento, foi identificado que o PLA possui maior módulo de elasticidade, independentemente do nível de preenchimento analisado em comparação ao ABS. A Figura 20, mostra os resultados obtidos para o módulo de elasticidade (E).

Figura 20 - Comparação dos módulos de elasticidade do PLA e ABS para diferentes níveis de preenchimento.

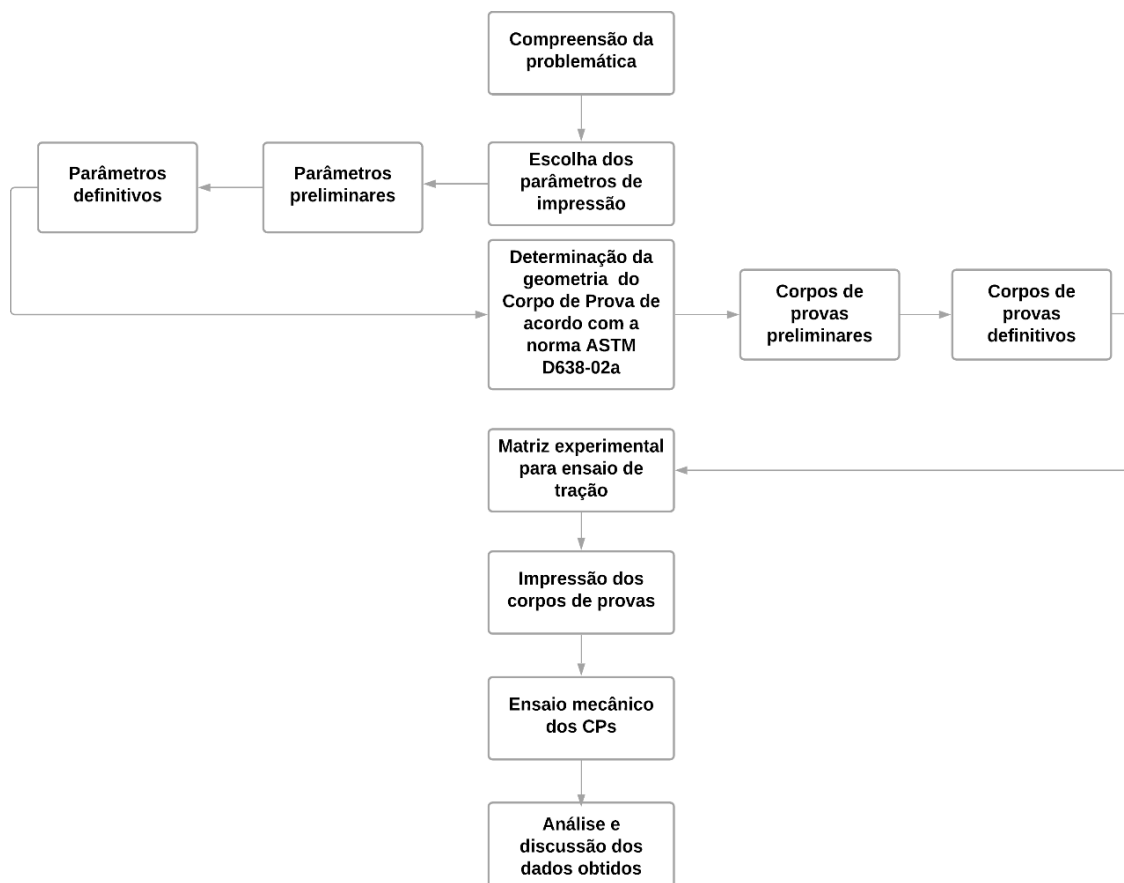
Preenchimento	25%		50%		75%		100%	
	PLA	ABS	PLA	ABS	PLA	ABS	PLA	ABS
σ_{max} (MPa)	4,273	6,227	9,753	7,710	20,440	7,650	46,759	33,540
$\pm DP$	1,020	0,960	1,054	2,779	1,685	0,852	1,194	2,402
σ_{esc} (MPa)	4,203	3,243	8,590	6,757	18,5400	7,177	39,090	32,437
$\pm DP$	0,951	2,150	0,955	2,504	1,955	0,1	1,908	1,947
E (GPa)	2,654	0,342	5,280	1,600	3,375	2,600	13,595	4,558
$\pm DP$	1,767	0,0868	2,813	0,0555	1,123	0,0623	4,406	0,597

Fonte: Silva (2019)

3. MATERIAIS E METODOS

O fluxograma abaixo apresentará as metodologias utilizadas para o desenvolvimento dessa pesquisa, onde cada etapa desse processo terá melhor explicação nos tópicos seguintes a Figura 21.

Figura 21 - Fluxograma metodológico



Fonte: Autor (2021)

3.1 Material e equipamentos de impressão 3D

3.1.1 Filamento de impressão 3D

Os Corpos de Prova (CPs) foram produzidos utilizando filamentos ABS do fornecedor 3DFila®. O ABS como já citado anteriormente é o filamento que mais é utilizado atualmente, além de possuir excelentes propriedades mecânicas, como força, ductilidade, impacto e resistência ao desgaste. A Figura 22 apresenta o filamento ABS.

Figura 22 - Filamento ABS



Fonte: Autor (2021)

3.1.2 Impressora 3D

Para essa pesquisa, utilizou-se uma impressora do laboratório de manufatura aditiva da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus Russas. A impressora utilizada é uma Core XY, modelo Core H5 da GTMax3d, tendo como característica sua tecnologia de impressão em FDM/FFF, ou seja, utiliza-se da deposição de filamentos fundidos para construção das geometrias desejadas. A impressora que foi utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho pode ser visualizada na Figura 23.

Figura 23 - Impressora Core H5



Fonte: GTMax 3D (2022)

3.1.3 Instrumentos de medição

Para averiguar as variações dimensionais e de massas existentes entre os CPs impressos, fez-se necessário a utilização de instrumentos adequados capazes de perceber pequenas variações presentes entre as amostras. A Figura 24, apresenta o paquímetro digital Zaas utilizado para medir as dimensões das amostras. Já para a análise da massa de cada amostra, utilizou-se a balança eletrônica de precisão da HL-Series, representada na Figura 25. Ambos os equipamentos pertencem ao laboratório da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus Russas.

Figura 24 - Paquímetro digital



Fonte: Autor (2021)

Figura 25 - Balança eletrônica de precisão



Fonte: Autor (2021)

3.1.4 Equipamento para ensaio de tração

Os ensaios de tração são utilizados para determinar o quanto os CPs suportam esforços mecânicos sem sofrer deformações plásticas, ou seja, identificar a resistência mecânica dos materiais. Por tanto, o trabalho utilizou-se da máquina de testes de compressão/tração, Figura 26, da fabricante EMIC, que se encontra a disposição no laboratório de manufatura aditiva da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus Russas.

Figura 26 - Máquina de ensaios de tração



Fonte: Autor (2021)

3.2 Parâmetros de impressão 3D

3.2.1 Parâmetros preliminares

Como já informado anteriormente, o presente estudo tem por objetivo analisar como a alteração de parâmetros de impressão irá influenciar na resistência à tração das peças produzidas a partir da MA utilizando-se do material ABS. Diante do que foi proposto, dentre todos os parâmetros disponíveis decidiu-se variar apenas os parâmetros de nível de preenchimento, velocidade de impressão e altura da camada. Além desses parâmetros, definiu-se também o tipo de preenchimento como sendo Giroide.

A direção das camadas superiores e inferiores foram alteradas, para que ficassem na mesma orientação das paredes intermediárias, essa modificação foi realizada

para não ter qualquer influência na resistência em outras direções. Essa alteração foi realizada em “direção de linhas superior/inferior” colocando as direções em [0, 90].

Para identificar qual seria a melhor temperatura que o bico extrusor deveria permanecer durante o processo de deposição do material fundido, realizou-se testes com a torre de temperatura. Este modelo de torre possibilita avaliar diferentes níveis de temperatura em um único objeto, uma vez que, delimita-se que a cada 10 camadas depositadas a temperatura vai cair em 5 °C em comparação a temperatura anterior, possibilitando analisar em qual camada a qualidade impressa ficou melhor. A torre de temperatura fabricada pode ser visualizada na Figura 27.

Figura 27 - Torre de temperatura



Fonte: Autor (2021)

3.2.2 Parâmetros definitivos

Devido a quantidade de material que se encontrava a disposição ser limitada, foi necessário que o número de combinações fosse reduzido. Portanto, para esse trabalho foram definidas 3 variáveis para cada parâmetro, exceto o de preenchimento que foram determinadas 2 variáveis. A Tabela 5 apresenta o valor utilizado para cada parâmetro.

Tabela 5 - Níveis dos parâmetros adotados

Velocidade de impressão (mm/min)	Altura da camada (mm)	Preenchimento (%)
25	0,12	50
50	0,2	100
75	0,32	

Fonte: Autor (2021)

3.2.3 Parâmetros fixos

Os parâmetros definidos nos tópicos anteriores, representam uma pequena parte dos fatores que influenciam diretamente na qualidade final da peça. Porém como o objetivo do trabalho é analisar como a alteração dos níveis dos parâmetros descritos anteriormente influenciam na resistência do material, todos os demais fatores deverão permanecer fixos.

A Tabela 6, apresentará alguns dos parâmetros e níveis que foram definidos para serem utilizados na pesquisa.

Tabela 6 - Parâmetros fixos

Parâmetros	Valor	Unidade
Largura de extrusão	0,5	mm
Espessura da parede	0,8	mm
Camadas superiores / inferiores	5	-
Temperatura de impressão	235	°C
Temperatura da mesa	100	°C
Fluxo	100	%
Orientação do preenchimento	0, 90	°
Padrão do preenchimento interno	Giroide	-

Fonte: Autor (2021)

3.3 Matriz experimental

Para determinar a quantidade de possibilidades de combinações que serão geradas, pode-se utilizar da Equação 1, que multiplica a quantidade de variáveis que cada parâmetro possui para encontrar a quantidade de amostras resultantes.

$$C = Np * V * H \quad (2)$$

Onde C é o número de combinações geradas, Np é o nível de preenchimento, V representa a velocidade de impressão e a altura de camada é representada pela sigla H.

Dessa forma, fazendo uso da Equação 4 pode-se determinar a quantidade de amostras que serão produzidas a partir dos parâmetros escolhidos, logo $C = 2 \times 3 \times 3$, ou seja, C = 18 combinações que foram separadas em A₁ a A₁₈, conforme apresentado na matriz de teste da Tabela 7.

Tabela 7 - Matriz de combinações

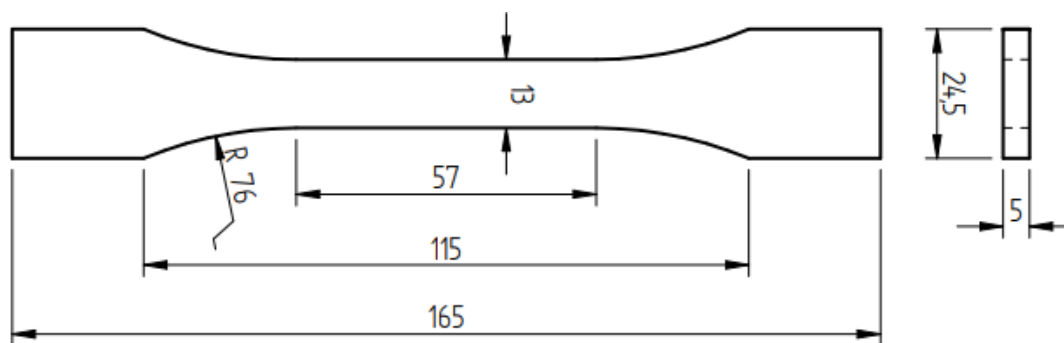
Combinação	Velocidade de impressão (mm/min)	Altura da camada (mm)	Preenchimento (%)
A1	25	0,12	50
A2	25	0,12	100
A3	25	0,2	50
A4	25	0,2	100
A5	25	0,32	50
A6	25	0,32	100
A7	50	0,12	50
A8	50	0,12	100
A9	50	0,2	50
A10	50	0,2	100
A11	50	0,32	50
A12	50	0,32	100
A13	75	0,12	50
A14	75	0,12	100
A15	75	0,2	50
A16	75	0,2	100
A17	75	0,32	50
A18	75	0,32	100

Fonte: Autor (2021)

3.4 Procedimento de impressão 3D

Para a fabricação dos CPs utilizou-se como base a norma ASTM D638-02a (ASTM, 2019) para ensaios de tração em plástico, nela estão presentes 4 modelos de CPs, cada um com geometrias diferentes. A Figura 28 ilustra o esboço do modelo de corpo de prova, entretanto, vale salientar que as dimensões entre os tipos de amostras sofrem variações.

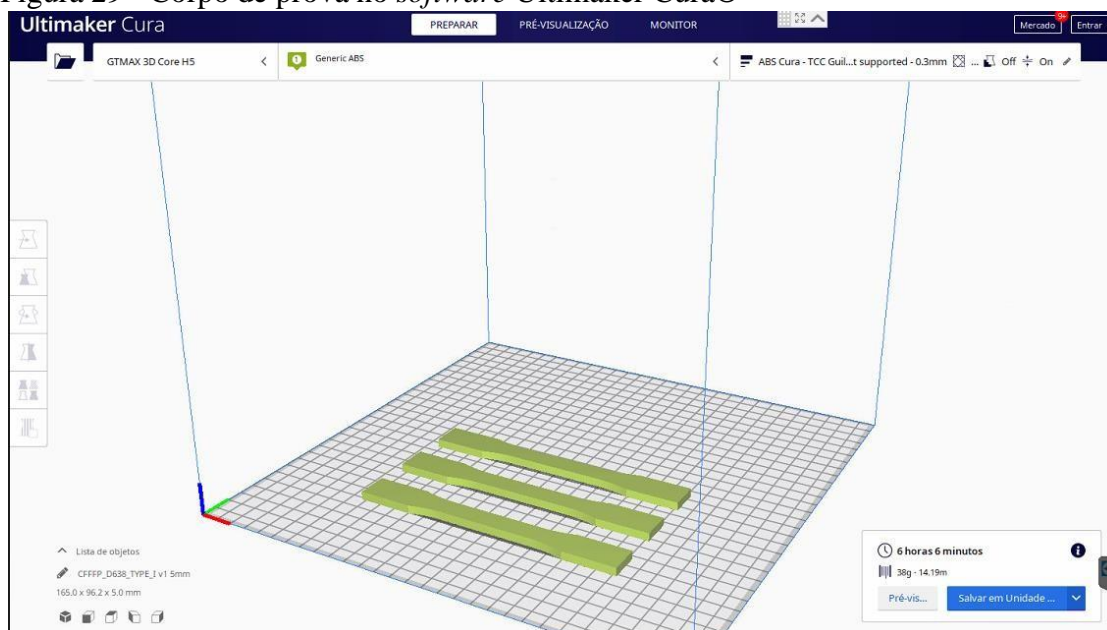
Figura 28 - Representação do CP



Fonte: ASTM D638-02a

Tendo determinado que o corpo de prova padrão para ensaios de tração iria seguir os padrões do tipo I, utilizou-se o *Software* de CAD SolidEdge® para realizar a modelagem do modelo de CP, sendo exportado para o formato *Standard Template Library* - STL, formato padrão de leitura em Softwares de impressoras 3D com tecnologia FDM.

O arquivo STL é carregado no *Software* Ultimaker Cura® 4.6.2, que é responsável por realizar o processo de pré-fabricação dos objetos a serem impressos, etapa de suma importância, visto que, é possível ajustar os parâmetros de impressão de modo que atenda às necessidades do operador.

Figura 29 - Corpo de prova no *software* Ultimaker Cura®

Fonte: Autor (2021)

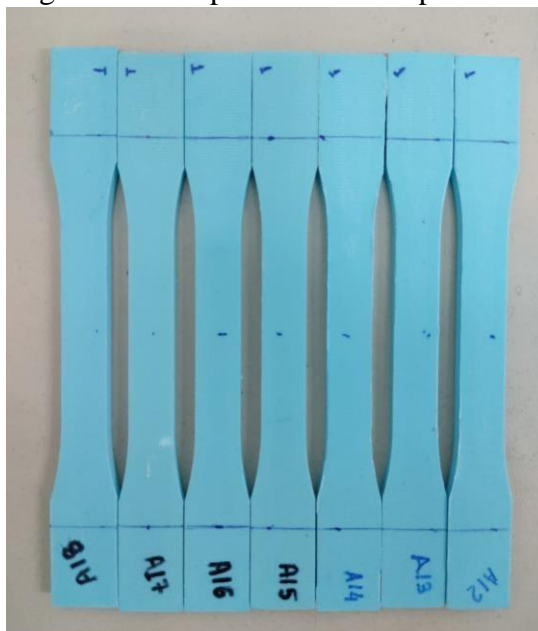
Tendo definido os parâmetros desejados, é necessário salvar o modelo na linguagem de programação padrão, o formato G-CODE, linguagem de programação padrão das impressoras 3D. É com a leitura desse modelo de arquivo que a impressora reconhece as coordenadas para onde deve ir e quais parâmetros serão utilizados.

Antes que o filamento comece a ser depositado na mesa, ocorre o ajuste da temperatura tanto na mesa quanto no bico extrusor, que precisam ficar em torno de 100 °C e 235° respectivamente. Só após esse aquecimento a mesa de extrusão vai se movimentar no eixo z, até se aproximar do bico extrusor dando início ao processo de deposição do material fundido.

3.5 Procedimento de ensaio de tração

Para a realização dos ensaios de tração, foi definido que velocidade de teste seria de 2 mm/min, pois é a velocidade recomendada pela norma ASTM-02a. Com isso, os CPs foram presos no sistema de fixação da máquina de tração composto garras, estas garras estarão fixadas a uma distância (d) de 67,5 mm do centro do CPs, para facilitar a fixação foram demarcadas linhas que indicam onde cada garra de fixação deve ficar, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Corpos de Prova Impressos



Fonte: Autor (2021)

Com os CPs devidamente fixados, pode-se dar início ao ensaio. Todos os dados dos testes são salvos no formato TXT, possibilitando ao operador exportar o arquivo para que fossem analisados posteriormente em um *software* de estatística

utilizando a Análise de Variância (ANOVA), ferramenta que possibilita verificar o grau de influência que os parâmetros exercem sobre as variáveis de resposta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por intermédio da ferramenta de Análise de Variância (ANOVA), foi possível elaborar gráficos que possibilitassem a análise os efeitos que parâmetros de impressão exerciam sobre as variáveis de respostas previamente definidas. Todos os gráficos gerados utilizaram um intervalo de confiança de 95%.

4.1 Corpos de prova impressos

Concluídas a impressão das amostras, foi averiguado as medidas de todos os corpos de prova, com o auxílio de um paquímetro. Essa análise teve o intuito de verificar se todos os CPs produzidos estavam dentro do padrão dimensional previsto na norma ASTM D638-02a. A Tabela 8, apresenta as dimensões dos CPs impressos.

Tabela 8 - Dimensão dos CPs

CP	Largura (mm)	Espessura (mm)
A01	13,31 ± 0,03	5,09 ± 0,01
A02	13,44 ± 0,02	5,35 ± 0,04
A03	13,46 ± 0,02	5,07 ± 0,02
A04	13,46 ± 0,03	5,38 ± 0,01
A05	13,45 ± 0,02	5,11 ± 0,02
A06	13,46 ± 0,01	5,35 ± 0,01
A07	13,31 ± 0,04	5,12 ± 0,01
A08	13,49 ± 0,01	5,32 ± 0,02
A09	13,35 ± 0,02	5,12 ± 0,01
A10	13,40 ± 0,02	5,37 ± 0,01
A11	13,46 ± 0,01	5,11 ± 0,02
A12	13,47 ± 0,02	5,34 ± 0,01
A13	13,32 ± 0,06	5,11 ± 0,01
A14	13,40 ± 0,07	5,27 ± 0,05
A15	13,35 ± 0,10	5,17 ± 0,01
A16	13,45 ± 0,01	5,34 ± 0,02
A17	13,31 ± 0,01	5,16 ± 0,06
A18	13,44 ± 0,04	5,38 ± 0,01

Fonte: Autor (2021)

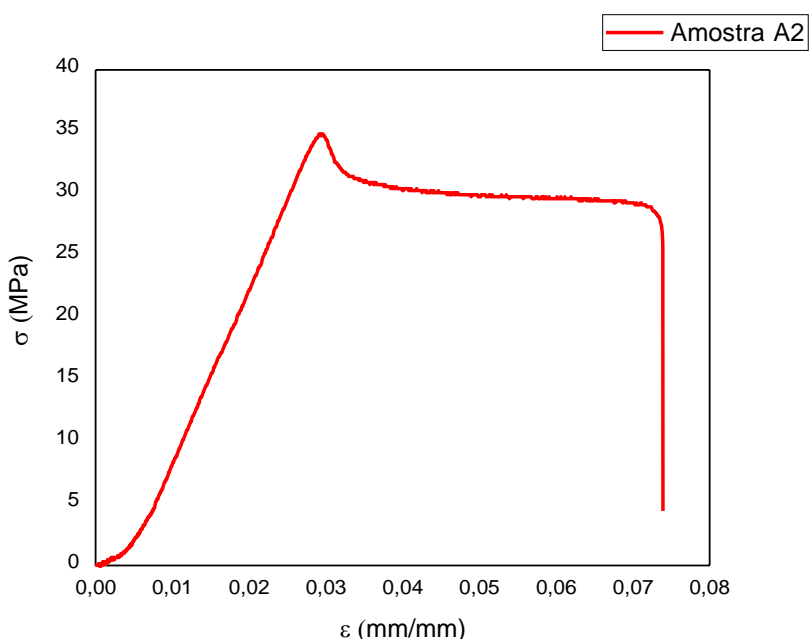
Analisando a Tabela 8, percebe-se que as dimensões das amostras impressas tiveram pequenas variações em suas dimensões quando comparada com o projeto inicial. Essa variação nas dimensões dos CPs está associada ao fluxo de material, uma vez que, ao alterar os parâmetros de impressão o motor tentará compensar extrudando mais ou menos material.

De fato, foi comprovado que todas as amostras se encontravam de acordo com as tolerâncias estabelecidas em norma, uma vez que, as larguras e espessuras medidas estavam dentro dos intervalos $13\pm 0,5$ mm e $5\pm 0,4$ mm, respectivamente.

4.2 Resistência a tração

A Figura 31, ilustra como é o comportamento das curvas tensão-deformação nas amostras impressas em ABS durante o ensaio de Tração.

Figura 31 - Curva tensão-deformação da amostra impressa



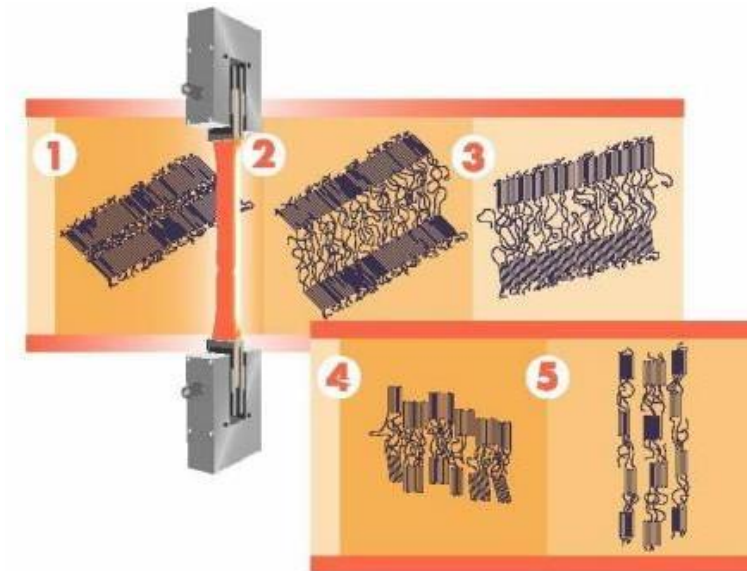
Fonte: Autor (2022)

Analisando a curva é possível afirmar que os corpos de prova fabricados com o material ABS pelo método FDM, apresenta-se o comportamento dúctil, uma vez que, o material sofre grandes deformações na fase plástica antes que ocorra definitivamente a fratura.

Uma característica observada no comportamento da curva tensão-deformação é que ao atingir o limite de escoamento (σ), a tensão tendeu a cair, porém, a partir de um certo momento a tensão permaneceu praticamente constante até o momento da ruptura do material. Essa característica é observada em polímeros dúcteis e explicada pelos autores Meyers e Chawla (2009), que atribuíram esse comportamento ao alinhamento das cadeias moleculares no sentido paralelo ao da força, elevando a resistência. Porém, a deformação

plástica continua nas regiões em que a resistência é menor, aumentando a estrição do CP até que ocorra a fratura. Esse comportamento pode ser analisado na Figura 32.

Figura 32 - Comportamento da curva tensão-deformação para polímeros dúcteis

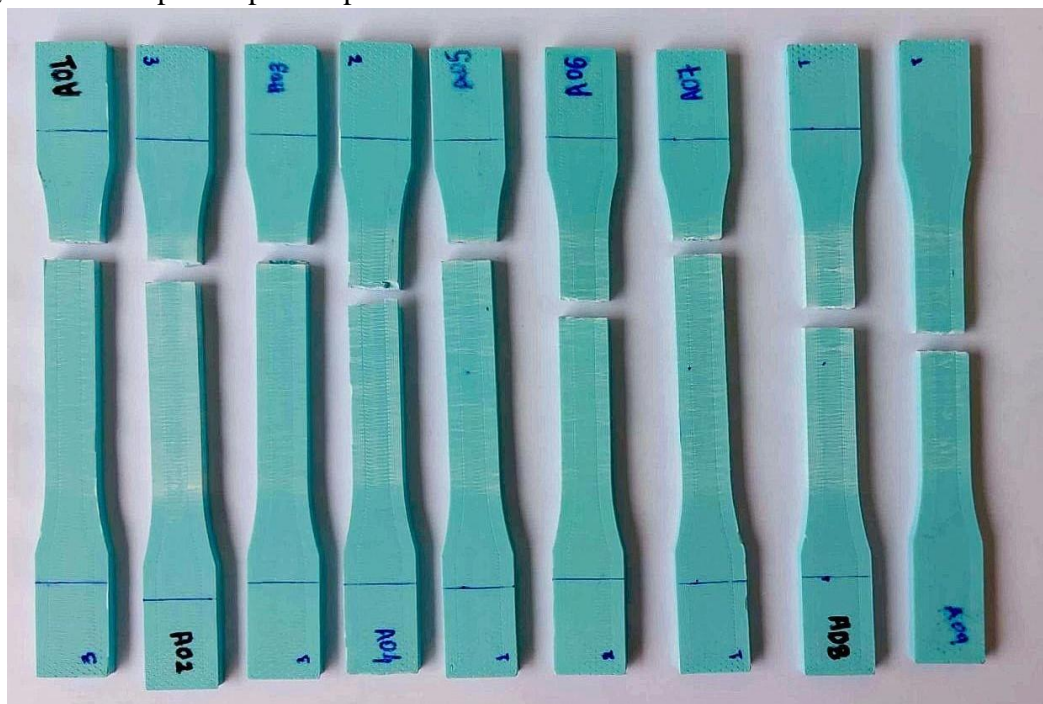


Fonte: Callister (1997)

4.2.1 Análise da fratura dos CPs

Após realizar os ensaios mecânicos nos corpos de prova impressos, é possível analisar o padrão de fratura das amostras. A Figura 33, mostra o comportamento dessas fraturas.

Figura 33 - Corpos de prova após o ensaio mecânico



Fonte: Autor (2022)

É visível que as amostras apresentam padrão de fratura praticamente liso e a maioria delas rompe próximo ao raio do filete do CP, devido ser uma região de concentrador de tensão. Esse é um comportamento característico de amostras fabricadas a partir do FDM, pois, nessa região que se concentra as maiores tensões. (MASSOD, 2010)

Na Figura 33, observa-se também a presença de fissuras no corpo das amostras, de acordo com Wu et al. (2015), os corpos de prova apresentam um elevado número de fissuras perpendicular a força aplicada, isso ocorre devido ser uma região que está sofrendo deformações plásticas.

4.2.2 Limite de resistência à tração

O ensaio de tração dos CP's possibilitou extrair algumas informações importantes para serem analisadas, como por exemplo, os dados de força e alongamento durante o tempo que o material estava sendo tracionado. A Tabela 9, apresenta os valores do limite de resistência à tração, bem como seus respectivos intervalos de confiança para cada combinação dos CP's.

Tabela 9 - Matriz experimental de limite de resistência à tração

Combinação	Velocidade de impressão (mm/min)	Altura da camada (mm)	Preenchimento (%)	Limite de resistência à tração (MPa)
A1	25	0,12	50	22,83 ± 0,52
A2	25	0,12	100	31,57 ± 0,22
A3	25	0,2	50	23,46 ± 0,16
A4	25	0,2	100	29,32 ± 0,29
A5	25	0,32	50	25,34 ± 0,37
A6	25	0,32	100	27,56 ± 0,51
A7	50	0,12	50	23,06 ± 0,24
A8	50	0,12	100	31,60 ± 0,44
A9	50	0,2	50	23,49 ± 0,19
A10	50	0,2	100	29,74 ± 0,64
A11	50	0,32	50	24,98 ± 0,44
A12	50	0,32	100	28,02 ± 0,11
A13	75	0,12	50	22,83 ± 0,45
A14	75	0,12	100	32,31 ± 0,65
A15	75	0,2	50	23,24 ± 0,29
A16	75	0,2	100	30,22 ± 0,40
A17	75	0,32	50	24,04 ± 0,27
A18	75	0,32	100	27,34 ± 0,39

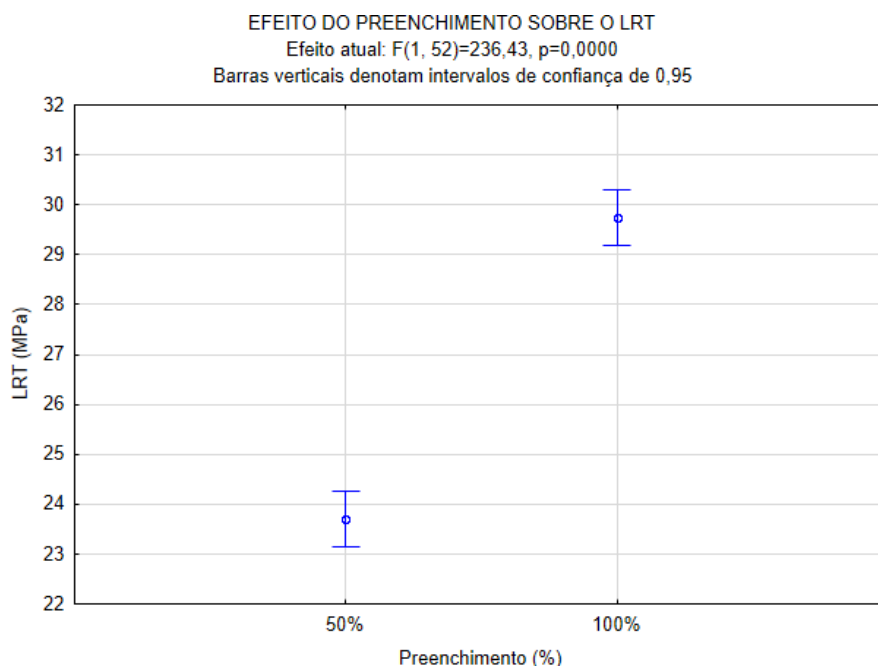
Fonte: Autor (2021)

Analisando a Tabela 9 é possível determinar que as amostras que possuem altura de camada 0,12 mm e nível de preenchimento de 100% e velocidade de impressão de 75 mm/min (combinações A14), obteve um LRT médio de 32,31 MPa maior limite de resistência a tração em comparação com as demais amostras. Por outro lado, as amostras que possuem altura de camada 0,12 mm e nível de preenchimento de 50% e velocidade de impressão de 25 e 75 mm/min (combinações A1 e A13), obtiveram um LRT médio de 22,83 MPa o menor entre todas as amostras. Percebe-se por meio da matriz que tanto o nível de preenchimento quanto altura de camada são determinantes para a resistência da

peça, visto que, os maiores valores de LRT foram obtidos com os CP's totalmente preenchidos e com menores alturas de camada.

É possível observar os efeitos de cada fator sobre o LRT através da ANOVA. As Figuras a seguir estarão apresentando como os corpos de prova se comportam ao alterar os fatores escolhidos.

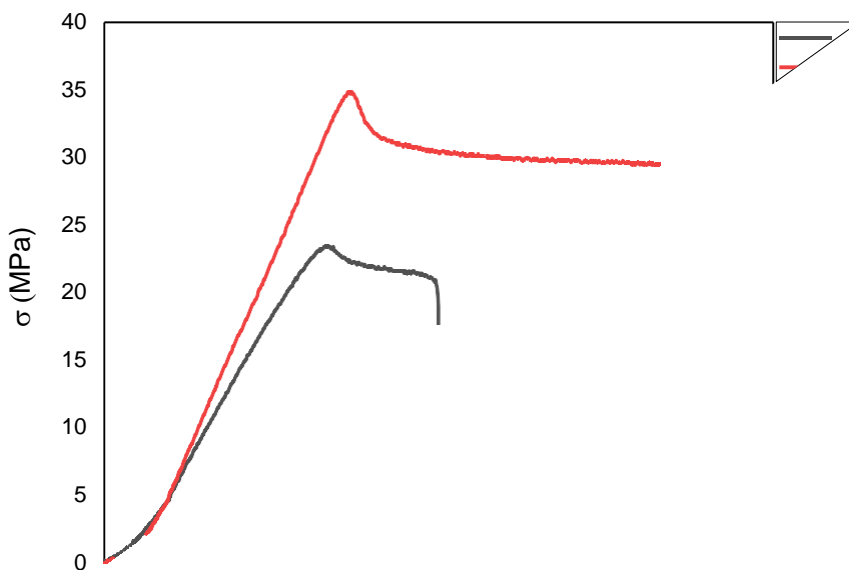
Figura 34 - Efeito do Preenchimento sobre o LRT



Fonte: Autor (2021)

A quantidade de material depositado na peça é um fator determinante para o aumento de sua resistência, uma vez que, quanto maior a porcentagem de material depositado, maior será a carga que o objeto será capaz de absorver até que ocorra a fratura. Esse efeito pode ser comprovado na Figura 8, que apresenta a influência que o nível de preenchimento exerce sobre o LRT, uma vez que, quando aumentou a densidade de preenchimento houve um aumento significativo na resistência das amostras. Além disso, o teste de variância obteve $P \leq 0,05$ e $F > 1$, comprovando assim que realmente há significância nos resultados obtidos. A Figura 35, mostra as curvas tensão-deformação para as amostras com níveis de preenchimento de 50% e 100%.

Figura 35 - Comportamento da curva tensão-deformação para os diferentes níveis de preenchimento

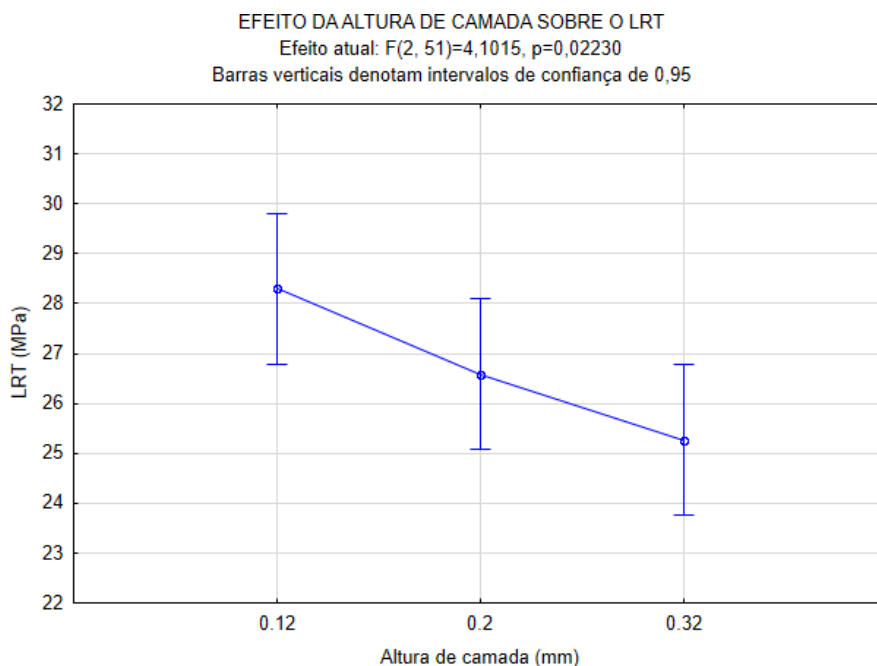


Fonte: Autor (2022)

Através da Figura 35, tornando-se mais evidente a diferença entre o comportamento das curvas tensão-deformação, uma vez que, ao aumentar o nível de preenchimento há um aumento significativo nas tensões de escoamento, resistência à tração e ruptura dos CPs.

Corroborando com os dados obtidos, Ambrós (2019), afirmar em seus estudos, que as amostras com maior densidade de preenchimento são aquelas que apresentaram maior LRT, haja vista, que esse valor tende a aumentar à medida que se eleva os níveis de preenchimento, valores esses que variaram entre 10%, 25% e 50%.

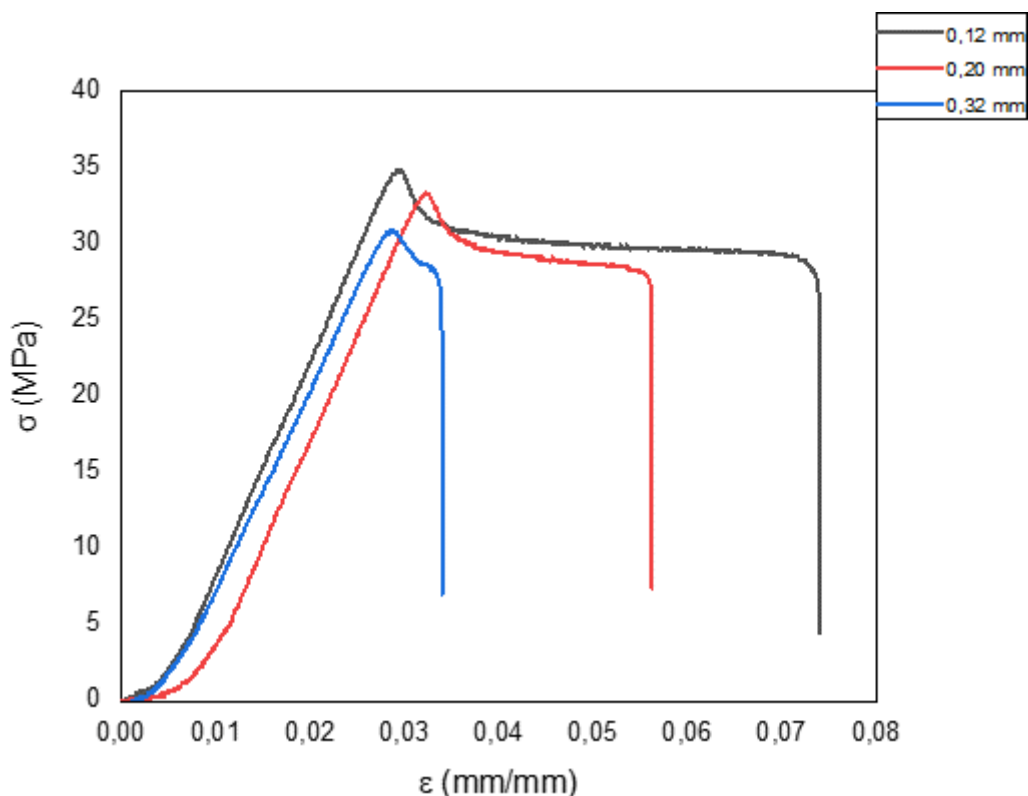
Figura 36 - Efeito da altura de camada sobre o LRT



Fonte: Autor (2021)

Ao analisar somente a altura de camada é possível verificar que há um padrão para que a resistência aumente, uma vez que, ao ter camadas menores há uma elevação no LRT. Esse comportamento pode ser associado com a quantidade de camadas depositadas, dado que, para obter objetos com a mesma dimensão, reduzindo-se a altura de camadas haverá um aumento na resolução da peça, ou seja, um aumento no número de camadas. Essa relação pode ser observada nos CP's impressos, pois, os de 0,12mm tiveram 42 camadas, os de 0,20 mm foram feitos com 25 camadas e os de 0,32 mm com 16 camadas. Outro fator que pode ter influência é a adesão de uma camada com outra, tendo em vista que, essas irão se aproximar de uma geometria circular quanto mais a altura se aproxima do diâmetro do bico, neste caso, 0,40 mm. Logo, haverá menores áreas de contato entre as camadas depositadas, já para as menores tem-se o resultado inverso, pois, por conta do bico extrusor a camada saíra com um padrão achatado, conseqüentemente com mais áreas de contato, ocasionando melhor aderência entre uma camada e outra, melhorando assim sua resistência mecânica.

Figura 37 - Comportamento da curva tensão-deformação para as diferentes alturas de camada

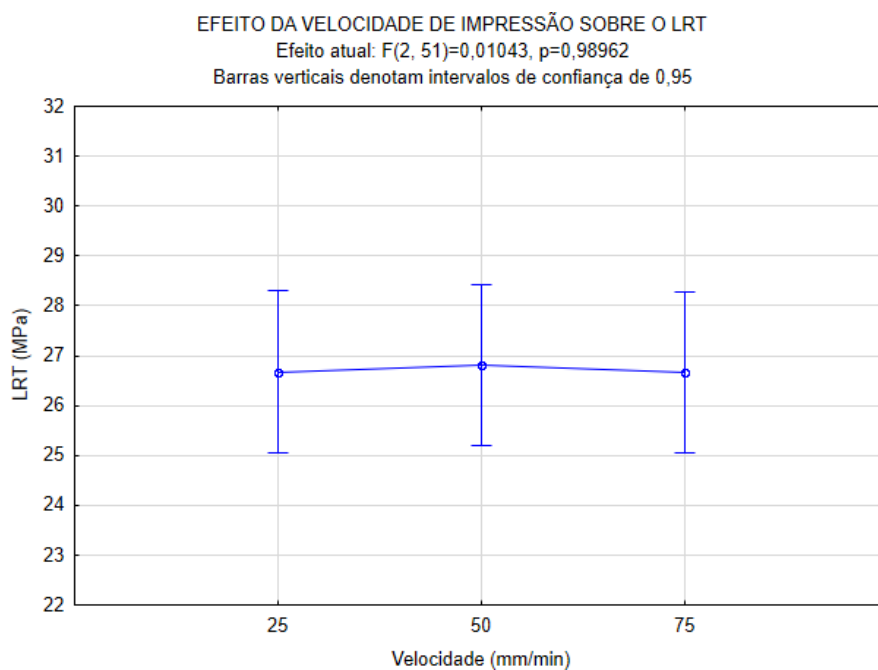


Fonte: Autor (2022)

A Figura 37, comprova que menores alturas de camada garantem ao objeto maior limite de resistência, além de que é possível verificar um aumento nas tensões de escoamento e de ruptura dos CPs.

Fernandes (2016), em suas pesquisas, o autor confere esse comportamento a dois fatores. O primeiro é a adesão entre as camadas, haja vista que, camadas menores terão maior área de contato, unindo-se com maior facilidade à camada anterior. Já o segundo fator, é a diminuição do gradiente de temperatura, uma vez que, ao ter maior área de contato entre as camadas, haverá melhor dissipação de calor ao longo da camada, reduzindo as distorções que enfraquecem as ligações entre os filamentos.

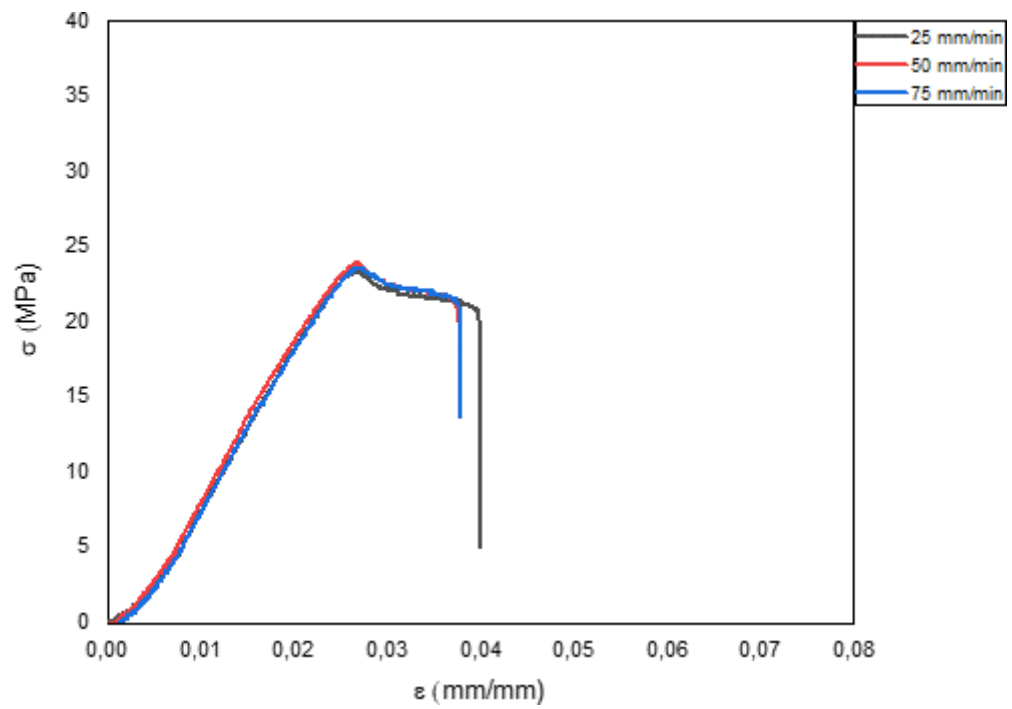
Figura 38 - Efeito da velocidade de impressão sobre o LRT



Fonte: Autor (2021)

Tratando-se da velocidade de impressão, detectou-se que a variação desse parâmetro não apresentou efeitos sobre a resistência das amostras, como comprovado pela Figura 38. Esse comportamento pode ser analisado na curva tensão-deformação da Figura 39, onde não há nenhuma variação significativa das tensões de escoamento, resistência à tração e ruptura.

Figura 39 - Comportamento da curva tensão-deformação para as diferentes velocidades de impressão



Fontes: Autor (2022)

4.2.3 Alongamento

O alongamento do objeto pode ser representado através da capacidade do material se deformar até que o mesmo falhe. Na Tabela 10, é apresentado os valores médios de alongamento de cada combinação e seus respectivos intervalos de confiança.

Tabela 10 - Matriz experimental do alongamento do corpo de prova

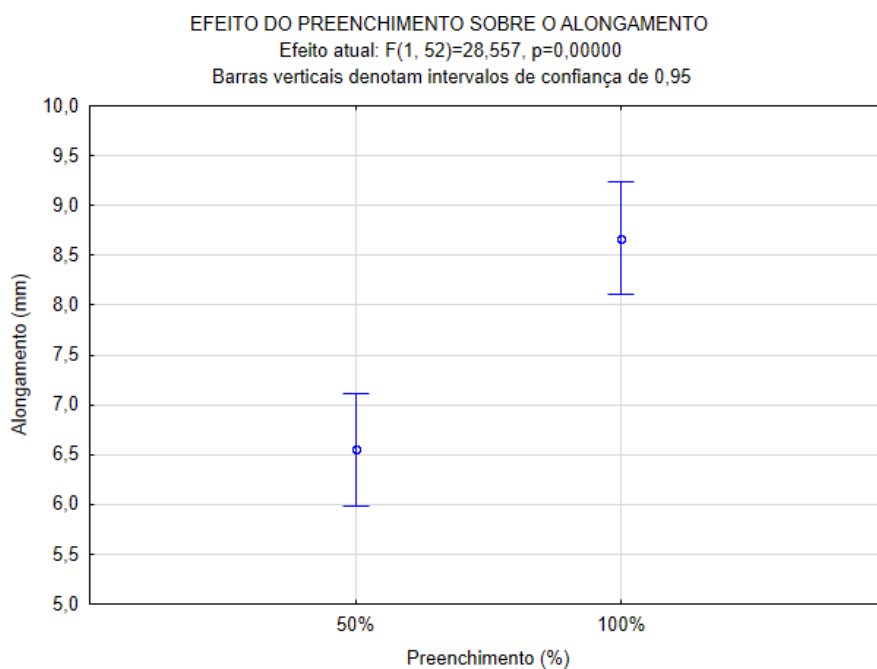
Combinação	Velocidade de impressão (mm/min)	Altura da camada (mm)	Preenchimento (%)	Alongamento na ruptura (mm)
A1	25	0,12	50	6,36 ± 0,40
A2	25	0,12	100	11,97 ± 0,33
A3	25	0,2	50	6,08 ± 0,40
A4	25	0,2	100	8,91 ± 0,28
A5	25	0,32	50	6,42 ± 0,16
A6	25	0,32	100	5,78 ± 0,33
A7	50	0,12	50	6,70 ± 0,42
A8	50	0,12	100	10,45 ± 1,09
A9	50	0,2	50	6,35 ± 0,38
A10	50	0,2	100	7,84 ± 0,87
A11	50	0,32	50	7,08 ± 0,16
A12	50	0,32	100	6,70 ± 0,31
A13	75	0,12	50	6,59 ± 0,34
A14	75	0,12	100	10,27 ± 0,68
A15	75	0,2	50	6,55 ± 0,16
A16	75	0,2	100	8,87 ± 1,33
A17	75	0,32	50	6,84 ± 0,49
A18	75	0,32	100	7,26 ± 0,06

Fonte: Autor (2021)

Analisando a Tabela 10, é possível verificar que as amostras que possuem a seguinte configuração: altura de camada 0,12 mm e nível de preenchimento de 100% e velocidade de impressão de 25 mm/min (combinações A2), obteve o maior alongamento entre todas as amostras ensaiadas, com um valor médio de 11,97 mm de alongamento até romper. Por outro lado, as amostras com altura de camada 0,32 mm e nível de preenchimento de 100% e velocidade de impressão de 25 mm/min (combinações A6), obteve o menor índice de alongamento entre todas as amostras, com um alongamento médio até a ruptura de apenas 5,78 mm. Percebe-se por meio da matriz que a altura de camada é um fator determinante, visto que amostras que possuem maior números de camadas (menores altura de camadas) representaram as que possuem um maior alongamento.

A ANOVA, permite observar quais parâmetros terão maior grau de influência no alongamento da peça ao ser exposta a forças de tração. A Figura 40 apresenta o comportamento do alongamento ao alterar a densidade de preenchimento.

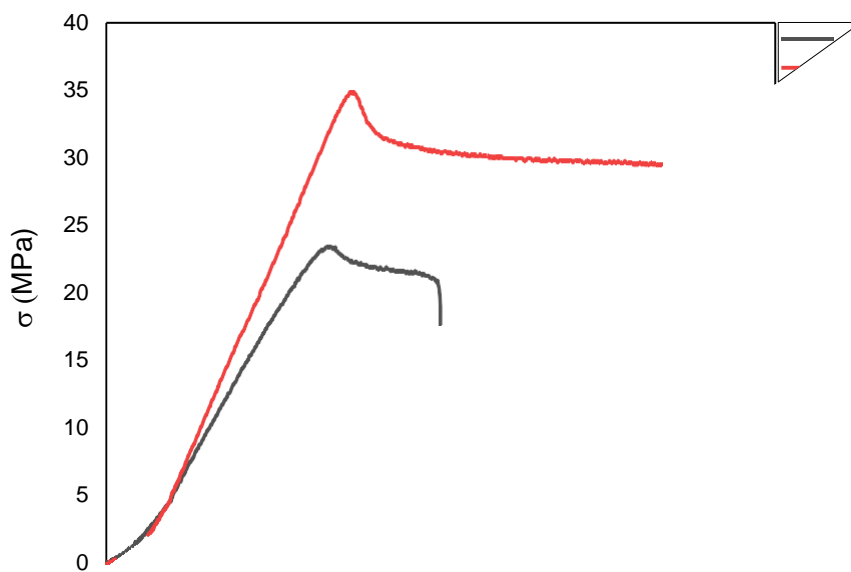
Figura 40 - Efeito do nível de preenchimento sobre o alongamento



Fonte: Autor (2021)

O parâmetro que possui maior influência sobre o alongamento da amostra, de acordo com a ANOVA, foi o da densidade de preenchimento, pois a significância obtida foi de $P \ll 0,05$, apresentando-se com maior alongamento tão quanto maior for a densidade de preenchimento. Esse comportamento pode ser explicado pela densidade de preenchimento no interior da amostra, tendo em vista que, quanto maior essa densidade maior a capacidade do objeto deformar sem que haja a ruptura, uma vez que, haverá maior aderência entre as camadas.

Figura 41 - Comportamento da curva tensão-deformação para os diferentes níveis de preenchimento

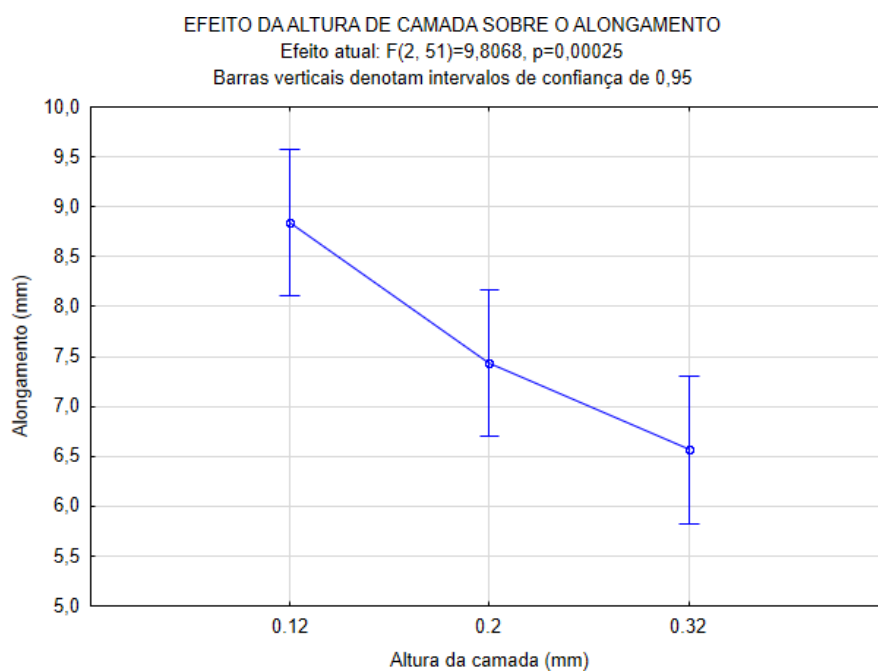


Fonte: Autor (2022)

Através da Figura 41, é perceptível a diferença de alongamento entre os corpos de prova parcialmente e totalmente preenchidos, uma vez que a curva apresenta valores mais elevados de deformação para os corpos totalmente preenchidos. Por tanto, pode-se aferir que as amostras com 100% de preenchimento são as que apresentam maior ductilidade, pois conseguem ter maior deformação sem sofrer a ruptura.

Corroborando com os dados obtidos, Lima e Santos (2018), ao analisar os seus resultados identificaram que o aumento da densidade de preenchimento nos CPs tinha impacto determinante para que as amostras apresentassem maior grau de alongamento houvesse, uma vez que ao aumentar o nível de preenchimento de 5% para 50% houve diferença média de cerca de 3 mm no alongamento das amostras.

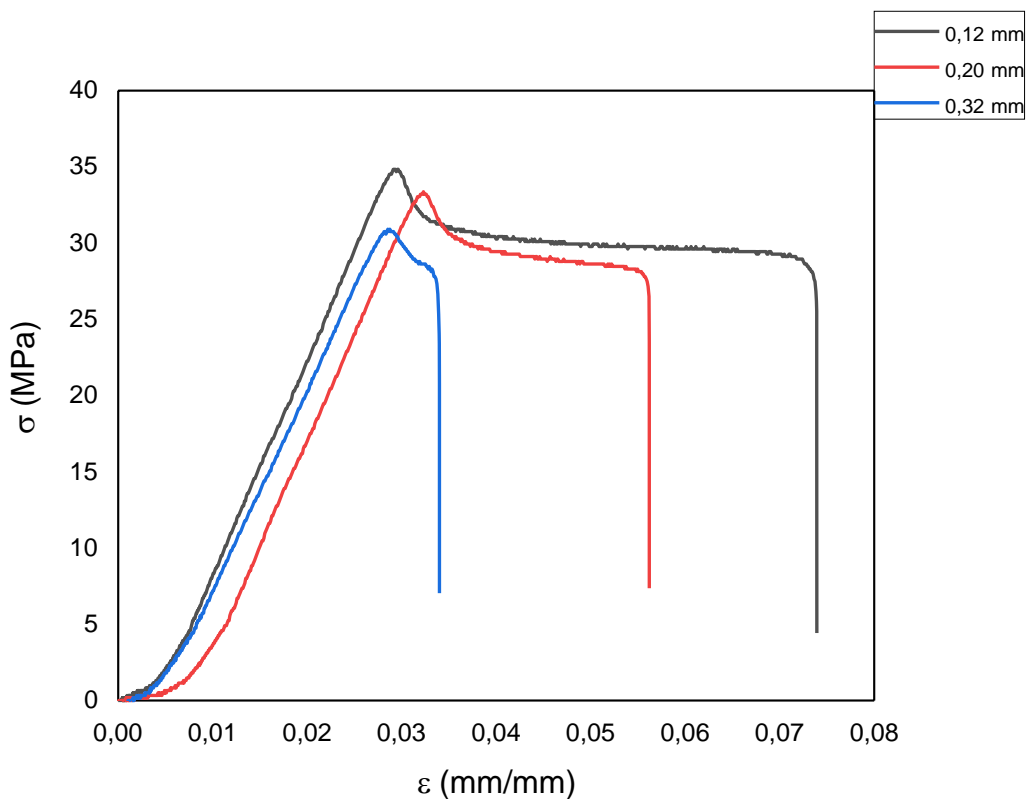
Figura 42 - Efeito da altura de camada sobre o alongamento



Fonte: Autor (2021)

A altura de camada também apresenta efeitos significativos no alongamento dos CP's, de acordo com a análise de variância, tendo em vista que, $P < 0,05$. Tal comportamento está associado a quantidade de camadas depositadas, pois para alturas menores haverá uma maior quantidade de camadas depositadas para o mesmo objeto, reduzindo espaços vazios entre as camadas e conseqüentemente haverá maior aderência entre elas. Por conseguinte, ao aumentar essa altura haverá menores quantidades de camadas depositadas, apresentando assim uma menor aderência entre elas, resultando em menores alongamentos se comparado com as de camadas menores.

Figura 43 - Comportamento da curva tensão-deformação para as diferentes alturas de camada

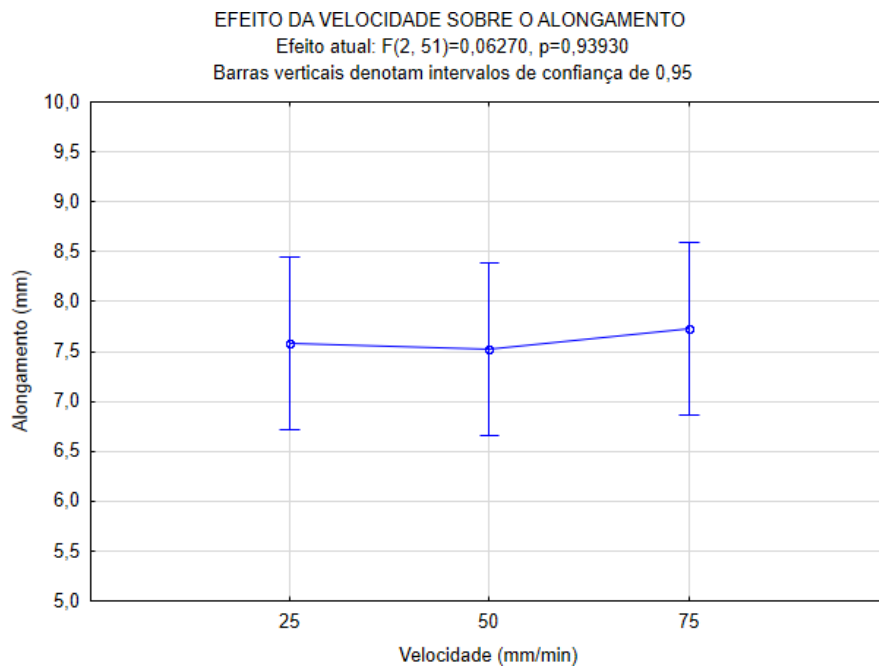


Fonte: Autor (2022)

As curvas de tensão-deformação ilustrada na Figura 43, mostra um padrão uma tendência para o aumento na deformação do material à medida que a altura de camada é reduzida. Por tanto, quanto menor a altura de camada nas amostras maior a ductilidade que essa irá apresentar.

Galina (2017), obteve resultados semelhantes ao analisar o comportamento do alongamento da peça ao aumentar a altura de camada. Em seus estudos, a autora atribui como fator determinante para esses resultados o aumento da quantidade de camadas depositadas para a fabricação da amostra, ocasionando na melhor aderência dos filamentos.

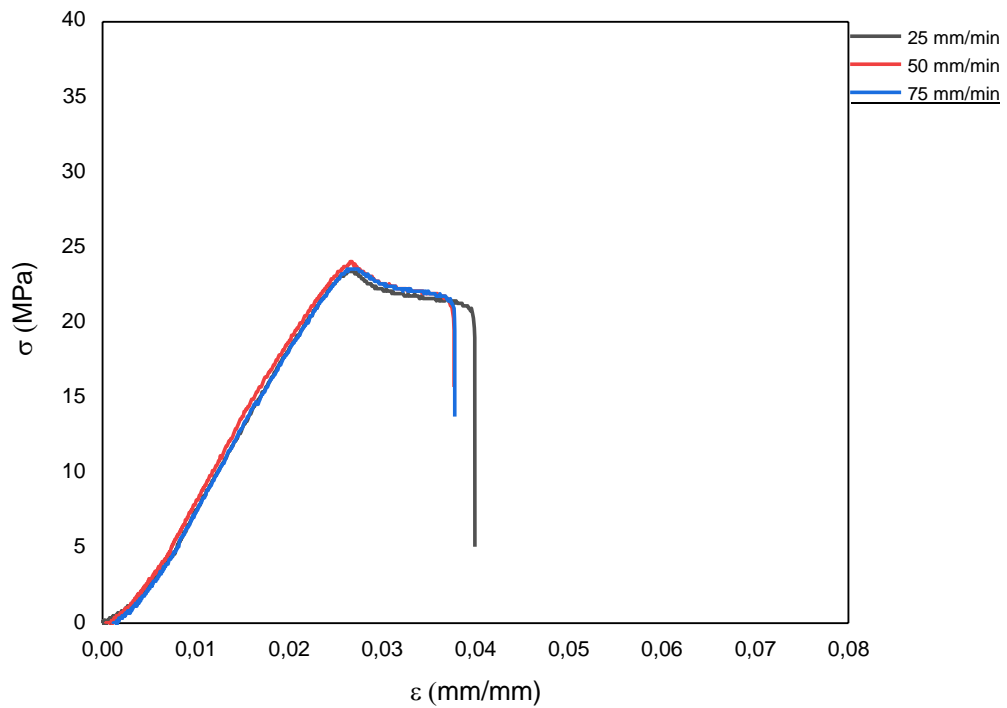
Figura 44 - Efeito da velocidade de impressão sobre o alongamento



Fonte: Autor (2021)

Novamente a velocidade de impressão não apresentou efeitos significativos sobre a deformação das amostras, como comprovado pela Figura 44, uma vez que, as barras de intervalo de confiança praticamente não sofrem alteração ao alterar a velocidade. Outro fator que comprova essa afirmação é o valor de $P \gg 0,05$.

Figura 45 - Comportamento da curva tensão-deformação para as diferentes velocidades de impressão



Fonte: Autor (2022)

Comprovando os dados obtidos pela análise de variância, as curvas tensão-deformação da Figura 45, mostram que a diferença de deformação ao alterar a velocidade de impressão é praticamente nula. Logo ao alterar a velocidade, não haverá impactos sobre o alongamento do material.

4.3 Tempo de impressão

A Tabela 11, apresenta o tempo médio gasto para imprimir cada combinação e seus respectivos intervalos de confiança.

Tabela 11 - Matriz experimental tempo de impressão

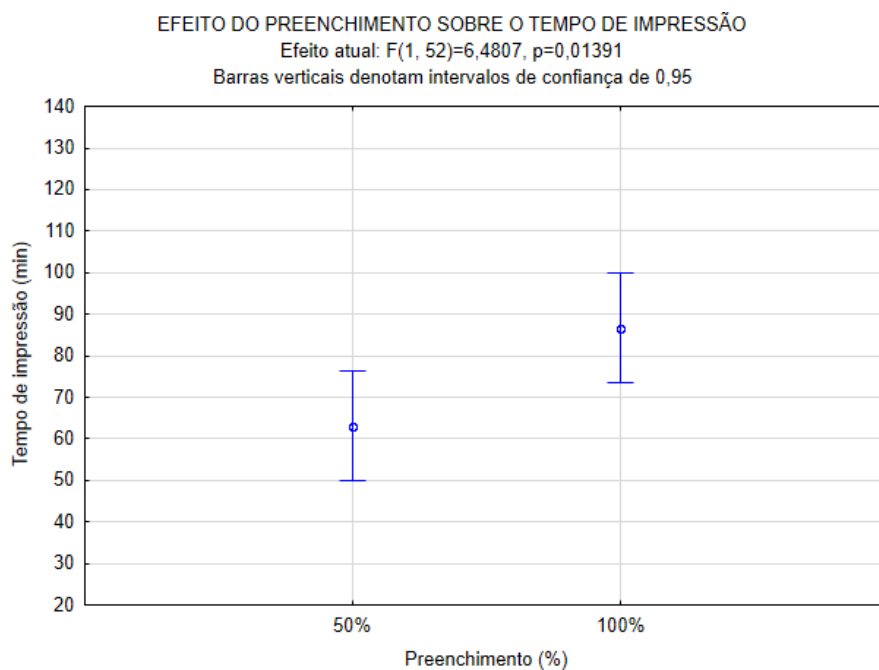
Combinação	Velocidade de impressão (mm/min)	Altura da camada (mm)	Preenchimento (%)	Tempo de impressão (min)
A1	25	0,12	50	125,13
A2	25	0,12	100	165,65
A3	25	0,2	50	81,09
A4	25	0,2	100	100,52
A5	25	0,32	50	56,94
A6	25	0,32	100	64,30
A7	50	0,12	50	78,46
A8	50	0,12	100	121,42
A9	50	0,2	50	50,64
A10	50	0,2	100	71,09
A11	50	0,32	50	35,55
A12	50	0,32	100	43,24
A13	75	0,12	50	66,84
A14	75	0,12	100	108,66
A15	75	0,2	50	43,19
A16	75	0,2	100	63,21
A17	75	0,32	50	29,60
A18	75	0,32	100	42,12

Fonte: Autor (2021)

De acordo com a Tabela 11, é possível verificar que as amostras que possuem a seguinte configuração: altura de camada 0,12 mm e nível de preenchimento de 100% e velocidade de impressão de 25 mm/min (combinações A2), dentre todas as amostras foi aquela que teve o maior tempo de impressão de aproximadamente 165 minutos. Já a amostra com altura de camada 0,32 mm, nível de preenchimento de 50% e velocidade de impressão de 75 mm/min (combinação A17), foi a combinação que demandou menor tempo de impressão dentre todas as amostras, com um tempo aproximado de 29,6 minutos. Percebe-se por meio da matriz que todos os parâmetros causam influência no tempo de impressão da amostra.

É possível observar os efeitos de cada parâmetro no tempo de impressão de cada amostra através da análise de variância. As Figuras 45, 46 e 47, estarão apresentando como os corpos de prova se comportam ao alterar os fatores escolhidos.

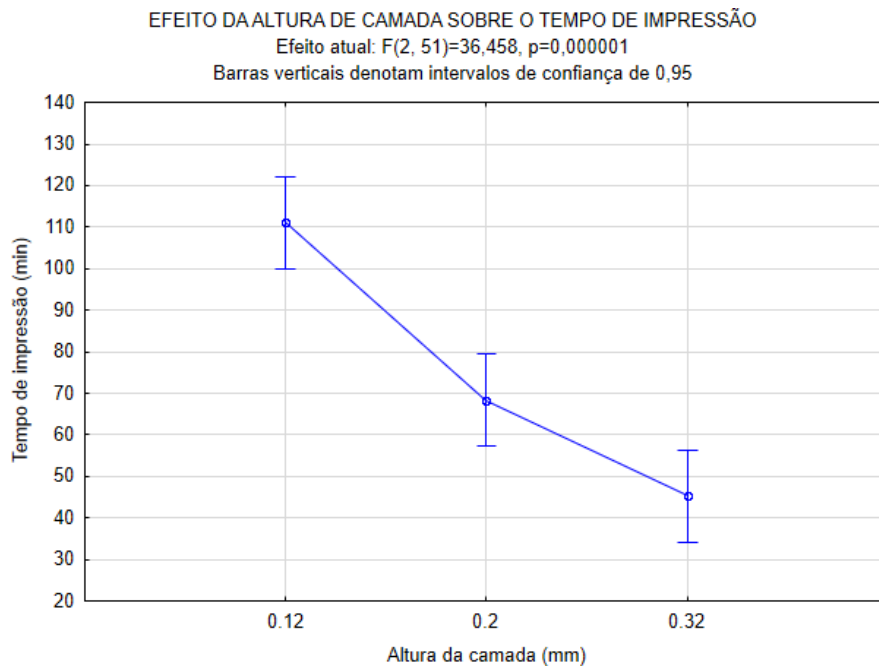
Figura 46 - Efeito do nível de preenchimento sobre o tempo de impressão



Fonte: Autor (2021)

Dos CP's analisados, observou-se que as amostras que apresentaram maior tempo de impressão foram aquelas que tinham maior nível de preenchimento, sendo que esses resultados são considerados significativos, uma vez que $P < 0,05$. Esse fato está atrelado ao aumento da densidade de preenchimento do material, pois haverá uma redução da quantidade de espaços vazios no interior da peça, acarretando em um maior tempo de impressão, visto que, haverá mais percurso para depositar material.

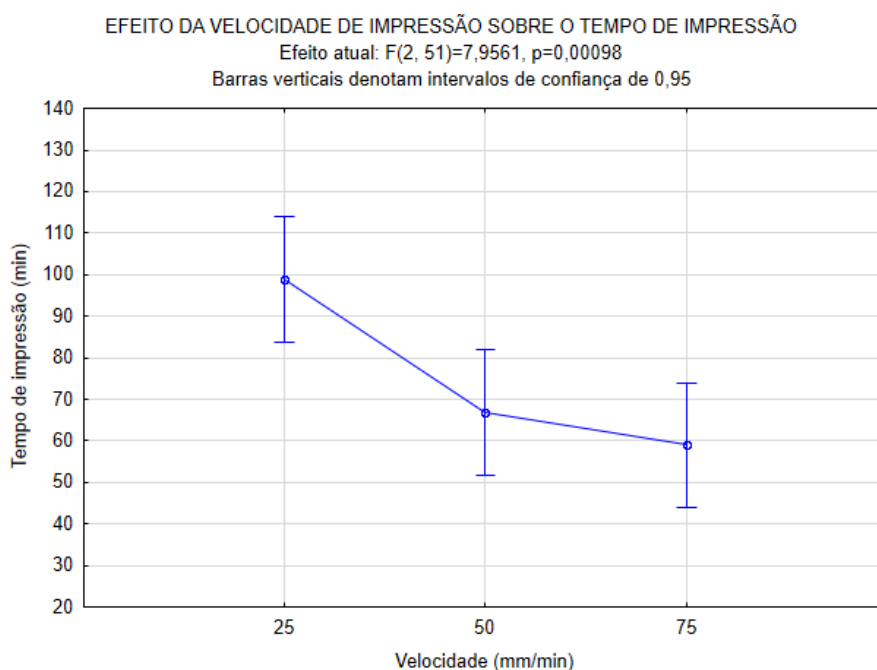
Figura 47 - Efeito da altura de camada sobre o tempo de impressão



Fonte: Autor (2021)

Estatisticamente a altura de camada apresenta uma maior relevância na determinação do tempo de impressão, pois o valor do teste encontrado foi um $P \ll 0,05$. Levando em consideração que todos os CP's têm a mesma espessura, percebe-se uma relação inversamente proporcional, tendo que, ao diminuir a altura de camada haverá o aumento do número de camadas depositadas para finalizar o objeto, acarretando em maior tempo de impressão.

Figura 48 - Efeito da velocidade de impressão sobre o tempo de impressão



Fonte: Autor (2021)

Analisando o efeito da velocidade de impressão, que representa a velocidade em que o bico extrusor irá depositar material sobre a mesa aquecida, observa-se que quanto maior a velocidade, menor o tempo gasto para a impressão. Ou seja, à proporção que a velocidade aumenta o tempo de impressão tende a diminuir, uma vez que, ao imprimir uma peça a uma velocidade 10 mm/s, estima-se que demore 50 minutos para que termine, porém ao aumentar a velocidade para 20 mm/s, o tempo de impressão tenderá a cair para aproximadamente 25 minutos.

4.4 Massa da amostra

As massas dos Corpos de Prova são apresentadas na Tabela 12, onde são demonstrados os valores médios de massa para cada combinação e seus respectivos intervalos de confiança.

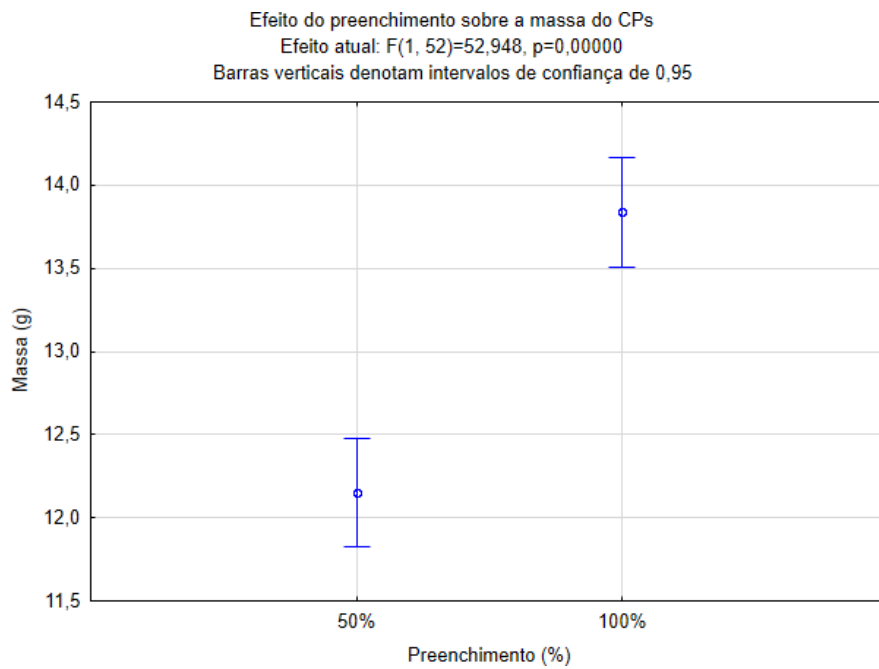
Tabela 12 - Matriz experimental da massa do corpo de prova

Combinação	Velocidade de impressão (mm/min)	Altura da camada (mm)	Preenchimento (%)	Massa (g)
A1	25	0,12	50	11,57 ± 0,01
A2	25	0,12	100	14,37 ± 0,06
A3	25	0,2	50	11,87 ± 0,04
A4	25	0,2	100	14,34 ± 0,03
A5	25	0,32	50	12,72 ± 0,00
A6	25	0,32	100	14,04 ± 0,03
A7	50	0,12	50	11,41 ± 0,03
A8	50	0,12	100	14,35 ± 0,06
A9	50	0,2	50	11,93 ± 0,02
A10	50	0,2	100	14,24 ± 0,03
A11	50	0,32	50	12,60 ± 0,02
A12	50	0,32	100	13,92 ± 0,01
A13	75	0,12	50	11,47 ± 0,03
A14	75	0,12	100	14,20 ± 0,02
A15	75	0,2	50	11,97 ± 0,03
A16	75	0,2	100	14,21 ± 0,04
A17	75	0,32	50	12,29 ± 0,05
A18	75	0,32	100	13,90 ± 0,05

Fonte: Autor (2021)

De acordo com a Tabela 12, é possível verificar que as amostras que possuem a seguinte configuração: altura de camada 0,12 mm e nível de preenchimento de 100% e velocidade de impressão de 25 mm/min (combinações A2), dentre todas as amostras foi aquela que teve a maior massa média, de aproximadamente 14,37g. Já a amostra com altura de camada 0,12 mm, nível de preenchimento de 50% e velocidade de impressão de 50 mm/min (combinação A7), foi a combinação que apresentou a menor massa, com uma massa média de 11,41g. Percebe-se por meio da matriz que o parâmetro de preenchimento dentre todos é o principal influenciador do aumento da massa, uma vez que as maiores massas foram obtidas em CP's com 100% de preenchimento.

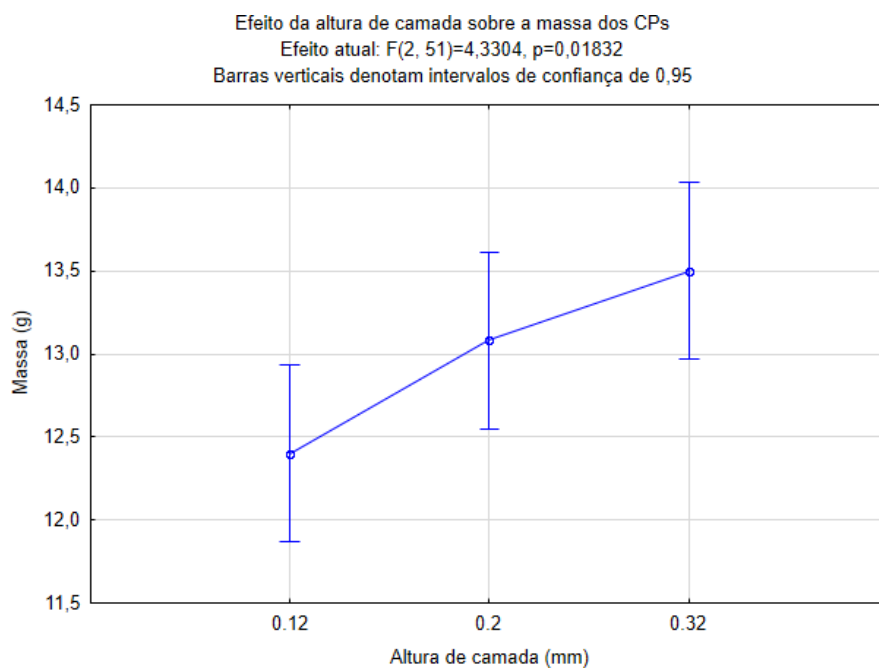
Figura 49 - Efeito do nível de preenchimento sobre a massa do CP



Fonte: Autor (2021)

A densidade de preenchimento é o parâmetro que apresenta maior influência na massa da peça, visto que, quanto maior o nível de preenchimento, maior a quantidade de filamento fundido é depositada para a fabricação da amostra, ocasionando assim o aumento da massa.

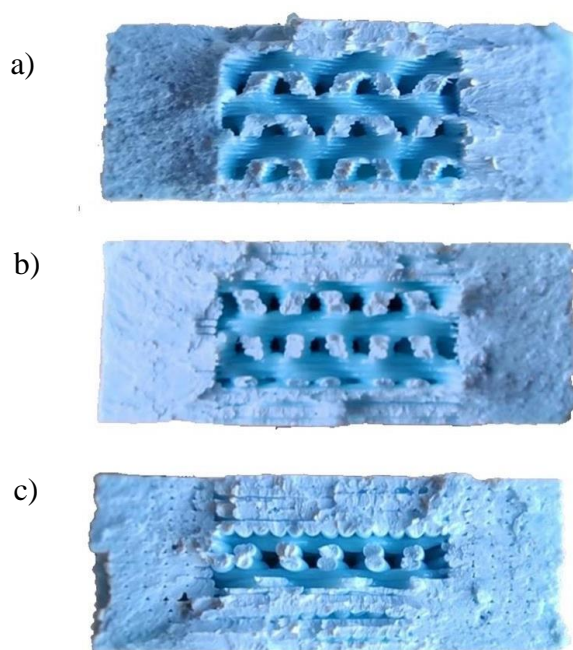
Figura 50 - Efeito da altura de camada sobre a massa do CP



Fonte: Autor (2021)

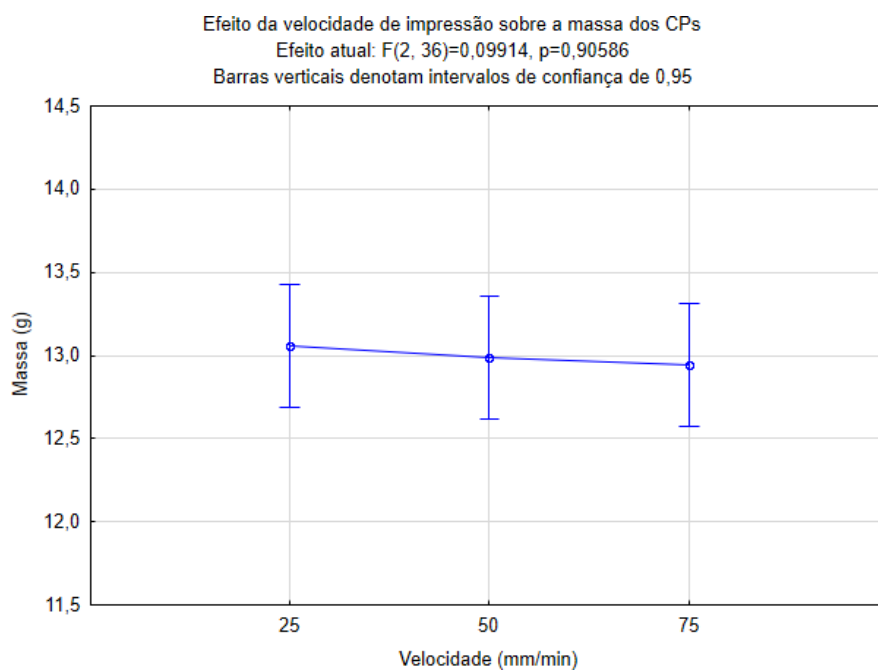
A altura de camada também apresenta efeitos significativos sobre a massa ($P < 0,05$). Percebe-se que ao aumentar a altura da camada a massa também aumentará, esse resultado pode ser atrelado, ao fato de que ao variar a altura da camada haverá variação no nível de preenchimento da peça. Porque o aumento na altura de camada faz com que haja a redução da área de preenchimento da peça, uma vez que, o número de paredes superiores e inferiores também são afetadas por esse parâmetro, de modo que a recíproca para a diminuição da altura de camada também é verdadeira. Porém, se a quantidade de paredes superiores e inferiores não fosse um parâmetro fixo, camadas menores teriam maior massa, haja vista que, haveria redução dos espaços vazios entre camadas. A Figura 51, apresenta a variação de áreas de preenchimento para as 3 alturas utilizadas.

Figura 51 - Efeito da altura de camada no preenchimento interno dos CPs com: a) 0,12 mm; b) 0,20 mm: c) 0,32 mm



Fonte: Autor (2021)

Figura 52 - Efeito da velocidade de impressão sobre a massa dos CPs



Fonte: Autor (2021)

Novamente a velocidade de impressão não apresentou efeitos significativos sobre a massa das amostras, como comprovado pela Figura 52, uma vez que, as barras de intervalo de confiança praticamente não sofrem alteração ao alterar a velocidade. Outro fator que comprova essa afirmação é o valor de $P \gg 0,05$.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência dos parâmetros de impressão 3D (altura de camada, nível de preenchimento e velocidade de impressão), mais especificamente do processo FDM, no aumento das propriedades mecânicas (limite de resistência à tração e alongamento na ruptura), além de analisar suas influências sobre o tempo de impressão e na massa dos corpos de provas fabricados com filamento ABS. Desse modo pôde-se concluir que:

Verificou-se que os parâmetros de nível de preenchimento e altura de camada são aqueles que possuem maior influência sobre o limite de resistência à tração, visto que, ao aumentar a densidade de preenchimento da peça e/ou a diminuição da altura de camada houve um aumento considerável no LRT. Por outro lado, a velocidade de impressão não apresentou nenhum efeito significativo sobre a resistência dos corpos de prova.

Observou-se o comportamento semelhante ao da influência sobre a resistência, onde, os parâmetros nível de preenchimento e altura de camada, são os que apresentaram maiores relevâncias sobre os resultados do alongamento dos CPs. Outrossim, a velocidade novamente não apresentou variações relevantes no alongamento.

Todos os parâmetros apresentaram influências sobre o tempo de impressão. Quanto maior o nível de preenchimento, maior o tempo de impressão, pois, vai necessitar que o bico extrusor deposite maiores quantidades de material fundido na peça. Já ao diminuir a altura de camada, haverá um aumento na quantidade de camadas depositadas, aumentando o tempo de impressão. E a velocidade de impressão como esperado, ao ser aumentada, apresentou tempos de impressão menores.

Já para a massa, percebeu-se que novamente apenas os parâmetros de nível de preenchimento e altura de camada apresentaram efeitos significativos sobre a massa dos CPs. É trivial que ao elevar o nível de preenchimento haja um ganho significativo sobre a massa, resultado esse encontrado no trabalho. A altura de camada, apresentou resultados inversos ao esperado, uma vez que, ao aumentar a altura de camada haverá maiores espaços vazios no interior dos CPs, porém como o número de camadas superiores e inferiores foram determinados como sendo fixo, ao aumentar a altura de camada houve

uma redução da área de preenchimento e o aumento da massa. Mais uma vez, a velocidade de impressão não apresentou efeitos que fossem relevantes para o aumento da massa.

Portanto, ficou perceptível que as variáveis altura de camada e nível de preenchimento apresentaram maiores influências sobre as variáveis de resposta analisadas. Já a velocidade possui menor grau de influência na maioria dos quesitos analisados em comparação com os parâmetros anteriores.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a influência desses parâmetros (Altura de camada, nível de preenchimento e velocidade de impressão) em outros materiais, como o PLA.
- Analisar a influência dos tipos de preenchimento sobre as propriedades mecânicas do CPs.
- Analisar a influência da altura de camada sobre a resistência, com área de preenchimento igual entre os CPs.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J. T. F. **Desenvolvimento de uma impressora FDM tipo delta**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de engenharia, Universidade de Porto. Porto, Portugal, 2017.
- ADDITIVE manufacturing trend report 2021: 3D printing market growth in the year of the COVID-19. **3DHUBS**. 2021. Disponível em: <<https://www.hubs.com/3d-printing/fdm/>>. Acesso em 11 ago 2021.
- AMBRÓS, G. S.; **Influência dos parâmetros de impressão 3D na resistência à tração de corpos de prova impressos em PLA utilizando modelagem por fusão e deposição**. 2019. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 638- 02a**. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. United States, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **F2792 – 12A**: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. 2013.
- ARAUJO, G. G et al. **Impressão 3D e os Parâmetros que influenciam no Produto Final**. In: **SIMPEP - Simpósio de Engenharia de Produção**, 2017, Bauru - SP. Anais do XXIV Simpósio de Engenharia de Produção, 2017.
- BELL, C. **3D Printing with Delta printers**. Nova Iorque: Springer Science+Business Media. 2015.
- BELLINI, A. **Fused Deposition of Ceramics: A Comprehensive Experimental, Analytical and Computational Study of Material Behavior, Fabrication Process and Equipment Design**. 2002. Dissertação de Ph.D – Universidade de Drexel, Filadelfia, USA, 2002.
- CALLISTER, W. D.; **Materials Science and Engineering – an Introduction**, 4^a ed, New York: John Wiley & Sons, 1997.
- CANEVAROLO, S. V. Jr. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 1. ed. São Paulo Artiber Editora, 2002.
- CARNEIRO, O. S.; SILVA, A. F.; GOMES, R. **Fused deposition modeling with polypropylene**. *Materials & Design*, p. 768-776. fev. 2015.
- COSTA, A. R.; Ayres, E.; VASCONCELOS, C. K. B.; COELHO, B. N.; **Estudo e desenvolvimento de um filamento para impressão 3D por meio da aditivação de PET reciclado**. 2019. Exame de qualificação (Mestrando em Redemat Rede Temática Em Engenharia de Materiais U) - Universidade Federal de Ouro Preto.
- COSTA, R. M. B. **Atualização de uma Impressora 3D FDM tipo Delta**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2019.
- CREALITY, 2021. Disponível em: < <https://www.creality.com/br/goods-detail/ender-3-3d-printer>>. Acesso em 18 jan. 2022.
- CUNICO, MARLON. **Impressoras 3D: o novo meio produtivo**. 1. ed. Curitiba: Concep3D Pesquisas Cientificas Ltda. 2015.

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.

FISCHER, M.; **Estudo para readequação, ao de uma impressora 3d de baixo custo para impressão de materiais poliméricos de alta temperatura de processamento**. 2018. Trabalho de conclusão de curso - Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2018.

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.

GERE, M; GOODNO, J. **Mecânica dos materiais** – tradução da 7a edição norte-americana. 7. ed. São Paulo: Cengage, 2010.

GROOVER, MIKELL P. **Fundamentos da moderna manufatura**. Tradução Givanildo Alves dos Santos, Luiz Claudio de Queiroz. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

GTMAX 3D, 2022. Disponível em: < <https://www.gtmax3d.com.br/impressora-3d-pro/gtmax3d-core-h5-simplify3d>>. Acesso em 18 jan. 2022.

GUIA: A tecnologia de impressão 3D. **Brasilia Fab Lab**, 2017. Disponível em: < <https://medium.com/bsbfablab/guia-a-tecnologia-de-impress%C3%A3o-3d-2d8b6b8cb5e5> >. Acesso em 17 ago 2021.

IMPRESSORA 3D: tipos e funcionamento. **ELETROGATE**, 2021. Disponível em: < <https://blog.eletrogate.com/impressoras-3d-como-funcionam-e-quais-os-tipos-existent/>>. Acesso em 01 jan 2022.

IVANOVA, O.; WILLIAMS, C.; CAMPBELL, T. Additive manufacturing (am) and nanotechnology: promises and challenges. **Rapid Prototyping Journal, Emerald Group Publishing Limited**, v. 19, n. 5, p. 353–364, 2013.

JOSEPH R. D.; Tensile testing (2nd ed.), ASM International, 2004.

KRETSCHKEK, D. **Desenvolvimento de um Cabeçote de Extrusão por Êmbolo para Polipropileno Granulado Visando a Manufatura Aditiva**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Brasil, 2012.

LAUERS, J. S.; **Avaliação da influência das variáveis altura da camada, padrão de preenchimento e pigmentação no processo de manufatura aditiva por fusão e deposição de material (FDM) utilizando poliácido láctico (PLA)**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2021.

LAYER THICKNESS in 3D Printing: an additive manufacturing basic. Disponível em: < <https://www.sculpteo.com/en/glossary/layer-thickness-definition/>>. Acesso em: 05 dez. 2021.

LEFTERI, Chris. **Materiais em design** [livro eletrônico] / Chris Lefteri ; tradução de Henrique Eisi Toma. - São Paulo: Blucher, 20 15.

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.

LIMA, R. O. C.; MARTINS, S. O.; SOUSA, K. D.; MEDEIROS, M. A.; Estudo das propriedades mecânicas de polímeros aplicados em manufatura aditiva em comparação a polímero de aplicação industrial. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 3, p. 35-46, fev. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/r4em/issue/view/241>. Acesso em: 18 jan. 2021.

LIRA, V. M. **Processos de fabricação por impressão 3D: Tecnologia, equipamentos, estudos de caso e projeto de impressora 3D**. São Paulo: Blucher, 2021.

LOPES, A. et al. Impressão 3D: **imaginar, planejar e materializar**. Disponível em: <http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/seed_lab/caderno_impressao_3d.pdf>. Acesso: 18 out. 2021.

MANRICH, S.; **Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. São Paulo: Artliber Editora Ltda. 2005.

MASOOD, S.H.; MAU, K.; SONG, W.; **Tensile properties of processed fdm polycarbonate material**. *Mater. Sci. Forum* 2010.

MATHIAS, R. F.; **Análise experimental de amostras produzidas por manufatura aditiva em PLA através de ensaio de tração**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2019.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical behavior of materials**. Cambridge University Press, USA. 2nd Ed., 2009.

O que é a impressão 3D? Guia definitivo. **MOUSTA**, 2018. Disponível em: <<https://www.mousta.com.br/o-que-e-impressao-3d/>>. Acesso em 18 jan. 2022.

NORTON, R. L. *Machine Design*. 4. ed. Mattapoisett: Pearson Education, 2011.

ONLINE manufacturing trends. **3DHUBS**, 2018. Disponível em: <<https://www.hubs.com/3d-printing/fdm/>>. Acesso em 11 ago 2021.

PELEGRINO, A. N.; MONTEIRO, C. K.; MIKOLAYCZYK, K. R.; SANTOS, A. M.; **Comparação de direção de impressão 3d em ABS e PLA produzidos pelo método FDM**. 2019. Memorial de Trabalho de Conclusão de Curso – FAE Centro Universitário, Curitiba, PR, 2019.

PIPES, A. **Desenho para designers**. São Paulo: Blucher, 2010.

PLA: Tudo o que você precisa saber sobre o filamento PLA. **3DFila**, 2020. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/pla-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-filamento-pla/>>. Acesso em 18 jan. 2022.

QUAL a influência da temperatura na impressão 3D?. **3DLAB**, 2017. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/temperatura-na-impressao-3d/>>. Acesso em 16 ago 2021.

QUAL Bico Escolher para Minha Impressora 3D?. **Acelera 3D**, 2019. Disponível em: <<https://acelera3d.com/qual-bico/>>. Acesso em 18 ago 2021.

RASAL, R.M., JANORKAR, A.V., HIRT, D.E., **Poly(lactic acid) modifications**, *Progress in Polymer Science*, v. 35, n. 3, pp. 338-356, 2010.

RAZGRIZ, G; PAIOTTI, R. **O XYZ das Impressão 3D: Tudo o que você gostaria de saber sobre Impressão 3D e não tinha a quem perguntar**. São Paulo: NCB, 2020. 239 p.

- RELVAS, C. **O mundo da impressão 3D e do fabrico digital**. 1. ed. Porto: Publindústria, Produção de Comunicação, Lda, 2018.
- SIEWERT, T. A.; MANAHAN, M. P.; **Pendulum Impact Testing: A Century of Progress**. ASTM International, 2000
- SILVA, C. M. D. **Elaboração de uma linha de extrusão para reciclagem de polímeros (abs e pla)**. In: **Projeto apresentado no 17o Congresso Nacional de Iniciação Científica**, 2017, São Paulo. Anais. São Paulo: CONIC/SEMESP, 2017.
- 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.
- SOUTO, T. V. V.; SOUZA, M. G.; GIL, F. F. **Construção de uma impressora 3D para fins didáticos**. 2019. Trabalho de conclusão de curso - Centro Universitário Unifacvest, Lages, SC, 2019.
- STRATASYS INC. Steven Scott Crump. **Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects**. Minneapolis, EUA, 1989.
- TAKAGAKI, L. K. Tecnologia de Impressão 3D. **Revista Inovação Tecnológica**, v. 2, n. 2, p. 28 - 40, 2012.
- 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.
- VELOCIDADE de impressão 3d: melhores configurações para sua aplicação. **Wishbox**, 2020. Disponível em: <<https://www.wishbox.net.br/blog/velocidade-de-impressao-3d/>>. Acesso em 18 ago 2021.
- VIAU, K. Tipos de preenchimento no Cura! Veja como configurar o infill neste software. **3DLAB**, 2021. Disponível em:<<https://3dlab.com.br/tag/tipos-de-preenchimento/>>. Acesso em 19 ago 2021.
- VOLPATO, N. *et al.* **Prototipagem Rápida: Tecnologia e Aplicações**. Primeira Edição. São Paulo: Blücher, 2007.
- VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2017.
- WELLER, C.; KLEER, R.; PILLER, F. T. Economic implications of 3D printing: market structure models in light of additive manufacturing revisited. **International Journal of Production economics**, v. 164, p. 43-56, 2015.
- WIEBECK, H; HARADA, J. **Plásticos de engenharia: tecnologia e aplicações**. São Paulo: Artliber Editora Ltda. 2005.
- WOHLERS, T. T. **Wohlers report 2008**. Colorado: Wohlers Associates, 2008.
- WOZNY, M. J. **CAD and Interfaces**. in: **JTEC/WTEC Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan**, v. 01, 1997. Relatório. Prototipagem Associação da Sociedade de Engenheiros de fabrico, 1997, p. 69-90.

WU, W.; GENG, P.; LI, G.; ZHAO, D.; ZHANG, H.; ZHAO, J. **Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS.** *Materials* **2015**

YU, T.; REN, J.; LI, S.; YUAN, H.; LI, Y. **Effect of fiber surface-treatments on the properties of poly(lactic acid)/ramie composites.** *Composites: Part A*, n.41, p.499-505, 2010.

ZHANG, W.; WANG, Y. **Synthesis and properties of high molecular weight poly(lactic acid) and its resultant fibers.** *Chinese Journal of Polymer Science*, Vol. 26, No. 4, 425–432, 2008.

ZIEMIAN, S.; OKWARA, M.; ZIEMIAN, C. W. **Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene.** *Rapid Prototyping Journal*, [S.l.] v. 21, n. 3, p. 270- 278, 2015.

APÊNDICE A - DESENHO TÉCNICO CORPO DE PROVA

