



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



PAULO HENRIQUE TEIXEIRA FRANÇA ALVES

**INFLUÊNCIA DO PADRÃO E DENSIDADE DE PREENCHIMENTO NA
RESISTÊNCIA MECÂNICA DE AMOSTRAS FABRICADAS EM PETG VIA
DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO**

OURO PRETO - MG
2021

PAULO HENRIQUE TEIXEIRA FRANÇA ALVES

paulotfa@gmail.com

**INFLUÊNCIA DO PADRÃO E DENSIDADE DE PREENCHIMENTO NA
RESISTÊNCIA MECÂNICA DE AMOSTRAS FABRICADAS EM PETG VIA
DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: Zirlene Alves Da Silva Santos, PhD

Co-orientador: Luiz Guilherme Dias de Barros, MSc

**OURO PRETO – MG
2021**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A474i Alves, Paulo Henrique Teixeira França.
Influência do padrão e densidade de preenchimento na resistência mecânica de amostras fabricadas em PETG via deposição de material fundido. [manuscrito] / Paulo Henrique Teixeira França Alves. - 2021. 82 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Zirlene Alves da Silva Santos.

Coorientador: Me. Luiz Guilherme Dias de Barros.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Manufatura Aditiva. 2. Deposição de Material Fundido. 3. PETG. 4. Padrão de Preenchimento. 5. Densidade de Preenchimento. 6. Propriedades Mecânicas. 7. Compressão. I. Barros, Luiz Guilherme Dias de. II. Santos, Zirlene Alves da Silva. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

PAULO HENRIQUE TEIXEIRA FRANÇA ALVES

INFLUÊNCIA DO PADRÃO E DENSIDADE DE PREENCHIMENTO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE AMOSTRAS FABRICADAS EM PETG VIA DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 08 de Dezembro de 2021

Membros da banca

PhD, Zirlene Alves da Silva Santos - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
MSc, Luiz Guilherme Dias de Barros - Instituto Tecnológico Vale
DSc, Vinícius Carvalho Teles - Universidade Federal de Ouro Preto
MSc, Héctor Ignacio Azpúrua Perez-Imaz, MSc - Instituto Tecnológico Vale

Zirlene Alves da Silva Santos, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/12/2021



Documento assinado eletronicamente por **Zirlene Alves da Silva Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/12/2021, às 21:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0255760** e o código CRC **965F148F**.

Meus sinceros agradecimentos aos meus pais Neusa e João, a minha noiva Laura e aos meus orientadores Zirlene, Luiz e Héctor, sem vocês nada disso seria possível...

AGRADECIMENTO

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais Neusa Maria e João Carlos por sempre me proporcionarem condições de me tornar quem sou hoje, à minha noiva Laura por todo ensinamento e apoio incondicional, sem vocês eu dificilmente chegaria tão longe.

Sou eternamente grato também aos meus orientadores Zirlene, Luiz e Héctor, foi um prazer ter a oportunidade de passar parte do meu tempo com vocês e sempre vou me lembrar por toda paciência, carinho e atenção que todos sempre tiveram por mim.

Ao Instituto Tecnológico Vale e colaboradores, por me conceber a oportunidade de ser um pesquisador, pela confiança depositada em mim e por todo ensinamento. À gloriosa Escola de Minas e ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) por me fornecer as ferramentas e conhecimento para que eu pudesse me tornar um engenheiro.

“Um dia você aprende que as circunstâncias e os ambientes têm influência sobre nós, mas nós somos responsáveis por nós mesmos. Começa a aprender que não se deve comparar com outros, mas com o melhor que pode ser. Descobre que se leva muito tempo para se tornar a pessoa que quer ser, e que o tempo é curto. Aprende que não importa onde já chegou, mas para onde está indo”.

William Shakespeare

RESUMO

A manufatura aditiva é um dos processos da fabricação de maior potencial das últimas décadas. Seu método de construção a partir de camadas sobrepostas permite a criação de geometrias complexas; além de possuir uma baixa taxa de desperdício de matéria prima. Existem diversos processos de manufatura aditiva, dentre eles, a Deposição de Material Fundido (FDM), um processo que deposita o material fundido sob uma plataforma por meio de camadas sobrepostas resultando na construção de determinada estrutura. Existem diversos parâmetros que regem sob as propriedades do material impresso via FDM como a orientação de construção, a orientação angular de deposição, a espessura de camada, o padrão de preenchimento, a densidade de preenchimento, o perímetro externo, o preenchimento de ar, os vazios, a velocidade de extrusão, a temperatura de extrusão e os materiais. Com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas à compressão de amostras variando o padrão e a densidade de preenchimento, foram impressas amostras em PETG com diversos padrões de preenchimento propostos pelo fatiador Simplify 3D. As amostras impressas utilizaram dos padrões *Fast Honeycomb*, *Full Honeycomb*, *Grid*, *Rectilinear*, *Triangular* e *Wiggle* para densidades de 25% e 50%. As amostras com preenchimento linear com 100% de densidade também foram impressas e testadas para fins de comparação. Todas amostras foram fabricadas e submetidas ao teste de compressão respeitando o procedimento proposto pela Norma ASTM-D695. Cada padrão de preenchimento apresentou propriedades mecânicas à compressão distintas. O aumento de densidade aumentou a resistência à compressão de forma não linear à densidade de preenchimento e a mudança das propriedades mecânicas entre amostras de mesmo padrão e densidades diferentes, não ocorre da mesma forma para todos os padrões de preenchimento.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Deposição de Material Fundido, PETG, Padrão de Preenchimento, Densidade de Preenchimento, Propriedades Mecânicas, Compressão.

ABSTRACT

Additive manufacturing is one of the manufacturing processes with the highest potential in recent decades. The methodology of building overlapping layers allows the creation of complex geometries with a low material waste rate. Fused Deposition Modeling (FDM), one of the many additive manufacturing processes, deposits layers of fused material to create a structure. Several parameters can influence the material's properties printed via FDM, such as the building orientation, the deposition angular orientation, the layer thickness, the infill pattern, the infill density, the outer perimeter, the air gaps, the voids, extrusion speed, extrusion temperature, and materials. The PETG samples were printed varying the fill patterns and densities using the available settings at Simplify 3D slicer. The printed samples used Fast Honeycomb, Full Honeycomb, Grid, Rectilinear, Triangular, and Wiggle patterns for densities of 25% and 50%. The specimens with linear patterns and 100% infill density were also printed and tested for comparison purposes. All samples were manufactured and tested according to the procedure proposed by ASTM-D695 Standard. Each filling pattern presented different mechanical properties to compression. The increase in density raised the compressive strength non-linearly to the filling density and, the change in mechanical properties between samples of the same pattern and different densities does not occur in the same way for all fill patterns.

Key-words: Additive Manufacturing, Fused Deposition Modeling, PETG, Infill Pattern, Infill Density, Mechanical Properties, Compression.

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIACÖES

% – Porcentagem

ε_c – Deformação Convencional

ε_r – Deformação Real

σ_c – Tensão Convencional

σ_r – Tensão real

A_0 – Área inicial

A_i – Área instantânea

l_0 – Comprimento Inicial

l_f – Comprimento Final

° – Graus

°C – Graus Celcius

3DP – Impressão de Três Dimensões

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

ASTM – Sociedade Americana de Testes e Materiais

CAD – Desenho Assistido por Computador

CAE – Engenharia Assistida por Computador

CAM – Manufatura Assistida por Computador

CJP – Impressão por Jateamento Colorido

cm³ - Centímetros Cúbicos

DDM – Modelagem por Deposição de Massa

DLP – Processamento de Luz Digital

DMD – Deposição de Material Direta

FDM – Deposição de Material Fundido

FEM – Método dos Elementos Finitos

g – gramas

GPa – Giga Pascal

ICT – Tecnologias de Informação e Comunicação

IoT – Internet das Coisas

ITV – Instituto Tecnológico Vale

MJM – Modelagem por Jateamento Múltiplo

mm – Milímetros

MPa – Mega Pascal

P – Carga

Pa – Pascal

Pa6 – Poliamida

PETG – Polietileno Tereftalato Glicol

PLA – Polilactida

PSB – Peça Sob a Base

PSF – Peça Sob a Face

PSL – Peça Sob a Lateral

RFID – Sensores de Rádio Frequência

SLA – Estereolitografia

SLS – Sinterização Seletiva a Laser

STL – Linguagem de Padrão Triangular

E – Módulo de Elasticidade

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação da manufatura tradicional vs Impressão 3D para a produção de um gabarito para rodas.....	2
Figura 2 - Ciclo de desenvolvimento de protótipo através da prototipagem rápida.....	3
Figura 3 - Dispositivo de Lançamento de tags RFID.	7
Figura 4 - Tecnologia CAE e suas subdivisões.	9
Figura 5 - Refinamento de Malha Triangular.....	10
Figura 6 - Construção do modelo STL.	11
Figura 7 - Processo de Impressão 3D.	13
Figura 8 - Setores industriais que utilizam Manufatura Aditiva.	13
Figura 9 - Processo de impressão 3D utilizando as tecnologias a laser.	14
Figura 10 - Processo de impressão 3D utilizando a tecnologia de flashes.....	15
Figura 11 - Processo de impressão 3D utilizando a tecnologia de extrusão.....	16
Figura 12 - Processo de impressão 3D utilizando a tecnologia de jateamento.....	17
Figura 13 - Orientação de construção.....	18
Figura 14 - Tipos de orientações angulares de deposição.	19
Figura 15 - Influência da orientação angular de deposição no ensaio de tração.	20
Figura 16 - Parâmetros de impressão observados de perto.	21
Figura 17 - Influência da porcentagem de preenchimento, espessura da camada, orientação angular e diâmetro do bico no ensaio de tração.....	21
Figura 18 - Influência da porcentagem de preenchimento, espessura da camada, orientação angular e diâmetro do bico no ensaio de flexão.	22
Figura 19 - Padrões de Preenchimento propostos pelo Simplify 3D.....	23
Figura 20 - Densidades de preenchimento.	24
Figura 21 - Propriedade de perímetro externo.....	25
Figura 22 - Preenchimento de ar.....	25

Figura 23 - Microscopia utilizada para análise de Vazios.....	26
Figura 24 - Comportamento tensão-deformação para o poliestireno cristal ensaiado em tração e compressão.....	32
Figura 25 - Amostra para ensaio de compressão.....	37
Figura 26 - Propriedades do gráfico para determinação do limite de escoamento.....	42
Figura 27 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra <i>FastHoneycomb</i> 25%.....	43
Figura 28 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra <i>FastHoneycomb</i> 50%.....	44
Figura 29 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra <i>FullHoneycomb</i> 25%.....	45
Figura 30 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra <i>FullHoneycomb</i> 50%.....	45
Figura 31 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra <i>Grid</i> 25%.....	46
Figura 32 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra <i>Grid</i> 50%.....	47
Figura 33- Gráfico Tensão x Deformação da amostra <i>Rectilinear</i> 25%.....	48
Figura 34 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra <i>Rectilinear</i> 50%.....	48
Figura 35 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra <i>Triangular</i> 25%.....	49
Figura 36 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra <i>Triangular</i> 50%.....	50
Figura 37 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra <i>Wiggle</i> 25%.....	51
Figura 38 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra <i>Wiggle</i> 50%.....	51
Figura 39 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra <i>Linear</i> 100%.....	52
Figura 40 – Gráfico de comparação da massa média de todas amostras.....	53
Figura 41 – Gráfico de comparação do módulo de elasticidade médio de todas amostras.....	53
Figura 42 – Gráfico de comparação do limite de escoamento médio de todas amostras.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Metodologia de Projetos.....	3
Tabela 2 - Propriedades de filamentos média para diversos fabricantes.....	27
Tabela 3 - Configurações para confecção dos corpos de prova de compressão.....	38
Tabela 4 - Deposição de padrões em orientação PSB.....	39
Tabela 5 - Tabela de Variáveis e Indicadores.....	40
Tabela 6 - Comparação geral das amostras	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.2	JUSTIFICATIVA	5
1.3	OBJETIVOS	7
1.3.1	Geral	7
1.3.2	Específicos.....	7
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS NECESSÁRIAS	9
2.1.1	Tecnologia CAE	9
2.1.2	Modelação Geométrica e Desenho	10
2.1.3	Fatiadores	12
2.2	PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D	13
2.2.1	Tecnologias a Laser	14
2.2.2	Tecnologia de Flashes	15
2.2.3	Tecnologias de Extrusão.....	15
2.2.4	Tecnologias de Jateamento.....	16
2.2.5	Outras tecnologias	17
2.3	PROCESSO FDM E SUAS VARIÁVEIS	17
2.3.1	Orientação de Construção.....	18
2.3.2	Orientação Angular de Deposição	19
2.3.3	Espessura de Camada	20
2.3.4	Padrão de Preenchimento	22
2.3.5	Densidade de Preenchimento.....	24
2.3.6	Perímetro Externo.....	24
2.3.7	Preenchimento de ar e vazios	25
2.3.8	Velocidade de Extrusão	26
2.3.9	Temperatura de Extrusão.....	27
2.4	MATERIAIS DE IMPRESSÃO 3D.....	27
2.4.1	Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	28
2.4.2	Polilactida (PLA).....	28
2.4.3	Polietileno Tereftalato Glicol (PETG).....	28
2.4.4	Poliamida (Pa6)	28

2.4.5	Compósitos de Carbono	29
2.5	ENSAIOS E NORMAS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS	29
2.5.1	Tensão.....	30
2.5.2	Deformação	30
2.5.3	Módulo de Elasticidade	30
2.5.4	Módulo de Tenacidade	31
2.5.5	Módulo de Ductilidade	31
2.5.6	Limite de escoamento	31
2.5.7	Limite de Resistência.....	31
2.5.8	Limite de Ruptura.....	32
2.5.9	Ensaio de Compressão.....	32
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	33
3	METODOLOGIA.....	34
3.1	TIPO DE PESQUISA.....	34
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.2.1	Materiais	35
3.2.2	Métodos	36
3.3	VARIÁVEIS E INDICADORES	40
3.4	INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS	40
3.5	TABULAÇÃO DOS DADOS.....	41
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	FAST HONEYCOMB.....	43
4.2	FULL HONEYCOMB	44
4.3	GRID	46
4.4	RECTILINEAR	47
4.5	TRIANGULAR	49
4.6	WIGGLE	50
4.7	LINEAR 100%	52
4.8	ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS DA PESQUISA EXPERIMENTAL	52
4.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	56
5	CONCLUSÃO.....	57
5.1	CONCLUSÕES	57

5.2 RECOMENDAÇÕES.....57

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....59

1 INTRODUÇÃO

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A evolução biológica e cultural humana está intimamente ligada à inovação tecnológica. De acordo com Ambrose (2001), a fabricação de ferramentas de pedra foi iniciada pela sociedade de Australopitecos a aproximadamente 2.5 milhões de anos. Uma vez que este limite adaptativo foi cruzado, a evolução tecnológica começou a ser acompanhada pela ascensão no tamanho da população, expansão geográfica e aumento do cérebro destes seres primitivos. Ambrose (2001) ainda enfatiza que aspectos comportamentais, economia, capacidade mental, função neurológica, origem linguística e gramatical e sistemas sociais, todos estes aspectos se deram com o avanço da tecnologia paleolítica.

Ao aproximar dos tempos atuais, é possível entender melhor a influência do avanço tecnológico sob uma sociedade ao observar o impacto da 1ª, 2ª e 3ª revolução industrial. De acordo com Pozdnyakova *et al.* (2019), estas revoluções representaram marcos históricos de desenvolvimento humano, gerando não só o desenvolvimento da ciência e tecnologia, mas também, mudanças estruturais na sociedade e em construções urbanas.

Dalenogare *et al.* (2018) afirmam que no século 21, foi iniciada a 4ª revolução industrial, mais conhecida como indústria 4.0. Essa revolução tem como característica a integração entre as operações de processo de manufatura e as tecnologias de informação e comunicação (ICT - do inglês *Information and Communication Technologies*), em especial a internet das coisas (IoT - do inglês *Internet of Things*). Este novo estágio industrial, sob a perspectiva operacional, tem proporcionado uma redução de custo e tempo de processos, resultando em uma maior produtividade.

Wiltgen (2019) descreve que a manufatura aditiva possui um papel fundamental na indústria 4.0 em função da sua capacidade de otimizar o desenvolvimento de protótipos e novos produtos. De acordo com Haleem e Javaid (2019), a partir da construção de diversas camadas sobrepostas, este processo permite a criação de geometrias de alta complexidade com uma mínima alteração do custo de produção, ainda além, o processo demonstra uma alta capacidade de acurácia dimensional. Diferente de outros métodos de fabricação, alguns processos de manufatura aditiva permitem que conjuntos sejam impressos sem que haja necessidade do processo de montagem (GAO *et al* 2015).

O processo de impressão 3D utiliza como base o princípio da manufatura aditiva. Haleem e Javaid (2019) citam que existem diversos processos de impressão 3D como a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), a Estereolitografia (SLA), a Deposição de Material Fundido (FDM), entre outros. O processo pode utilizar diversos tipos de materiais de fabricação, dentre eles polímeros, cerâmicas e metais.

Redwood, Schffer e Garret (2017) citam que em 2016 uma instalação da Volkswagen economizou aproximadamente 150.000 euros em gabaritos e acessórios, ao transicionar o processo de produção de manufatura tradicional para impressão 3D (Figura 1).

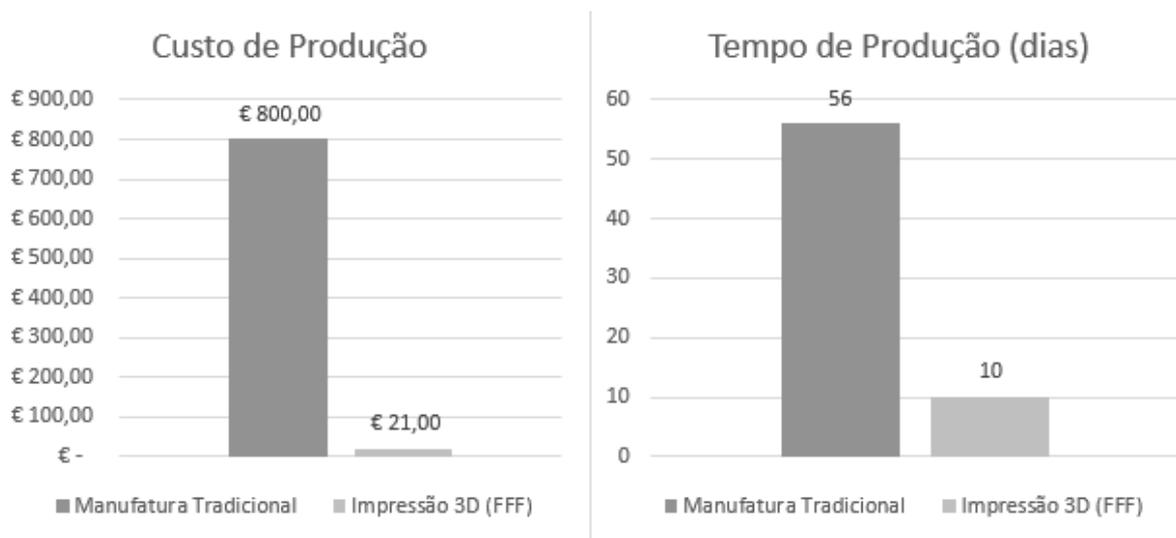


Figura 1 - Comparação da manufatura tradicional vs Impressão 3D para a produção de um gabarito para rodas. Fonte: Adaptado de Redwood, Schffer e Garret (2017)

A Figura 1 demonstra a diferença de custo e tempo entre os processos para a produção de um gabarito para rodas. De acordo com o mesmo autor, além da economia financeira e de tempo, os equipamentos produzidos por impressão 3D demonstraram ser mais ergonômicos e renderam um engajamento maior do operador, visto que é possível incorporar os feedbacks através de uma interação no design.

Assim como na indústria, o processo de Impressão 3D é de extrema importância para o setor de pesquisa e desenvolvimento, medicina, arquitetura e diversos outros setores. Wong e Hernandez (2012) enfatizam que o estudo de diferentes tipos de materiais impressos tem possibilitado o desenvolvimento de materiais leves e resistentes, estes, podem ser utilizados em modelos arquitetônicos, transplantes ósseos, impressão de células para construção de tecido humano e principalmente projetos mecânicos.

Quando relacionado a projetos mecânicos, a impressão 3D assume um papel importante na Metodologia de Projetos (Tabela 1) proposta por Norton (2013).

Tabela 1 - Metodologia de Projetos

Metodologia de Projetos		
1	Identificação da necessidade	Exposição simplificada do problema
2	Pesquisa de suporte	Pesquisa para definição e compreensão do problema
3	Definição dos objetivos	Exposição completa do problema
4	Especificação de tarefas	Determinação das tarefas que fecham o problema e limitam seu alcance
5	Síntese	Concepção ou invenção de alternativas de projeto
6	Análise	Crítica sob as concepções propostas na etapa anterior
7	Seleção	Seleção da melhor concepção proposta
8	Projeto Detalhado	Realização de croquis de engenharia, identificação de fornecedores, especificação do processo de fabricação, etc.
9	Protótipo Teste	Primeira construção real do projeto
10	Produção	Construção em escala

Fonte: Adaptado de Norton (2013)

A impressão 3D se mostra presente principalmente na etapa de protótipo teste (etapa 9) observada na Tabela 1. De acordo com Vinodh *et al.* (2020), com a ascensão da utilização da impressão 3D, surgiram metodologias novas que utilizam da tecnologia para otimizar processos, dentre elas a prototipagem rápida. Esta tecnologia busca fabricar protótipos 3D, modelados através de tecnologias CAD (Desenho Assistido por Computador, do inglês, *Computer Aided Design*) de forma ágil (SINGH, 2020)

Para implementação do processo de prototipagem rápida, é interessante seguir um determinado padrão, que pode ser observado pela Figura 2.

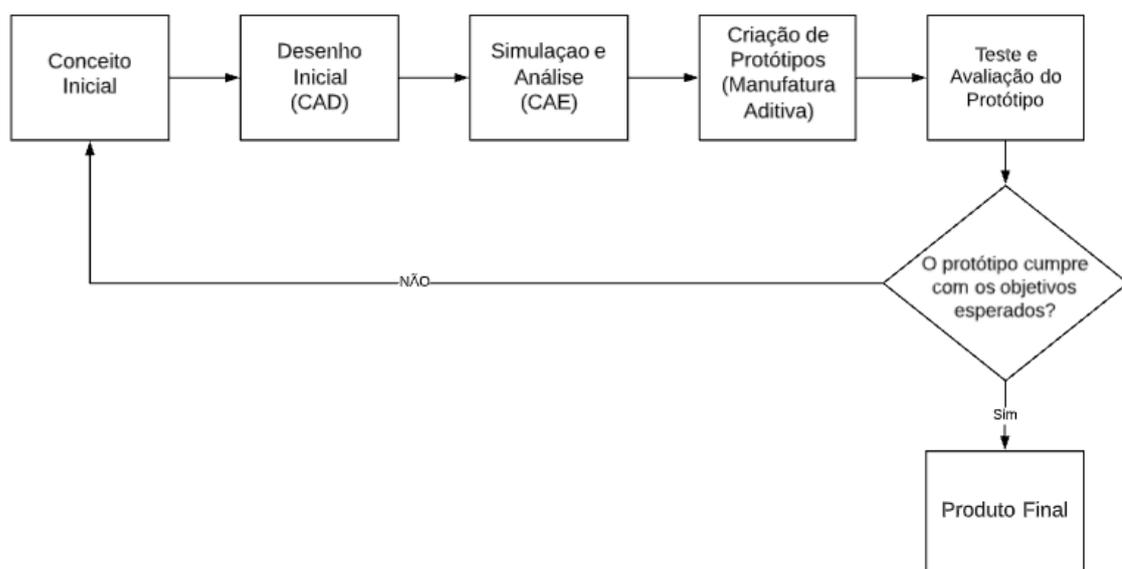


Figura 2 - Ciclo de desenvolvimento de protótipo através da prototipagem rápida.

Fonte: Adaptado de Wong e Hernandez (2012)

A Figura 2 apresentada por Wong e Hernandez (2012) demonstra através de um fluxograma, as etapas para implementação do processo de prototipagem rápida. De acordo com Laliberte, Gosselin e Cote (2001), o processo demonstra alta eficiência em projetos de pesquisa, pois permite construir protótipos de forma rápida e por um baixo custo.

Segundo Bathe (2007), as tecnologias CAE (Engenharia Assistida por Computador, do inglês *Computer Aided Engineering*) e CAD, amplamente utilizadas em projetos de engenharia, buscam permitir a criação de estruturas de diversos tipos de complexidade. Além disto também é possível, através do FEM (Método dos Elementos Finitos, do inglês *Finite Element Method*), simular situações físicas com alta acurácia (HUGHES; COTTRELL, 2005).

Ao aplicar o processo de prototipagem rápida, é necessário escolher um tipo de processo para impressão 3D do componente. De acordo com Ramakrishna (2020), O FDM é um dos processos de prototipagem rápida mais utilizado ao redor do mundo, principalmente por pesquisadores. As estatísticas demonstram que o processo FDM tem representado 41,5% das vendas, sendo um total de 15.000 máquinas vendidas no ano de 2010 (BERTO, 2020).

O processo FDM visa a construção do componente a partir da deposição de camadas de filamento fundido sob uma plataforma. Popescu *et al.* (2018) demonstram que este processo possui diversos parâmetros de impressão como a orientação de construção, a orientação angular de deposição, a espessura da camada, o padrão de preenchimento, a densidade de preenchimento, o perímetro externo, o preenchimento de ar, os vazios, a velocidade de extrusão e a temperatura de extrusão (SOLOMON; SEVVEL; GUNASEKARAN, 2021).

Mazurchevici *et al.* (2021) enfatizam que além dos parâmetros de impressão, também existem vários materiais que podem ser utilizados como matéria prima para o protótipo. Entre os materiais é possível citar polímeros como o PLA, ABS, PETG, Nylon, TPU, PC e compósitos, que podem ser misturas de polímeros com fibras de carbono, fibras de vidro, bronze, alumínio, entre outros (WICKRAMASINGHE; DO; TRAN, 2020).

De acordo com Ashby (2013), o protótipo fabricado via manufatura aditiva pode ser utilizado para diversos fins dentro de um projeto mecânico. Este produto pode ser um padrão, que será utilizado para fabricação de moldes para processamento convencional, ou pode ser um protótipo de validação de uma geometria intrincada, para garantir que as peças possam ser montadas. Outro fim muito comum para peças impressas por FDM, são componentes permanentes que não necessitam de altas resistências mecânicas.

Monzón *et al.* (2015) citam que as normas utilizadas para processos de fabricação como usinagem, soldagem, fundição, entre outros, nem sempre podem ser aplicadas à manufatura aditiva, cuja qual ainda não possui uma norma regulamentadora. Seria interessante que houvesse um padrão que regesse o processo FDM, pois de acordo com Lee, Abdullah e Khan (2005), os parâmetros de impressão para o método FDM influenciam diretamente no tempo de impressão, resistência mecânica, dureza e integridade superficial do componente impresso.

Em função das diversas variáveis de impressão existentes que não são regulamentadas por nenhuma norma, a confecção de amostras para teste utiliza os parâmetros selecionados pelo indivíduo que coordena a pesquisa. Portanto comparar as propriedades mecânicas de bibliografias existentes, se torna uma tarefa complexa visto que cada pesquisa utiliza parâmetros de impressão diferentes.

Mesmo que o protótipo possa não sofrer altos esforços mecânicos, conseguir utilizar parâmetros que forneçam a maior resistência mecânica possível para determinado tipo de material, ou fornecer a maior resistência mecânica possível para uma peça de determinado peso, se torna uma tarefa interessante. Para que isso seja realizado é necessário entender a influência de todos os parâmetros sobre o comportamento mecânicos do material.

A tecnologia de manufatura aditiva FDM pode ser considerada como uma tecnologia relativamente recente e, de acordo com Dey e Yodo (2019), alguns parâmetros possuem mais estudos publicados que outros e, por isso, outros parâmetros ainda não foram abordados ou foram abordados de forma rasa. Bibliografias que estudam as propriedades de elementos impressos utilizando os padrões de preenchimento existentes no fatiador Simplify 3D, para materiais como ABS, PETG, PLA, Nylon e ABS Carbon, ainda são escassas.

A partir dos argumentos previamente apresentados, este trabalho propõe analisar a resistência mecânica de elementos de mesmo material impressos sob diferentes condições. Sendo assim a pergunta problema que rege este estudo é:

Qual a influência do padrão e densidade de preenchimento na resistência mecânica de amostras fabricadas através do processo de deposição de material fundido (FDM)?

1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com Petersen (2017), a impressão 3D via FDM tem se tornado cada vez mais acessível para pessoas em todo mundo, principalmente com a iniciativa de desenvolvimento de

impressoras que conseguem se "replicar". Essas impressoras, denominadas como RepRap, tornam possível a impressão de mais da metade de seus componentes utilizando outra impressora 3D, fazendo com que a manufatura de máquinas novas seja um processo barato assim como a manutenção (BOWYER, 2014).

Com a popularização do processo, cada vez mais, a comunidade de pessoas que utilizam da tecnologia FDM cresce ao redor do mundo. Portanto, a investigação das influências das variáveis existente no processo de impressão FDM é extremamente importante, visto que esta poderá auxiliar diversas pessoas a entender melhor como é possível otimizar o processo e melhorar as propriedades de materiais impressos.

Além de ajudar pessoas ordinárias, este trabalho busca também auxiliar pesquisadores que utilizam do processo FDM para criação de protótipos. De acordo com Gurralla e Regalla (2014), o processo de Modelagem por deposição de material fundido demonstra alto potencial para fins de prototipagem e para peças finais. Ele enfatiza que é crucial estudar o comportamento da resistência mecânica de materiais impressos, pois essa resistência vai depender diretamente dos parâmetros utilizados para impressão do componente.

O Instituto Tecnológico Vale (ITV), é uma instituição sem fins lucrativos que possui como objetivo o desenvolvimento de soluções tecnológicas e científicas para os desafios da cadeia de mineração e sustentabilidade onde a Vale está presente (VALE, 2021a). A linha de pesquisa do setor de robótica aplicada a mineração do ITV engloba pesquisas relacionadas a veículos móveis que atuarão em minas autônomas, além do desenvolvimento de mecanismos e sistemas robóticos com fins de inspeção, monitoramento e auxílio de processos e manutenção de equipamentos de mineração (VALE, 2021b).

Dentre as pesquisas do Instituto, podem ser citados dispositivos como o Espeleorobô apresentado por Azpurua *et al.* (2020), o robô de inspeção de trilhos apresentado por Alves *et al.* (2020), o robô de inspeção de tubulações de diâmetro reduzido apresentado por Teotônio *et al.* (2020) e o dispositivo de lançamento de tags RFID (Sensores de Rádio Frequência, do inglês *Radio Frequency Identification*) apresentado por Filho *et al.* (2020). Todos estes dispositivos utilizam estruturas fabricadas por meio da manufatura aditiva, em especial, o método de FDM. Filho *et al.* (2020) apresentam o dispositivo da Figura 3 como um dispositivo totalmente impresso em 3D.

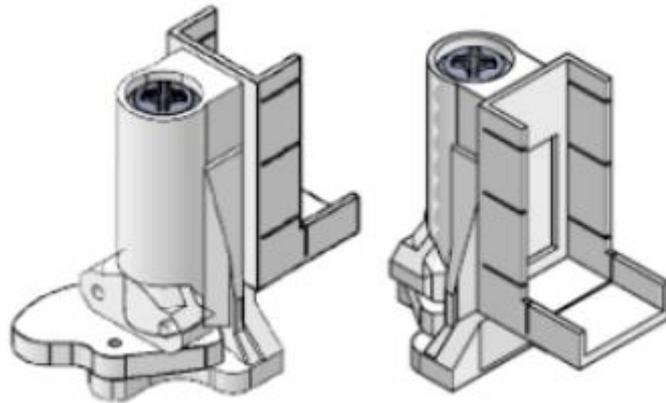


Figura 3 - Dispositivo de Lançamento de tags RFID.
Fonte: Adaptado de Filho *et al.* (2020)

Neste modelo (Figura 3) é possível observar diversas estruturas diferentes para diferentes propósitos, demonstrando assim, que a forma com que o elemento é impresso irá também depender da sua finalidade.

Portanto entender todos os parâmetros de impressão e a influência destes na resistência mecânica do material é de extrema importância. Dessa forma, será possível criar componentes com a maior resistência mecânica possível de acordo com as especificações desejadas de um produto qualquer.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Analisar a resistência mecânica de amostras de materiais poliméricos fabricados em PETG, através do processo FDM com densidades e padrões de preenchimento variados.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os processos de impressão 3D; os parâmetros que influenciam na resistência mecânica de peças impressas; a diferença da resistência mecânica entre materiais; os métodos e normas para realização de ensaios de compressão;
- Selecionar os parâmetros e materiais de impressão para confecção de amostras de ensaio mecânico;
- Confeccionar as amostras de ensaio através do processo FDM;

- Ensaiar os materiais para determinar a resistência mecânica à compressão das amostras impressas;
- Determinar a influência de parâmetros e materiais na resistência mecânica das amostras impressas;
- Comparar a resistência mecânica das amostras para diferentes densidades e padrões de preenchimento.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é separado em cinco capítulos e foi escrito conforma as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

O presente capítulo busca introduzir o assunto, justificar os motivos para realização do trabalho e apresentar os objetivos gerais e os objetivos específicos.

O segundo capítulo busca, através da bibliografia, explicar os fenômenos utilizados para realização do trabalho, principalmente as ferramentas necessárias para a impressão 3D, o funcionamento do processo de impressão 3D, os processos existentes de impressão 3D, a influência dos parâmetros de impressão na resistência mecânica do componente e como determinar as propriedades mecânicas dos materiais e estruturas impressas 3D.

O terceiro capítulo expõe a metodologia utilizada para obtenção de dados referentes as propriedades mecânicas de materiais e estruturais de elementos impressos e como esta metodologia foi aplicada.

O quarto capítulo é responsável por sintetizar os dados obtidos a fim de tornar possível analisar a influência de cada parâmetro na resistência mecânica do elemento impresso.

O quinto capítulo conclui o assunto através de análises obtidas durante o processo de pesquisa para responder a problemática proposta por este trabalho e apresentar os possíveis trabalhos futuros referentes ao tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para compreensão da problemática apresentada no capítulo anterior e alcançar os objetivos propostos se faz necessária a busca por referências bibliográficas que caracterizam os processos, métodos e conceitos essenciais para o desenvolvimento do trabalho. Por isso, foram abordados de forma geral os materiais necessários para entendimento contextual e específico os materiais utilizados para o desenvolvimento da metodologia, seus resultados e sua conclusão.

2.1 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS NECESSÁRIAS

Segundo Sarcar *et al.* (2008), a tecnologia CAD traz diversas melhorias para o setor de projetos. Esta tecnologia é capaz de aumentar a produtividade do projetista por facilitar a visualização do produto e sua montagem, além de aumentar a qualidade do projeto permitindo realizar análises complexas por meio de ferramentas de simulação. Portanto esta técnica computacional se torna essencial para a aplicação da prototipagem rápida.

Baumann *et al.* (2016) enfatizam que um dos problemas recorrentes da impressão 3D estava relacionado a transformação do modelo CAD em um código que pudesse ser entendido pela impressora. Este processo é denominado de fatiamento, por criar diversas fatias da estrutura ao longo do eixo Z, que quando sobrepostas geram o componente original.

2.1.1 Tecnologia CAE

De acordo com Shih e Schilling (2020), as diversas mudanças na tecnologia CAE tem trazido excelentes avanços para a comunidade de engenharia. O autor enfatiza que esta tecnologia se tornou o foco para o desenvolvimento de técnicas de otimização de projeto. A Figura 4 demonstra as vertentes que compõe a tecnologia CAE.

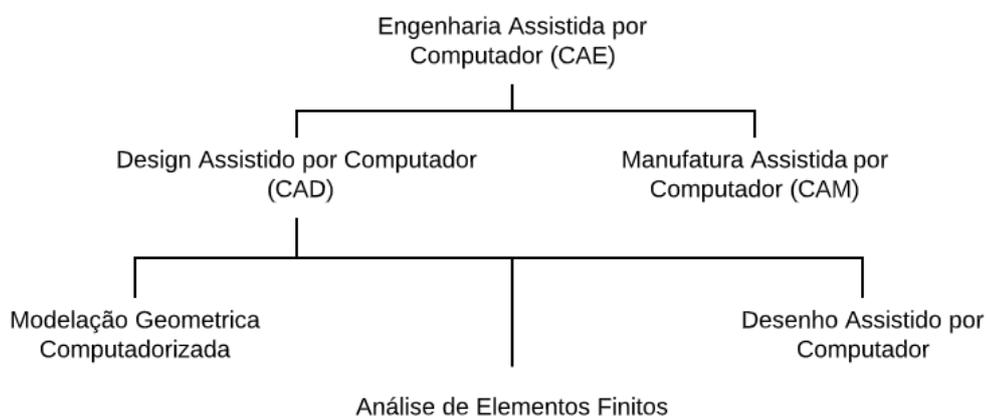


Figura 4 - Tecnologia CAE e suas subdivisões.
Fonte: Adaptado de Shih e Schilling (2020)

Na Figura 4 é possível observar que a tecnologia CAE se divide em CAM (Manufatura assistida por computador, do inglês – *Computer Aided Manufacturing*) e CAD. Em seguida é observado que a tecnologia CAD é separada em Modelação Geométrica Computadorizada, Análise de Elementos Finitos e Desenho Assistido por computador.

Amaral e Filho (2010) afirmam que dentre os *softwares* existentes no mercado que utilizam tecnologia CAD, os mais utilizados são: AutoCAD, SOLIDWORKS, CATIA, Pro/ENGINEER e Mechanical Desktop. Systemes (2011) cita o SOLIDWORKS como uma das ferramentas que lideram o mercado CAD por ser capaz de aumentar a produtividade e oferecer tecnologias para criação de modelos em larga escala, prever custos e analisar a mobilidade de conjuntos. É importante entender que o programa não se limita apenas a montagens mas possui também diversos recursos para simulação e análise numérica através de elementos finitos.

2.1.2 Modelação Geométrica e Desenho

Agoston (2005) apresenta o conteúdo de modelação geométrica como um processo extenso que inclui operações complexas e abrangem tópicos como: operações de Euler, projeções paralelas, representação de contorno, modelação volumétrica, modelação algorítmica, entre outros. Este processo busca criar representações tridimensionais de uma estrutura através da interação entre diversas formas geométricas.

De acordo com Botsch *et al.* (2007), malhas do tipo triangular (Figura 5) se tornaram uma excelente alternativa para utilização em delimitação de superfícies, pois, por possuírem um conceito simples, elas apresentam uma maior flexibilidade e maior eficiência em processamento. Outro aspecto observado a respeito das malhas triangulares, é que estas são capazes de evitar erros ao converter a superfície da plataforma CAD para arquivos com informações para dado de entrada.

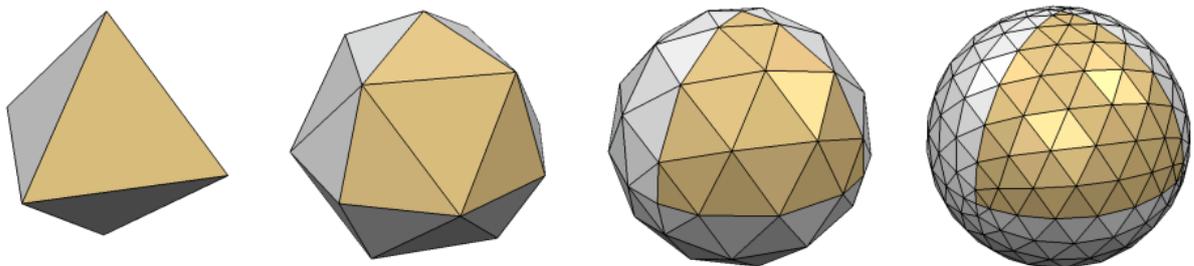


Figura 5 - Refinamento de Malha Triangular.
Fonte: Adaptado de Bosh *et al.* (2007)

Botsch *et al.* (2007) abordam também que o refinamento da malha triangular se dá por etapas de subdivisão, que se tratam da divisão de todas arestas dos triângulos pela metade, quadruplicando assim o número de faces, como exemplificado na Figura 5.

Para otimizar a construção de elementos em *softwares* do tipo CAD, foram criadas metodologias de desenvolvimento de elementos, dentre estas metodologias, Shih e Schilling (2020) citam a modelagem paramétrica como uma das principais existentes atualmente, cuja qual, se dá através dos seguintes passos:

1. Criar o desenho bidimensional que contenha o formato da base que dará forma ao design;
2. Aplicar/modificar relações geométricas ou dimensões no desenho bidimensional;
3. Realizar a extrusão, revolução ou varredura a fim de criar uma base sólida para o design;
4. Adicionar recursos paramétricos a fim de complementar a estrutura do projeto;
5. Realizar análises do modelo computadorizado e refinar o design de acordo com as necessidades;
6. Criar o desenho técnico através das vistas de desenho para fins de documentação.

Após a construção do modelo, é possível converter o arquivo para STL (Linguagem de Padrão Triangular, do inglês *Standard Triangle Language*). Segundo Eragubi (2013), o arquivo STL é gerado utilizando uma malha de triângulos para representar o modelo CAD, onde estes triângulos são descritos por um conjunto de coordenadas X, Y e Z. O conjunto de três vértices forma um plano que irá conter um vetor normal a fim de indicar sob qual lado do polígono está contido sua massa. As etapas de obtenção do modelo STL podem ser observadas na Figura 6.

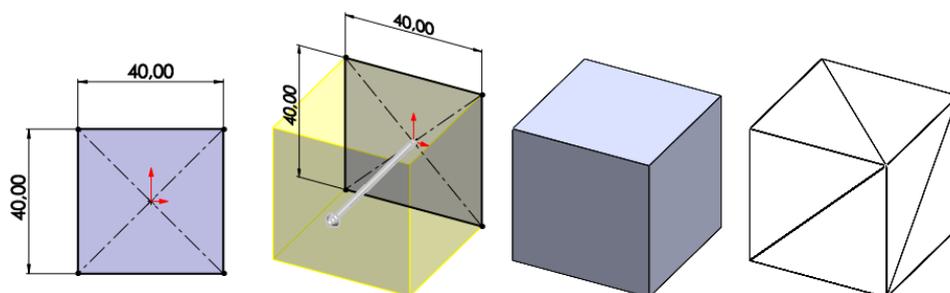


Figura 6 - Construção do modelo STL.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

A Figura 6 demonstra a construção do modelo CAD através das etapas da metodologia proposta por Shih e Schilling (2020). Após a confecção do modelo CAD, o Solidworks

disponibiliza a ferramenta de conversão de formato do arquivo para STL, que resulta no cubo com estruturas triangulares.

2.1.3 Fatiadores

De acordo com Baumann *et al.* (2016), o processo de impressão 3D ocorre em três etapas:

1. Exportação do modelo tridimensional a ser impresso para STL;
2. Cálculo da trajetória de impressão baseado no modelo tridimensional e exportação para G-Code;
3. Impressão baseada no arquivo fornecido anteriormente.

Amin *et al.* (2020) descrevem o G-Code como uma linguagem utilizada para intermediar a comunicação entre computador e impressora. Este arquivo contém informações específicas relativas a:

- Configuração da impressora (Diâmetro, posição do bico, altura de impressão, entre outros);
- Configuração de impressão (Altura de camada, dimensões verticais dimensões horizontais, entre outros);
- Configuração de Filamento (tipo, diâmetro, densidade, entre outros).

A formação do G-Code realizada através de *softwares* fatiadores é de extrema importância, pois esta irá determinar a qualidade do produto impresso e seu tempo de impressão.

Os estudos de Šljivic *et al.* (2019) utilizaram três *softwares* fatiadores: Slic3r e Cura (*open source* gratuitos) e Simplify3D (Não gratuito). O autor enfatiza que a comparação de precisão das partes impressas demonstrou diferenças significantes na qualidade final do produto quando comparado os três *softwares*. Para análise de precisão o *software* Slic3r alcançou precisões de 0,1 a 0,61 mm mas não alcançou uma qualidade satisfatória de impressão. O *software* Cura (versão 15.04) alcançou uma precisão de 0,05 a 0,36 mm com uma boa qualidade superficial e alto detalhamento. Já o Simplify 3D foi capaz de alcançar uma precisão de 0,02 a 0,28 mm e uma qualidade quase semelhante a qualidade do modelo original. Ao final o autor sugeriu que o Simplify3D fosse priorizado para utilização.

2.2 PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D

O processo de impressão 3D, uma vertente da manufatura aditiva, pode ser observado pela Figura 7.



Figura 7 - Processo de Impressão 3D.
Fonte: Adaptado de Toro *et al.* (2019)

A Figura 7 demonstra as etapas necessárias para a impressão de um objeto 3D, onde é possível observar que o processo se inicia no modelo produzido em CAD e tem como produto final um objeto tridimensional impresso através do processo FDM.

De acordo com Bikas *et al.* (2016), nos últimos anos surgiu uma demanda expressiva do processo de manufatura aditiva para a produção de componentes das áreas aeroespacial e automobilística em função da capacidade do processo reduzir drasticamente o peso final do produto. A Figura 8 mostra as áreas em que a manufatura aditiva tem atuado nos últimos anos.

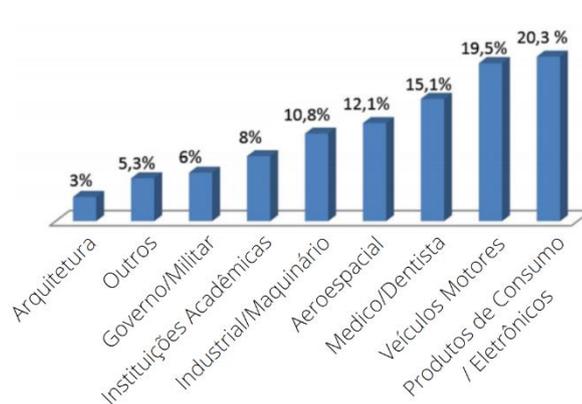


Figura 8 - Setores industriais que utilizam Manufatura Aditiva.
Fonte: Adaptado de Wohlers *apud* Bikas *et al.* (2016)

Como pode ser observado na Figura 8, diversos setores têm utilizado o processo de manufatura aditiva e, de acordo com Campbell *et al.* (2011), a capacidade de impacto global da manufatura aditiva no setor de manufatura é semelhante ao impacto que computadores e internet tiveram sob a informação mundial.

Atualmente existem diversos processos de impressão 3D. Estes são diferenciados principalmente pela forma com que cada camada é depositada e pelo material utilizado no processo. Dentro dos processos é possível citar tecnologias a laser, de flashes, de extrusão, de jateamento, entre outras.

2.2.1 Tecnologias a Laser

Segundo Bikas *et al.* (2016), este tipo de manufatura aditiva é caracterizado pela utilização de um laser de média ou baixa intensidade com o propósito de derreter, solidificar ou realizar a cura do material. Este processo pode ser subdividido em duas categorias que dependem do mecanismo de mudança de fase da resina, sendo eles fundição a laser e polimerização a laser que podem ser observadas na Figura 9.

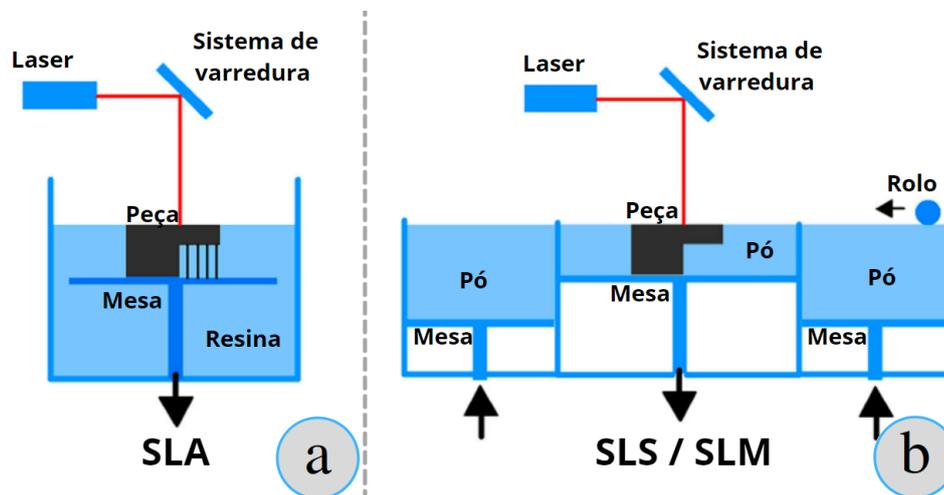


Figura 9 - Processo de impressão 3D utilizando as tecnologias a laser.
Fonte: Adaptado de Gardan (2016)

Shah *et al.* (2016) descrevem a SLA (Estereolitografia) demonstrada pela Figura 9.a, como um processo que ocorre a partir da alteração fotoquímica direta do polímero líquido por meio de um laser ultravioleta. Este laser solidifica o material fotopolimérico sob uma superfície que transita no sentido vertical, de forma com que a construção de diversas camadas forme uma estrutura tridimensional.

Vaezi *et al.* (2013) descrevem a SLS (Sinterização Seletiva a Laser) como um processo de manufatura aditiva que utiliza de um laser de alta temperatura para sinterizar camadas de pó finas de maneira seletiva (Figura 9.b). De acordo com o autor, após cada camada produzida um rolo espalha o pó acima das camadas anteriores construídas sob a mesa, e o processo se repete até que a peça seja completamente produzida.

2.2.2 Tecnologia de Flashes

De acordo com Gardan (2016), a tecnologia de utilização de flashes (Figura 10), derivada da SLA, foi desenvolvida pela necessidade de aumentar a velocidade de impressão dos componentes. A DLP - Processamento de Luz Digital tem como princípio a cura da resina através de um flash de luz ultravioleta criado por um projetor que abrange a camada inteira de resina ao mesmo tempo.

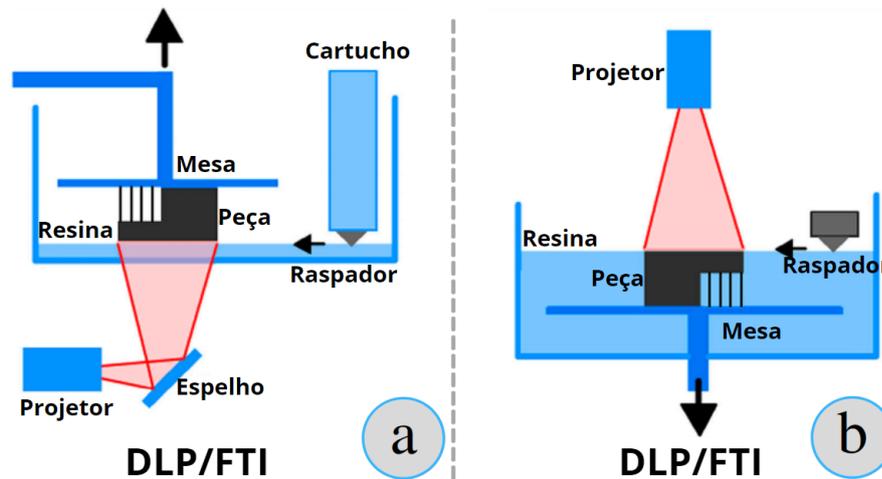


Figura 10 - Processo de impressão 3D utilizando a tecnologia de flashes.
 Fonte: Adaptado de Gardan (2016)

A Figura 10 demonstra as duas vertentes existentes do processo, em a) a mesa se movimenta para cima a medida que as camadas são curadas pelos flashes. Em b) o procedimento é semelhante, mas a mesa fica completamente submersa em resina e se move para baixo.

2.2.3 Tecnologias de Extrusão

As tecnologias de extrusão têm como princípio a deposição de um material purgado através de um bico sob uma plataforma. Este processo possui algumas variáveis que podem ser observadas na Figura 11.

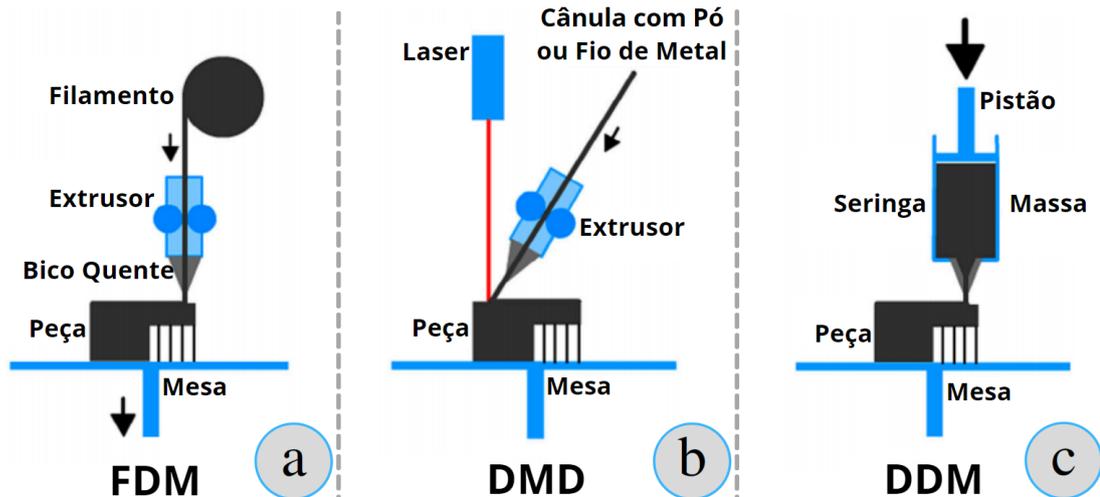


Figura 11 - Processo de impressão 3D utilizando a tecnologia de extrusão.
Fonte: Adaptado de Gardan (2016)

Li *et al.* (2012) citam a FDM (Deposição de Material Fundido, do inglês *Fused Deposition Modeling*), observada na Figura 11.a, como um processo capaz de fabricar componentes através da extrusão de filamentos semi-fundidos por um bico aquecido seguindo um padrão de camadas previamente descrito acima de uma plataforma.

Dutta *et al.* (2011) descrevem o DMD (Deposição de Metal Direta, do inglês *Direct Metal Deposition*), demonstrado pela Figura 11.b, como um processo avançado da manufatura aditiva, que é capaz de produzir componentes densos e funcionais a partir da deposição do pó de metal, pixel por pixel, utilizando um laser para fundir o material. Esta tecnologia não só permite a criação de estruturas, mas também permite revestir e reconstruir componentes de geometrias complexas.

O processo DDM (Modelagem por Deposição de Massa, do inglês *Dough Deposition Modeling*) é um dos principais processos para impressão 3D de alimentos como pastas, comidas a base de cereais, etc (DEROSSO *et al.* 2020). Segundo Dutta *et al.* (2011), o processo evidenciado pela Figura 11.c se dá pela extrusão de uma massa através de uma seringa acoplada a um pistão controlado por um motor de passo que controla a quantidade de massa a ser extrusada.

2.2.4 Tecnologias de Jateamento

As tecnologias de jateamento MJM (Modelagem por Jateamento Múltiplo, do inglês *MultiJet Modeling*) e 3DP (Impressão de três dimensões, do inglês *Three Dimensional Printing*), também conhecida como CJP (Impressão por Jateamento Colorido, do inglês *ColorJet Printing*) podem ser observadas na Figura 12.

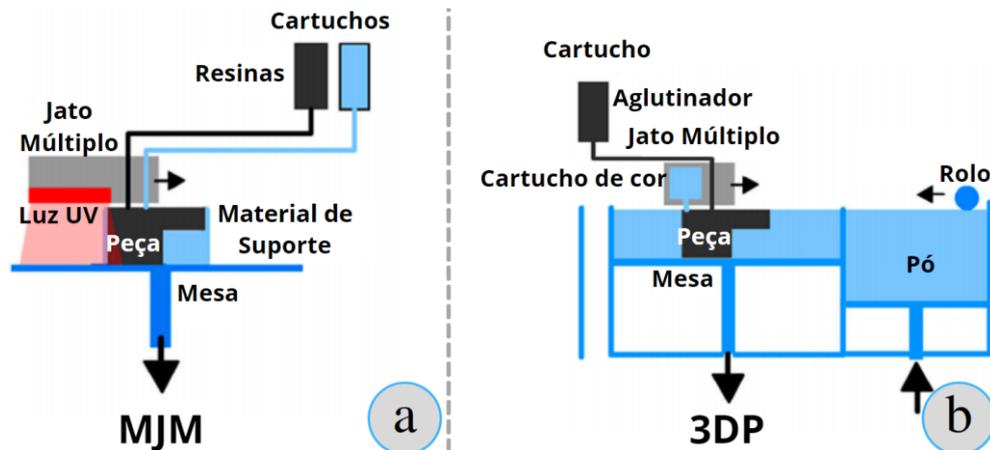


Figura 12 - Processo de impressão 3D utilizando a tecnologia de jateamento.
Fonte: Adaptado de Gardan (2016)

Kitsakis *et al.* (2015) descrevem o processo de MJM (Figura 12.a) como uma tecnologia que deposita seletivamente um material sob uma plataforma. O material em formato de gotas geralmente composto por fotopolímeros é posicionado em conjunto com um segundo material, geralmente um tipo de cera, que tem a finalidade de suportar a estrutura durante o processo de construção. Posteriormente, uma luz ultravioleta solidifica o material fotopolimérico até que este esteja totalmente curado. Ao fim um planificador realiza o acabamento superficial do componente.

De acordo com Giganto *et al.* (2019), a técnica de impressão 3DP (Figura 12.b) ocorre pela disposição do pó em pequenas camadas sob uma plataforma com o auxílio de um rolo. Posteriormente esta camada é jateada com um aglutinador colorido que a solidifica. Após este processo a mesa de impressão se movimenta para baixo e o procedimento anterior é novamente realizado até que se forme a estrutura final.

2.2.5 Outras tecnologias

Existem outras tecnologias de impressão 3D, mas em função da semelhança com os processos já apresentados, não há necessidade de especificar estes outros processos.

2.3 PROCESSO FDM E SUAS VARIÁVEIS

De acordo com Dey e Yodo (2019), alguns parâmetros como padrão de preenchimento, velocidade de impressão e espessura de casca, são os parâmetros com menor quantidade de pesquisas; enquanto espessura de camada, orientação de construção e orientação angular de deposição são os mais analisados em pesquisas científicas. Este trabalho busca analisar todos

estes parâmetros a fim de entender qual a influência de cada um deles sob a resistência mecânica de elementos impressos.

2.3.1 Orientação de Construção

Bala *et al.* (2016) citam que a orientação de construção é considerada por diversos pesquisadores um parâmetro que influencia diretamente na resistência mecânica, tempo de impressão, acabamento superficial, acurácia e quantidade de suporte utilizado.

Dey e Yodo (2019) descrevem a orientação de construção como uma forma de orientar o componente a ser impresso na plataforma de impressão de acordo com o eixo X, Y e Z como pode ser observado na Figura 13.

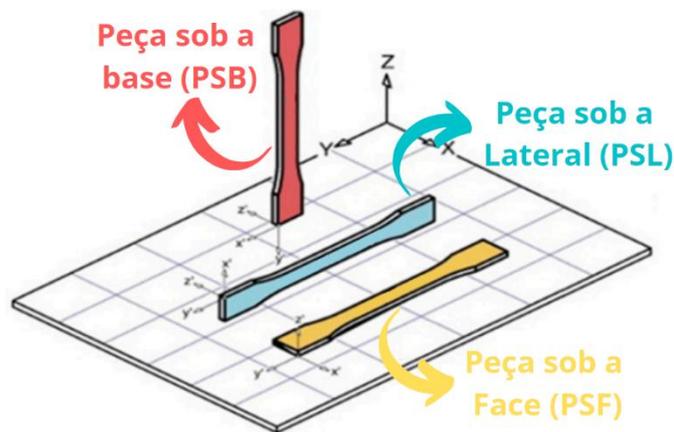


Figura 13 - Orientação de construção.
Fonte: Adaptado de Chacón *et al.* (2017)

Na Figura 13, o componente vermelho foi denominado de “Peça sob a base” (PSB), o azul “Peça sob a lateral” (PSL) e o amarelo “Peça sob a face” (PSF). Os estudos de Chacón *et al.* (2017) variam a orientação de construção, espessura de camada e velocidade de impressão utilizando como material o PLA (Poliácido Láctico) para, posteriormente realizarem ensaios de tração e flexão.

De acordo com Mazurchevici *et al.* (2021), as amostras PSB demonstraram baixa rigidez e baixa resistência mecânica. Em contrapartida as amostras PSL e PSF apresentaram uma melhor resistência mecânica, sendo que a PSL apresentou uma melhor ductilidade e tenacidade. Chacón *et al.* (2017) concluíram que a amostra PSL possui melhores propriedades mecânicas em termos de ductilidade, resistência e rigidez para esforços de tração.

Beattie *et al.* (2021) realizaram estudos semelhantes e enfatizam em seu trabalho que existe uma forte correlação entre a orientação de construção e as propriedades mecânicas de

materiais produzidos por FDM. Em seus estudos, elementos impressos utilizando a orientação de construção PSL apresentaram os melhores valores de resistência mecânica a tração. Liu *et al.* (2019) obtiveram os mesmos resultados.

Mazurchevici *et al.* (2021) citam que a amostra PSB não foi capaz de suportar grandes esforços fletores, ao contrário das amostras PSL e PSF que apresentaram uma melhor capacidade de se deformar elasticamente e plasticamente até sua fratura. Chacón *et al.* (2017) enfatizam que a amostra PSL revelou possuir melhores propriedades mecânicas em termos de ductilidade, resistência e rigidez para esforços de flexão.

Os estudos de Motaparti *et al.* (2016) analisaram apenas a construção sob orientação vertical e horizontal. Em seus estudos a construção horizontal exibiu de 15 a 40\% melhores propriedades de resistência a compressão.

2.3.2 Orientação Angular de Deposição

Dey e Yodo (2019) descrevem a orientação angular de deposição como a direção angular em que é depositado o material extrudado em relação ao eixo X da plataforma de impressão. Estes ângulos podem ser observados pela Figura 14.

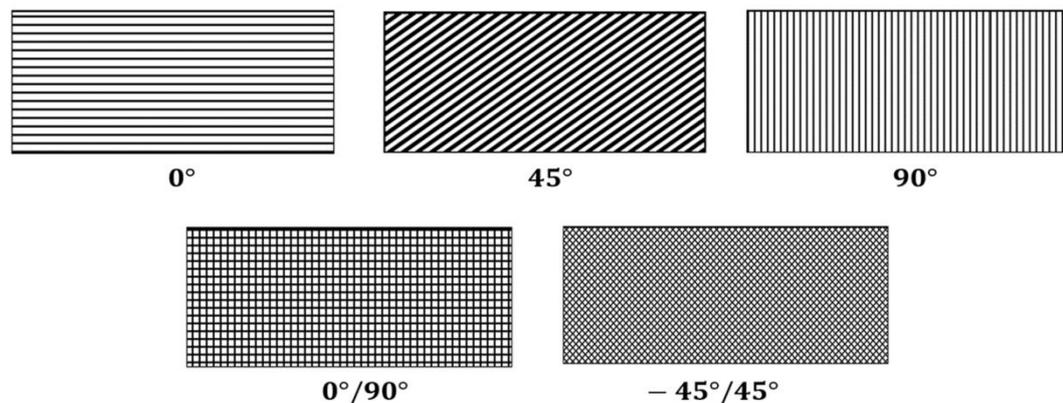


Figura 14 - Tipos de orientações angulares de deposição.
Fonte: Adaptado de Dey e Yodo (2019)

A orientação angular de deposição demonstrada pela Figura 14, pode se dar por ângulos positivos e negativos, em que os ângulos negativos são relacionados à componente positiva de forma espelhada. A sobreposição de camadas com diferentes ângulos é utilizada para a construção dos padrões de impressão.

Rajpurohit e Dave (2018a) demonstraram através de seus estudos, que a orientação angular de deposição influencia nas propriedades mecânicas do material como pode ser observado na Figura 15.

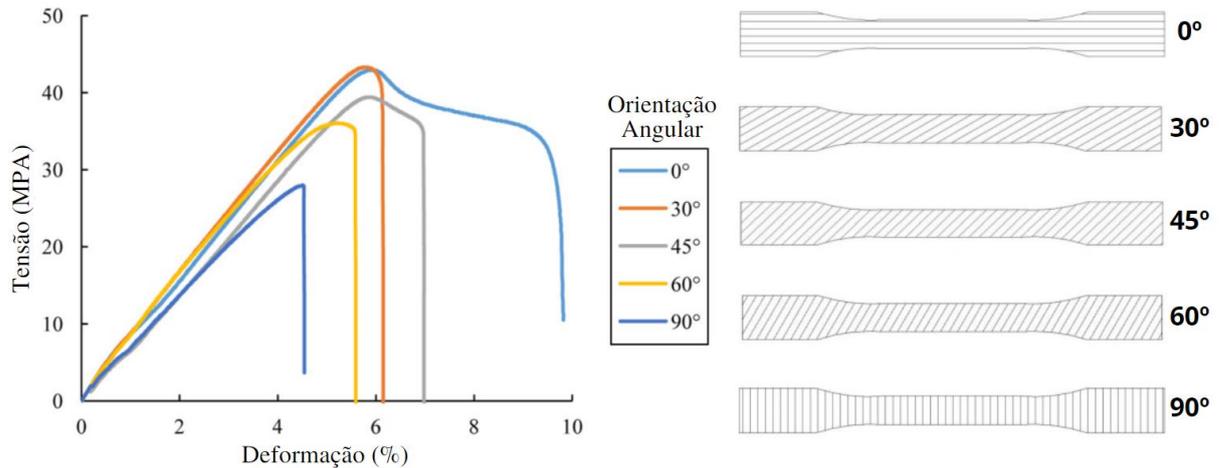


Figura 15 - Influência da orientação angular de deposição no ensaio de tração.
Fonte: Adaptado de Rajpurohit e Dave (2018a)

O autor comprova através do gráfico apresentado na Figura 15 que orientações angulares menores estão associadas com o aumento da resistência do material a tração.

Wu *et al.* (2015) também abordaram a influência da orientação angular de deposição, porém, utilizaram uma mescla entre as orientações alternando sobreposição das camadas. A interação 0°/90° demonstrou uma resistência à tração e à flexão melhor que as interações 30°/-60° e 45°/-45°.

De acordo com Motaparti *et al.* (2017), Gebisa e Lemu (2018), Rajpurohit e Dave (2018b), a maior resistência a flexão pode ser alcançada pela utilização da orientação de deposição angular de 0°, ainda que outros valores com ângulos pouco maiores tenham se diferenciado por uma pequena margem.

Motaparti *et al.* (2017) demonstram em seus estudos que a compressão de componentes impressos com a configuração 0°/90° foram mais resistentes que a configuração 45°/-45° para elementos impressos na posição PSB. Para componentes impressos de acordo com a posição PSL e PSF não foram observadas diferenças significantes para os ângulos de deposição.

2.3.3 Espessura de Camada

De acordo com Solomon *et al.* (2021), a espessura da camada se refere a quantidade de material depositado em relação ao eixo vertical de uma única camada como pode ser observado pela Figura 16.

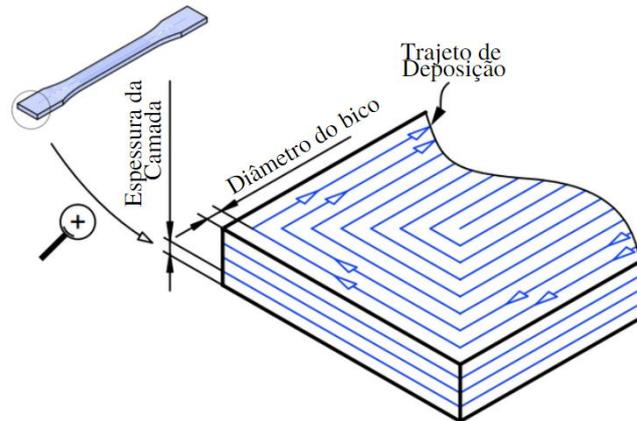


Figura 16 - Parâmetros de impressão observados de perto.
Fonte: Adaptado de Chacón *et al.* (2017)

O autor enfatiza que, como demonstrado na Figura 16, a espessura da camada vai ser sempre menor ou igual ao diâmetro do bico extrusor.

Segundo Rajpurohit e Dave (2018a), as camadas de espessura menor possuem uma superfície de contato de ligação maior que camadas de espessura maior, fazendo com que a força de adesão entre as camadas seja diferente. De acordo com Camargo *et al* (2019), a resistência a tração é significativamente influenciada pela espessura de camada, em seus estudos amostras fabricadas com 0,3 mm de espessura obtiveram os melhores resultados.

Toro *et al.* (2019) demonstram na Figura 17 os resultados do ensaio de tração obtidos a partir de seus estudos.

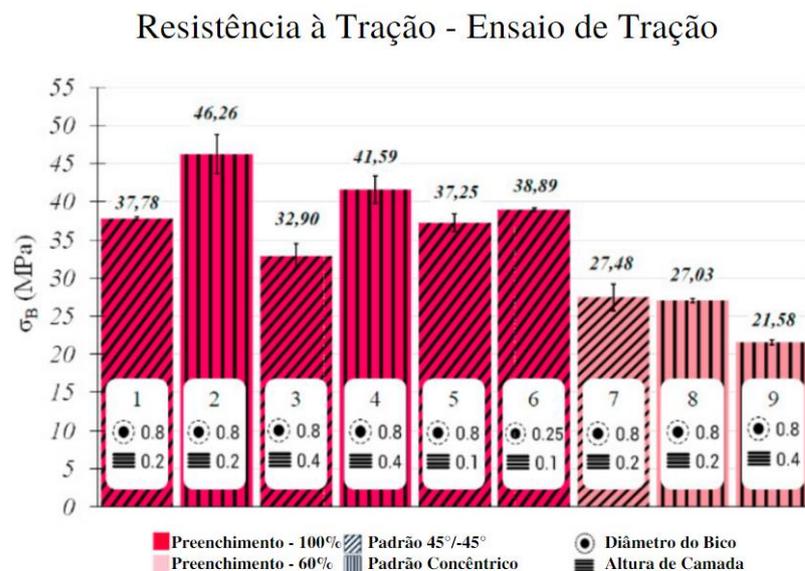


Figura 17 - Influência da porcentagem de preenchimento, espessura da camada, orientação angular e diâmetro do bico no ensaio de tração.
Fonte: Adaptado de Toro *et al.* (2019)

Como pode ser observado na Figura 17, para o mesmo diâmetro de bico e porcentagem de preenchimento as amostras com camadas de 0,2 mm de espessura obtiveram melhores resultados quando ensaiadas sob tração. Os mesmos autores demonstram na Figura 18 os resultados obtidos em seus estudos quando analisadas amostras ensaiadas sob flexão.

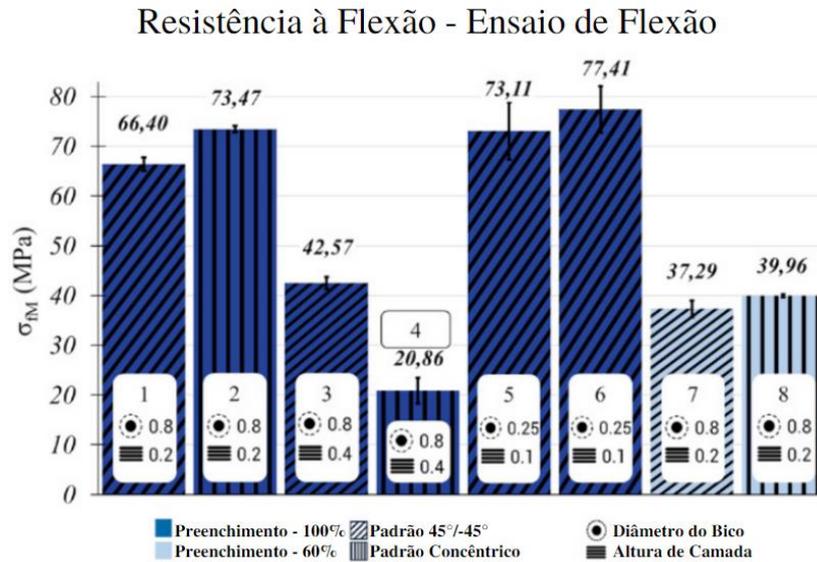


Figura 18 - Influência da porcentagem de preenchimento, espessura da camada, orientação angular e diâmetro do bico no ensaio de flexão.

Fonte: Adaptado de Toro *et al.* (2019)

Na Figura 18 é possível observar que as amostras que continham espessuras de camada de 0,2 e 0,1 mm demonstraram ter uma melhor resistência a flexão.

2.3.4 Padrão de Preenchimento

Dave *et al.* (2019) descrevem o padrão de preenchimento, como estruturas de diversos formatos geométricos que preenchem o interior dos componentes impressos. Estes padrões, observados na Figura 19, dependem diretamente do *software* fatiador utilizado. Como o Simplify3D é um aplicativo pago, estudos com os padrões de preenchimento proposto por ele são escassos quando comparados a outros tipos de preenchimento.

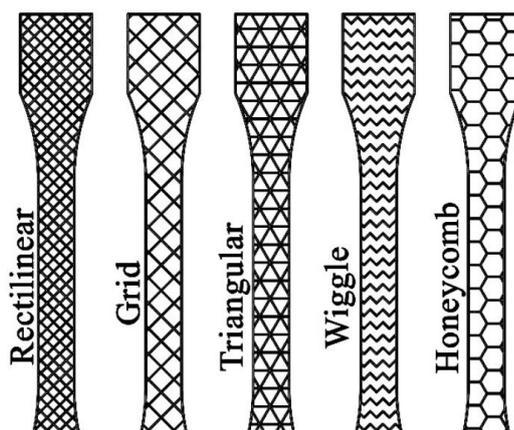


Figura 19 - Padrões de Preenchimento propostos pelo Simplify 3D.
Fonte: Adaptado de Hanon *et al.* (2019)

Os padrões de preenchimento apresentados na Figura 19, são os padrões propostos pelo fatiador Simplify3D.

Fernandez-Vicente *et al.* (2016), Pandzic *et al.* (2019), Akhouni e Behraves (2019) e Yadav *et al.* (2021) utilizaram outros programas fatiadores em seus estudos e foram apresentados para uma futura comparação.

Os estudos de Pandzic *et al.* (2019) se baseiam no estudo dos padrões: *Grid*, *Line*, *Triangular*, *Tri-Hexágono*, *Cúbico*, *Subdivisão Cúbica*, *Octeto*, *Quarto Cúbico*, *Concêntrico*, *Zig Zag*, *Cross*, *Cross 3D* e *Giroudo*. O autor demonstrou que o padrão *Concêntrico*, dentre os citados, é o que possui melhores propriedades de resistência a tração.

Akhouni e Behraves (2019) demonstraram que o padrão *Concêntrico* é o que possui melhores propriedades de resistência a tração quando comparado aos padrões *Rectilinear*, *Curva de Hilbert* e *Honeycomb*. De acordo com Fernandez-Vicente *et al.* (2016), dentre os padrões *HoneyComb*, *Line* e *Rectilinear*, o *HoneyComb* apresentou melhores propriedades de resistência a Tração. Akhouni e Behraves (2019) demonstraram também que o padrão *Concêntrico* é o que possui melhores propriedades de resistência a Flexão.

Yadav *et al.* (2021) analisaram a influência do padrão de preenchimento na resistência a compressão do material. Em seus estudos o padrão *Curva de Hilbert* apresentou os melhores resultados, seguido dos padrões *Rectilinear*, *Line*, *Honeycomb*, *Archmedeano* e *Espiral de Octagrama* respectivamente.

2.3.5 Densidade de Preenchimento

De acordo com Dave *et al.* (2019), a densidade de preenchimento se refere a densidade do volume de material que será impresso no interior do componente como pode ser observado pela Figura 20.

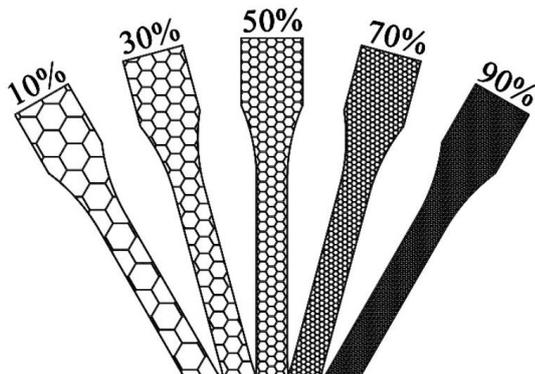


Figura 20 - Densidades de preenchimento.
Fonte: Adaptado de Hanon et al. (2019)

Na Figura 20 é possível observar a diferença na quantidade de material utilizado para cada densidade de preenchimento. O autor ainda enfatiza que quanto menor a quantidade de preenchimento menores são o tempo de construção, o peso do objeto e a resistência mecânica do material.

Camargo *et al.* (2019) enfatizam que a densidade de preenchimento influencia diretamente na resistência a tração. Pandzic *et al.* (2019) e Srinivasan *et al.* (2020) demonstram em seus estudos que essa resistência aumenta quando há um incremento na porcentagem da densidade de preenchimento.

Os estudos de Camargo *et al.* (2019) e Aloyaydi *et al.* (2019) demonstram que a densidade de preenchimento possui influência direta na resistência à tração do componente, ou seja, quanto maior a densidade de preenchimento, maior a resistência a tração.

De acordo com Abbas *et al.* (2017), o aumento resistência a compressão do material também está intimamente ligada com o aumento da densidade de preenchimento, portanto peças com uma densidade maior serão mais resistentes à compressão.

2.3.6 Perímetro Externo

O perímetro externo se trata de camadas depositadas nas porções mais externas do componente impresso. Este parâmetro pode ser observado pela Figura 21.

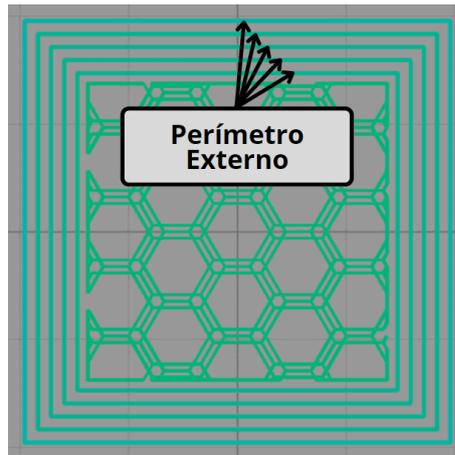


Figura 21 - Propriedade de perímetro externo.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

O perímetro externo demonstrado pela Figura 21, foi dimensionado para ter cinco camadas, como pode ser observado, estas camadas externas, são semelhantes a uma impressão totalmente preenchida seguindo um padrão concêntrico.

Fontas *et al.* (2020) concluíram em seus estudos que o perímetro externo tem certa influência sob a resistência a tração e, quanto maior a espessura do perímetro externo, maior a resistência das camadas externas do material. Gebisa e Lemu (2018) descrevem que o aumento da espessura de perímetro externo gera significativamente um aumento da resistência a flexão do material.

2.3.7 Preenchimento de ar e vazios

Segundo Wang *et al.* (2016), em função do bico extrusor possuir uma sessão circular, o processo de deposição pressiona o filamento extrusado e, caso a altura de camada seja inferior ao diâmetro do bico, o formato da secção se dá por uma elipse como pode ser observado na Figura 22.



Figura 22 - Preenchimento de ar.
Fonte: Adaptado de Akhoundi e Behravesht (2019)

Na Figura 22 pode-se observar o preenchimento de ar, que é mais evidente para o caso de espaçamentos positivos. Este preenchimento gera espaços entre as deposições da estrutura interna da amostra que causam uma fraca adesão entre os materiais depositados gerando uma diminuição de resistência a flexão (MISHRA *et al.*, 2017).

Gebisa e Lemu (2019) demonstram que a utilização do preenchimento de ar em níveis negativos aumenta a resistência a tração do material. Ele enfatiza que apesar de haver uma mudança na resistência, este parâmetro não é o mais influente em materiais sob esforço de tração. Na Figura 23 é possível observar os vazios, que são espaços triangulares na seção transversal do componente.

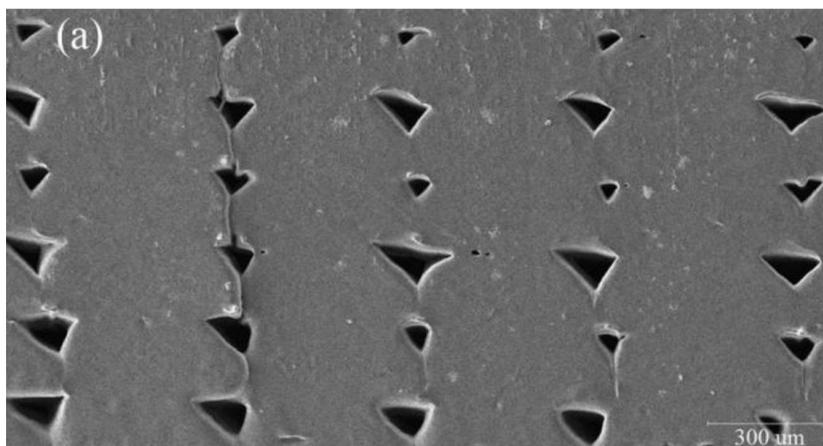


Figura 23 - Microscopia utilizada para análise de Vazios.
Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2016)

De acordo com Wang *et al.* (2016), os vazios demonstrados pela Figura 23 são espaços triangulares formados na superfície superior em cada camada. O formato triangular se dá pela forma com que o material é depositado na mesa. Quando depositada, a camada inferior do filamento é pressionada contra o plano e adota um formato achatado, porém a camada superior mantém o seu formato circular. Com a sobreposição de camadas é possível então observar este formato triangular na seção transversal do material. Os estudos do autor demonstram que a redução destes vazios promove um aumento significativo da resistência mecânica do material tanto sob esforços de tração quanto de compressão.

2.3.8 Velocidade de Extrusão

De acordo com Sanatgar *et al.* (2017) o aumento da velocidade faz com que as camadas possuam uma menor força de adesão. Yang e Yeh (2020) demonstram em seus estudos que a velocidade de impressão não influenciou significativamente a resistência a tração e flexão, em contrapartida, o aumento da velocidade de impressão reduziu a resistência a compressão do material.

2.3.9 Temperatura de Extrusão

Sanatgar *et al.* (2017) enfatizam que a temperatura de extrusão influencia diretamente na adesão entre as camadas de impressão. De acordo com Peng *et al.* (2020), isso ocorre, pois, temperaturas altas de extrusão geram maior fluidez e formabilidade de materiais impressos. Seus estudos também demonstram que o aumento da temperatura aumenta a resistência a tração e flexão do material.

2.4 MATERIAIS DE IMPRESSÃO 3D

De acordo com Dey e Yodo (2019) o PLA e o ABS são os dois materiais mais utilizados na manufatura aditiva quando utilizado o processo FDM. Ele ainda cita materiais como PETG, Nylon e alguns compósitos como materiais utilizados geralmente para fins de pesquisa assim como para construir partes funcionais de componentes. Portanto estes materiais serão os materiais base para este estudo.

Como citado anteriormente, os parâmetros de impressão influenciam diretamente na resistência mecânica do elemento, e uma vez que os estudos dificilmente seguem um padrão, é extremamente difícil comparar uma propriedade específica para diversos materiais. A fim de buscar uma generalização de algumas propriedades, vários catálogos de fabricantes foram analisados, dentre eles, Esun3D, 3DXTECH, Polymaker, F3DB, Gembird, Ultrafuse e MatWeb. Estes valores podem ser encontrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades de filamentos média para diversos fabricantes.

Material	Temperatura Média de Impressão (°C)	Temperatura Média da Mesa (°C)	Densidade Média (g/cm ³)	Resistência Média a Tração (MPa)	Resistência Média a Flexão (MPa)	Alongamento Médio na Ruptura (%)
ABS	220-260	80-110	1,04	40,22	67,11	29,78
PLA	190-230	25-70	1,24	48,45	94,30	17,18
PETG	230-250	25-80	1,27	43,80	66,26	135,60
Nylon	220-270	25-120	1,12	64,76	87,36	57,90

Fonte: Pesquisa direta (2021)

A Tabela 2 demonstra as propriedades dos filamentos de diversos fabricantes. Após a análise das propriedades fornecidas nos catálogos, foi realizada a média de cada propriedade encontrada, gerando assim a Tabela 2.

2.4.1 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)

De acordo com Hausman e Horne (2014), o ABS é um material utilizado em uma variedade de aplicações industriais para extrusão e injeção moldada. Um exemplo no qual o material se faz presente são as peças de LEGO. Milde *et al.* (2017) descrevem o ABS como um termopolímero fabricado a partir da polimerização do estireno e Acrilonitrila na presença de Polibutadieno em que sua composição final geralmente é de 15 a 35% de Acrilonitrila, 5 a 30% de Butadieno e 40 a 60% de Estireno.

Segundo Oliveira *et al.* (2016), o ABS tem ganhado importância no mercado, visto que este pode ser amplamente utilizado em processos de impressão 3D. Vidakis *et al.* (2020) enfatizam que o ABS é amplamente utilizado em função de seu comportamento plástico em taxas altas de deformação, apresentando uma fratura do tipo dúctil.

2.4.2 Polilactida (PLA)

De acordo com Pang *et al.* (2010) a Polilactida (PLA) é um poliéster alifático derivado do ácido láctico. Hausman e Horne (2014) citam o PLA como uma alternativa ecológica, em função de ser um material biodegradável criado a partir de açúcares de plantas como mandioca, milho e cana de açúcar. De acordo com Wang *et al.* (2017), o PLA possui boas propriedades mecânicas, porém, apresenta fragilidade e deformações de deflexão por calor a temperaturas pouco superiores à ambiente.

2.4.3 Polietileno Tereftalato Glicol (PETG)

Dupaix e Boyce (2005) descrevem o PETG como um polímero de característica amorfa não cristalina, utilizado vastamente para aplicações de componentes termo-formados. O PETG combina as vantagens do ABS e do PLA por ser capaz de produzir materiais resistentes e mais flexíveis (HANON *et al.*, 2019)

2.4.4 Poliamida (Pa6)

De acordo com Pang *et al.* (2020) a Poliamida 6 é um dos mais versáteis polímeros semi-cristalinos, cujos quais, são vastamente utilizados no setor automobilístico. Johnson e French (2018) enfatizam que o Pa6, um tipo de Nylon, é um material conhecido pela sua resistência mecânica, química e térmica.

2.4.5 Compósitos de Carbono

Zang *et al.* (2018) descrevem que diversos estudos se propuseram a estudar a influência dos materiais e parâmetros de impressão na resistência a tração, a compressão e a flexão. Entretanto são mais escassos os estudos que buscam aumentar a resistência dos materiais de impressão 3D através de nanopartículas, fibras de carbono curtas, fibras de carbono contínuas, e outros aditivos.

Entendendo que o desenvolvimento de compósitos a base de fibras de carbono pudesse aumentar a resistência mecânica do material, Ning *et al.* (2015) criou um filamento a base de ABS e pó de fibra de carbono. O filamento desenvolvido pelo autor demonstrou em seus estudos aumentar a resistência a tração em 22,5% e o módulo de Young em 30,5%, mas em contrapartida, diminuiu a tenacidade, a ductilidade e o limite de escoamento. Seus estudos demonstraram também que a resistência a flexão, o módulo de flexão e a tenacidade a flexão aumentaram em 11,82%, 16,82% e 21,86% respectivamente. Para níveis acima de 10% de carbono o material se tornou severamente poroso.

Heidari-Rarani *et al.* (2019) utilizaram o PLA como matéria base para a composição juntamente ao carbono. Seus estudos demonstraram que o material compósito teve a resistência a tração e a flexão aumentados em 35% e 108% respectivamente. Portanto, é possível afirmar que a tecnologia da utilização de carbono para reforço de estruturas poliméricas pode ser altamente viável.

2.5 ENSAIOS E NORMAS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Segundo Norton (2013), as propriedades mecânicas de um material são determinadas por meio de testes destrutivos e não destrutivos de amostras sob condições de carregamento controlados.

De acordo com Calister e Rethwisch (2018) o comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada. Algumas propriedades mecânicas importantes são a resistência, a dureza, a ductilidade e a rigidez. Porém para determinar estas propriedades mecânicas, é necessário entender as variáveis e propriedades do processo que as determinam.

2.5.1 Tensão

É a resistência interna resultante de uma carga (P) externa aplicada sobre um corpo, por unidade de área, ela pode ser analisada em tensão convencional e tensão real (GARCIA, 2012).

Callister e Rethwisch (2018) descrevem a tensão convencional ou tensão de engenharia (σ_c) como uma carga instantânea aplicada em uma direção perpendicular à seção reta inicial (A_0) da amostra que pode ser apresentada pela Equação 2.1.

$$\sigma_c = \frac{P}{A_0} \quad (2.1)$$

Brown (2002) cita a tensão real, demonstrada por " σ_r ", como uma carga instantânea aplicada em uma direção perpendicular à seção reta instantânea (A_i) da amostra que pode ser observada na Equação 2.2.

$$\sigma_r = \frac{P}{A_i} \quad (2.2)$$

2.5.2 Deformação

A Deformação Convencional ou de Engenharia, demonstrada pelo símbolo " ε_c ", é apresentada por Garcia (2012), como a diferença entre o comprimento final e inicial da amostra e pode ser exemplificada pela Equação 2.3.

$$\varepsilon_c = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (2.3)$$

O mesmo autor descreve a deformação real (ε_r) e, segundo seus estudos ela é a variação instantânea do comprimento da amostra que pode ser demonstrado pela Equação 2.4.

$$\varepsilon_r = \ln(\varepsilon_c + 1) \quad (2.4)$$

2.5.3 Módulo de Elasticidade

Dieter (1981) caracteriza o módulo de elasticidade ou módulo de Young, demonstrado pela letra "E", como a inclinação da região linear inicial da curva tensão-deformação, cuja qual, é determinado pelas forças de ligação entre os átomos. Amplamente utilizado na engenharia

mecânica para cálculos e dimensionamento de estruturas, o módulo de Young demonstra ser um importante parâmetro a ser analisado e pode ser calculado pela Equação 2.5.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

2.5.4 Módulo de Tenacidade

Para Garcia (2012), a tenacidade é a capacidade do material absorver energia até que sofra a fratura. Ela geralmente é quantificada pela energia absorvida por unidade de volume durante todo o processo de tração. Seu cálculo é realizado a partir da área total sob a curva tensão-deformação.

2.5.5 Módulo de Ductilidade

Norton (2013) aborda a ductilidade como a tendência de um material sofrer uma deformação significativa até alcançar o limite de ruptura. A ductilidade do material pode ser medida a partir do percentual de alongamento sofrido pela amostra ou pela porcentagem de redução da área da seção na ruptura.

2.5.6 Limite de Escoamento

O limite de escoamento é uma tensão capaz de produzir uma pequena quantidade específica de deformação plástica. Segundo Garcia (2012), para materiais que não apresentam um limite de escoamento nítido, é adotado um deslocamento no eixo de deformação de 0,002 ou 0,2% e então é feita uma reta paralela a região elástica até que esta cruze a curva de deformação do material.

2.5.7 Limite de Resistência

Este limite é descrito como a maior tensão que o material pode suportar antes da ruptura. Porém deve-se considerar uma não uniformidade da área transversal da amostra durante o ensaio que, resulta em um aumento da resistência. Entretanto existe uma dificuldade de monitorar com precisão a mudança da área durante o ensaio e, portanto, é aceito que o gráfico contenha o erro de decaimento da tensão após o limite de resistência (NORTON, 2013)

2.5.8 Limite de Ruptura

O limite de ruptura apresentado por Dieter (1981) trata-se da tensão à qual o material está submetido quando se rompe. É caracterizado pelo estado de maior deformação do material.

2.5.9 Ensaio de Compressão

De acordo com Garcia (2012), o ensaio de compressão consiste na aplicação de determinada carga de compressão uniaxial crescente em um corpo de prova. Brown (2002) enfatiza que em ensaios de plásticos rígidos, geralmente as amostras possuem formatos de prismas, cilindros ou tubos, com a altura maior que o diâmetro ou espessura. Ele acrescenta que essa geometria aumenta a acurácia de medição dos parâmetros de compressão do material. Geralmente neste ensaio é possível obter o limite de resistência, limite de escoamento, módulo de elasticidade, entre outros.

A Figura 24 demonstra as curvas características para ensaios de compressão e tração realizados em materiais poliméricos.

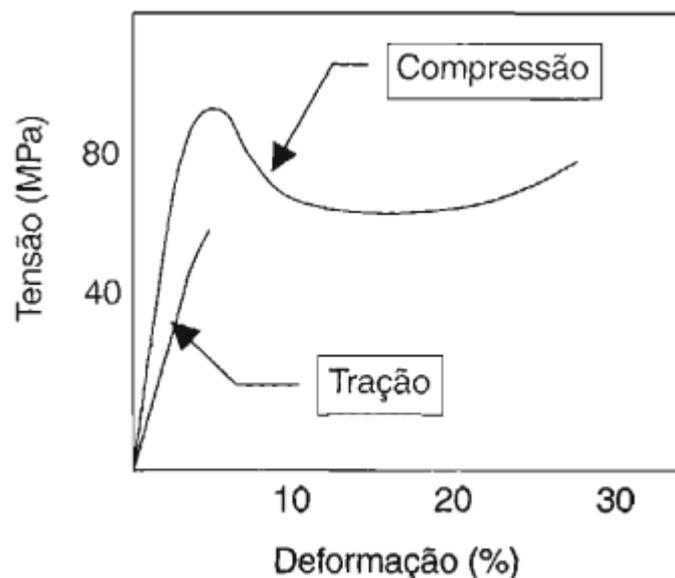


Figura 24 - Comportamento tensão-deformação para o poliestireno cristal ensaiado em tração e compressão.

Fonte: Canevarolo Jr *et al.* (2002)

Segundo Canevarolo Jr *et al.* (2002), as curvas de tensão-deformação apresentam características diferentes para os ensaios de tração e compressão. Embasado na Figura 24, o autor afirma que o ensaio de compressão apresenta uma curva típica de comportamento dúctil em função do ensaio proporcionar a redução de tamanho de defeitos como falhas e microtrincas.

Garcia (2012) enfatiza que materiais não cristalinos como polímeros e elastômeros apresentam geralmente um comportamento elástico não linear. O autor descreve que a curva

tensão-deformação em compressão aumenta rapidamente sua inclinação a medida que a deformação cresce em função do preenchimento dos espaços internos existentes na estrutura.

De acordo com Brown (2002), a Norma ASTM-D695 é amplamente utilizada para ensaios de tração de elementos poliméricos. Dizon *et al.* (2018) enfatiza que esta norma foi a mais utilizada para fins de impressão 3D via FDM. Segundo a norma ASTM-D695 (2015), as amostras devem ser prismas com dimensões de 12,7x12,7x25,4 mm ou cilindros de diâmetro igual a 12,7 mm e altura igual a 25,4 mm.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram demonstrados os conceitos relacionados às ferramentas computacionais necessárias para confeccionar um elemento via impressão 3D, as tecnologias de manufatura aditiva existentes, as variáveis do processo FDM, os materiais de impressão 3D amplamente utilizados e os ensaios e normas para determinação de propriedades mecânicas dos materiais, é possível determinar aspectos metodológicos para realização de um estudo que busca caracterizar as propriedades mecânicas de compressão para amostras impressas utilizando padrões de preenchimento e densidades de preenchimento.

No próximo capítulo é apresentada a metodologia utilizada para realização deste trabalho contendo o tipo de pesquisa, os materiais e métodos, as variáveis e indicadores, os instrumentos de coleta de dados e a tabulação dos dados.

3 METODOLOGIA

3.1 TIPO DE PESQUISA

A pesquisa científica se faz pela realização de um estudo em que o aspecto científico da investigação é caracterizado pelo método de abordagem do problema. A pesquisa se baseia em uma teoria utilizada como ponto de partida para fins de investigação e solução de um problema (PRODANOV, 2013).

Segundo Gil (2002), a classificação das pesquisas em descritiva, exploratória e explicativa é importante para que um marco teórico seja estabelecido, possibilitando assim, uma aproximação conceitual e classificação quando analisado os fins.

Para Prodanov (2013), a pesquisa descritiva ocorre através da descrição e registro de fatos observados por um pesquisador sem que este interfira. Ele enfatiza que esta pesquisa tem como objetivo descrever as características de determinado fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis.

De acordo com Vergara (2006), a pesquisa exploratória é investigação realizada acerca de uma área cuja qual há pouco conhecimento acumulado e sistematizado. O autor enfatiza que pela natureza de sondagem da pesquisa exploratória, ela não comporta hipóteses que, todavia, poderão surgir durante a pesquisa.

Pradanov (2013) descreve que a pesquisa explicativa procura explicar os porquês das coisas e suas causas através de registros, análises, classificações e interpretações de fenômenos observados. De acordo com o autor, este tipo de pesquisa visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos.

Segundo Gil (2002) e Vergara (2006), pesquisas também podem ser classificadas a partir do meio de investigação, ou seja, o método utilizado para coleta de dados. Para estes casos as formas de pesquisa podem ser classificadas como bibliográfica, documental, experimental, participante, pesquisa-ação e estudo de caso. Gil (1991 *apud* SILVA; MENEZES, 2005, p. 21) descreve as classificações de pesquisa apresentadas como:

- Pesquisa Bibliográfica: quando é elaborada a partir de material já publicado constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e atualmente com material disponibilizado na internet.
- Pesquisa Documental: quando elaborada a partir de materiais que não receberam tratamento analítico.
- Pesquisa Experimental: quando se determina um objeto de estudo, selecionam-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

- Estudo de Caso: quando envolve o estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento.
- Pesquisa Ação: quando concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. Os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.
- Pesquisa Participante: quando se desenvolve a partir da interação entre pesquisadores e membros das situações investigativas.

Segundo Silva (2001), pesquisas quantitativas consideram que o conteúdo apresentado é quantificável, ou seja, opiniões e informações podem ser traduzidas em números para serem classificadas e analisadas. O mesmo autor classifica pesquisas qualitativas como a vinculação da subjetividade sujeito ao mundo real, cuja qual, não pode ser traduzida em números.

Ao levar em consideração as definições anteriormente apresentadas, este estudo pode ser classificado como pesquisa explicativa, uma vez que ele propõe uma discussão acerca da influência dos padrões de preenchimento, densidade de preenchimento e materiais na resistência mecânica de elementos impressos via FDM.

Quanto a abordagem, o trabalho pode ser qualificado como pesquisa quantitativa, visto que todos resultados serão analisados em função dos valores obtidos através dos ensaios mecânicos. Considerando a utilização de procedimentos técnicos para a realização e análise de ensaios mecânicos realizados em laboratório, é evidente que a pesquisa experimental se faz presente.

A fim de buscar informações acerca do impacto dos parâmetros de impressão na resistência mecânica do material, foi utilizada a pesquisa bibliográfica. Esta se fez necessária para entendimento da influência de determinados parâmetros para que houvesse um embasamento na determinação dos parâmetros de impressão que foram seguidos, e para entender quais tipos de assunto não eram satisfatórios ou presentes na bibliografia.

É importante ressaltar que a pesquisa documental também foi vastamente utilizada. Esta é evidenciada pela utilização de normas e catálogos para determinação de parâmetros e procedimentos essenciais para o desenvolvimento do estudo.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Materiais

3.2.1.1 Solidworks

O Solidworks, é um *software* do tipo CAD, desenvolvido pela Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. O *software* é amplamente utilizado para dimensionamentos

mecânicos e foi utilizado para o desenho das amostras e fornecimento do arquivo em formato STL.

3.2.1.2 Simplify3D

O Simplify3D é um *software* fatiador, desenvolvido pela Simplify3D. O *software* é utilizado para geração do arquivo G-Code através do arquivo STL. O programa foi utilizado para inserir os parâmetros de impressão desejados, assim como o posicionamento da peça na mesa de impressão.

3.2.1.3 Filamentos

O filamento utilizado foi o PETG, sem adição de coloração, diâmetro de 1,75mm, da marca 3DFila, uma fabricante de materiais para impressão 3D localizada em Belo Horizonte, Minas Gerais.

3.2.1.4 Impressora 3D

De acordo com o Fabricante Fusion3 (2021) a impressora Fusion3 F400 apresenta uma velocidade máxima de 250mm/s, alcança tolerâncias de até 0,0762mm e confere uma resolução de até 20 micron. Além disso a impressora possui capacidade de imprimir peças de até 355x355x315 mm e tem suporte para utilização de 1 filamento por vez. A impressora utilizada para confecção das amostras foi disponibilizada pelo Laboratório de Robótica e Instrumentação, Instituto Tecnológico Vale.

3.2.1.5 Máquina Universal de Ensaaios

A máquina Universal de Ensaaios, uma prensa servo-controlada universal - EMIC DL20000/PC200, foi disponibilizada pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Ela foi utilizada para realizar o ensaio das amostras sob compressão.

3.2.2 Métodos

3.2.2.1 Desenho

Para realizar o ensaio de tração e compressão é necessário desenhar as amostras. O desenho foi feito utilizando o *software* SolidWorks. A Figura 25 demonstra o desenho da amostra dimensionada para o ensaio de compressão.

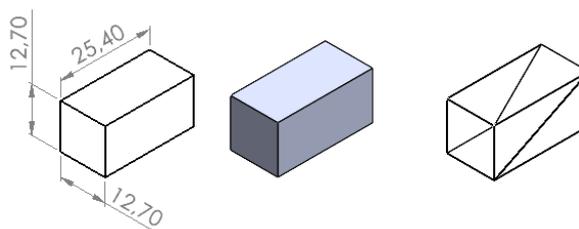


Figura 25 - Amostra para ensaio de compressão.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

O corpo de prova demonstrado pela Figura 25 foi dimensionado de acordo com a norma ASTM-D695 (2014). A norma determina que o corpo de prova seja um prisma de dimensões 12,7x12,7x25,4 mm ou um cilindro com diâmetro 12,7 mm e comprimento 25,4 mm.

A confecção dos modelos CAD foi realizada de acordo com a metodologia da modelagem paramétrica, proposta por Shih e Schilling (2020). Posteriormente foi gerado o modelo em STL a fim de reproduzir o componente no *software* fatiador.

3.2.2.2 Impressão 3D

Para início do processo de impressão, primeiramente deve ser gerado o arquivo G-Code a partir do arquivo STL previamente citado. De acordo com Amin *et al.* (2020) o G-Code contém informações relativos a configuração da impressora, configuração do filamento e configuração de impressão.

A configuração da impressora está relacionada ao diâmetro do bico, volume de impressão, velocidade de impressão, temperatura do bico e temperatura da mesa. Para o estudo foi utilizado um bico de 0,6 mm de diâmetro, um volume disponível de 355x355x315 mm, uma velocidade de 45mm/s, temperatura do bico de 230 °C e temperatura da mesa de 65 °C.

A configuração do filamento está relacionada ao diâmetro do filamento e densidade do material. Para o estudo foi utilizado um filamento de 1,75 mm de diâmetro e densidade de 1,27 g/cm³.

A configuração de impressão está relacionada ao padrão de preenchimento, densidade de preenchimento, orientação angular, orientação de construção, espessura de camada, quantidade de camadas solidas e quantidade de perímetros externos. A Tabela 3 demonstra as configurações de impressão utilizadas para confecção do corpo de prova para o ensaio de compressão.

Tabela 3 - Configurações para confecção dos corpos de prova de compressão.

Padrão de Preenchimento	Densidade (%)	Orientação Angular (°)	Orientação de Construção	Espessura da camada (mm)	Camada Sólida Superior	Camada Sólida Inferior	Perímetro Externo
Fast Honeycomb	25	45/-45	PSB	0,3	1	1	1
	50						
Full Honeycomb	25	45/-45	PSB	0,3	1	1	1
	50						
Grid	25	0/60/-60	PSB	0,3	1	1	1
	50						
Rectilinear	25	0	PSB	0,3	1	1	1
	50						
Triangular	25	0	PSB	0,3	1	1	1
	50						
Wiggle	25	0/120/-120	PSB	0,3	1	1	1
	50						
Linear	100	0	PSB	0,3	1	1	1

Fonte: Pesquisa direta (2021)

Para o estudo das amostras, o Padrão de Preenchimento e a Densidade de Preenchimento são variados, como observado na Tabela 3, a fim de determinar qual padrão mais resistente e qual a influência da porcentagem de preenchimento para cada padrão proposto.

É possível observar que a orientação angular varia de acordo com o padrão de preenchimento, isto ocorre, pois o ângulo que determina como é depositado aquele padrão para o preenchimento. Para estas amostras, foi utilizado como material o PETG, pois este possui uma maior facilidade de impressão e, geralmente, é menos afetado por erros de impressão.

Para ambos os estudos foram selecionados parâmetros priorizando a eficiência de impressão e minimização de possíveis erros ou defeitos. A Tabela 4 demonstra o posicionamento das amostras na mesa de impressão.

Tabela 4 - Deposição de padrões em orientação PSB.

Padrão	25%					50%				
Fast Honeycomb										
Full Honeycomb										
Grid										
Rectilinear										
Triangular										
Wiggle										

Fonte: Pesquisa direta (2021)

Na Tabela 4 é possível observar as primeiras camadas de impressão através da orientação PSB para diferentes tipos de padrão e densidade de preenchimento. Para alguns padrões, utilizando densidades de preenchimento menores, o Simplify3D apresenta uma baixa uniformidade do posicionamento do padrão no interior do componente. Isso pode ser observado nas amostras com 25% de preenchimento com padrões de preenchimento dos tipos Fast Honeycomb, Full Honeycomb, Grid e Triangular. As amostras com 25% de preenchimento com padrões de preenchimento dos tipos Wiggle e Rectilinear apresentam maior uniformidade. As amostras com preenchimento de 50%, apresentam uniformidade do preenchimento pois, como os padrões são menores, é evidente que o posicionamento deste na estrutura fique melhor distribuído.

É necessário considerar que, a falta de uniformidade do mesmo padrão para diferentes amostras pode gerar uma diferença na resistência mecânica do material já que, mesmo que o padrão seja o mesmo, existem diferentes quantidades de material alocados em diferentes localidades no interior da estrutura.

3.2.2.3 Procedimentos operacionais de ensaio

O ensaio de compressão foi realizado de acordo com a norma ASTM-D695 (2014) a velocidade de $1,3 \pm 0,3$ mm/min

3.3 VARIÁVEIS E INDICADORES

De acordo com Marconi *et al.* (2003), uma variável se trata de tudo que é capaz de se diferenciar em uma pesquisa qualitativa ou quantitativa. O autor acrescenta que os indicadores são objetos específicos que buscam representar uma variável abstrata. As variáveis e indicadores utilizados para o desenvolvimento deste estudo podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Tabela de Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Desenho	Dimensões da amostra ASTM-D695 Geração do modelo em STL
Impressora 3D	Diâmetro do Bico Volume de Impressão Velocidade de Impressão Temperatura do Bico Temperatura da mesa
Filamento	Material Diâmetro
Impressão	Padrão de Preenchimento Densidade de Preenchimento Orientação Angular Orientação de Construção Espessura de Camada Camada Sólida Superior Camada Sólida Inferior Perímetro Externo
Ensaio de Compressão	Velocidade Temperatura Umidade

Fonte: Pesquisa direta (2021)

Na Tabela 5 é possível observar todos os indicadores referentes às variáveis desenho, impressão 3D, impressão de amostras para diferentes materiais, impressão de amostras para diferentes preenchimentos, ensaio de tração e ensaio de compressão. Todas variáveis e indicadores foram utilizados a fim de alcançar os objetivos propostos por este trabalho.

3.4 INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS

A coleta de dados se deu através da observação dos dados gerados pela máquina universal de ensaios tanto para ensaio de tração quanto para o ensaio de compressão. Os dados referentes a carga e deformação foram utilizados para gerar o gráfico tensão \times deformação, cujo qual foi analisado para determinação dos indicadores anteriormente citados.

3.5 TABULAÇÃO DOS DADOS

Para realização da tabulação dos dados obtidos através dos ensaios mecânicos propostos, foram utilizados três tipos de *softwares*. O Excel foi utilizado para organização e disposição dos dados, o Visual Studio Code foi utilizado para confecção dos gráficos e determinação de parâmetros como limite de escoamento.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste Capítulo foram demonstradas os materiais e métodos utilizados para desenvolvimento e concretização do estudo. O objetivo proposto foi utilizado como orientação para escolha dos instrumentos necessários.

No próximo Capítulo são apresentados todos os resultados dos ensaios mecânicos de compressão analisados para que seja possível entender qual é a influência dos padrões de e densidades de preenchimento na resistência mecânica a compressão de amostras impressas via FDM.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização dos ensaios, os dados foram tratados e plotados sob forma de gráficos e tabelas, a fim de tornar possível que estes sejam analisados.

Os resultados do ensaio de tração foram plotados de forma que ficasse evidente o comportamento do material, em função das amostras serem de materiais poliméricos não frágeis, nenhuma amostra sofreu ruptura. As amostras não apresentaram limite de escoamento bem definido e, algumas apresentaram no gráfico porções iniciais não lineares. A Figura 26 demonstra o método de determinação do limite de escoamento para amostras de início linear e não linear.

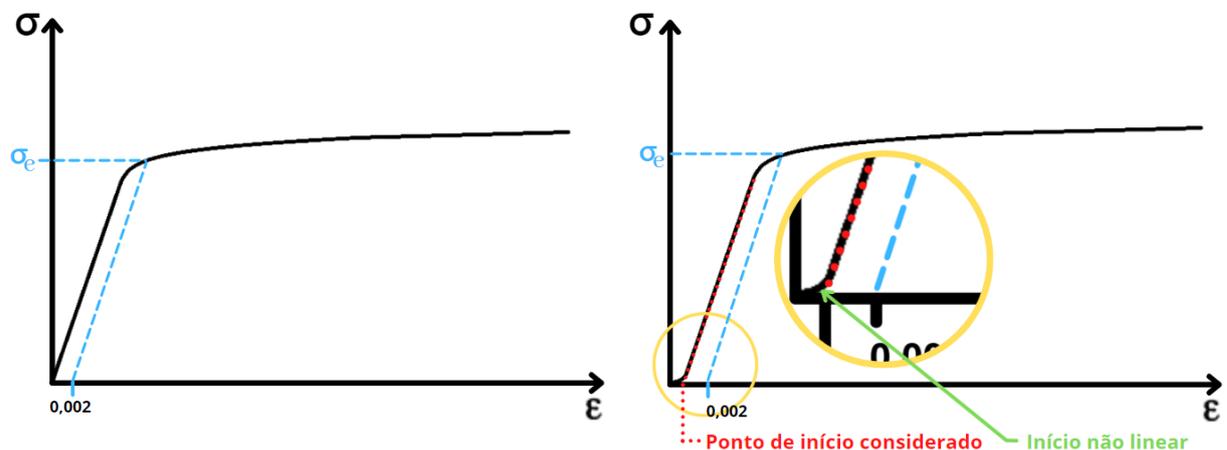


Figura 26 - Propriedades do gráfico para determinação do limite de escoamento.
Fonte: Pesquisa Direta (2021)

A Figura 26 mostra que para determinação do limite de escoamento, foram traçadas retas no ponto de deformação igual a 0,02%, paralelas a deformação elástica, que desconsideravam porções iniciais não lineares. Os inícios não lineares estão associados a pequenas diferenças de alturas entre as amostras, ele mostra o momento de adequação da face das amostras juntamente a face da prensa. O módulo de elasticidade foi determinado através de uma média de pontos obtidos durante o regime elástico das amostras.

As amostras com densidade de preenchimento igual a 25%, para o mesmo padrão de preenchimento, apresentaram uma maior diferença no comportamento mecânico entre uma amostra e outra. Isso pode ser explicado pela não uniformidade na distribuição de preenchimento realizada pelo fatiador Simplify3D, observado na Tabela 4. Essa não uniformidade é menos evidente em amostras com preenchimento de 50% pois, o padrão é melhor distribuído quando analisada a área superficial de deposição.

Após determinada deformação as amostras apresentaram um aumento exponencial de resistência a compressão. Isso ocorre devido ao preenchimento das lacunas internas existentes, fazendo com que o material se torne cada vez menos poroso, aumentando assim sua resistência mecânica. Em função das amostras com 25% de preenchimento possuem menos material e mais espaços vazios, o aumento da resistência a compressão é menor e se iniciam em deformações maiores.

4.1 FAST HONEYCOMB

As amostras com padrão de preenchimento *Fast Honeycomb* e densidade de 25%, possuíam um peso médio de $2,046 \pm 0,051$ gramas, apresentaram um Módulo de Elasticidade médio de $0,3487 \pm 0,0851$ GPa e Limite de escoamento médio de $14,7380 \pm 0,9851$ Mpa. Quando comparadas a outras amostras com 25% de densidade, estas amostras apresentaram a menor média de massa. A Figura 27 apresenta o gráfico Tensão x Deformação para amostras impressas utilizando o preenchimento *Fast Honeycomb* com densidade de 25%.

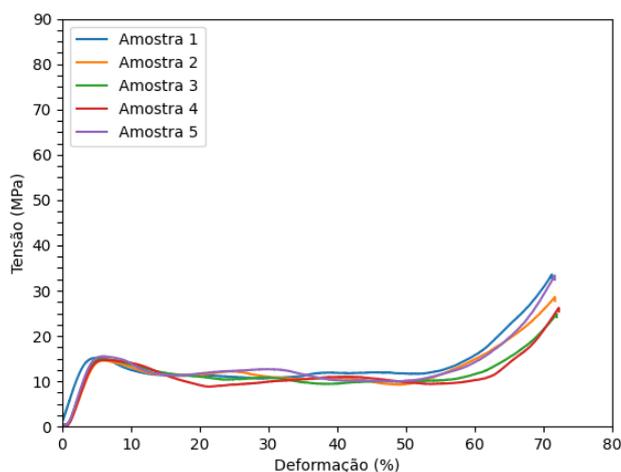


Figura 27 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra *FastHoneycomb* 25%.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Analisando a Figura 27, é possível observar que, após aproximadamente 55% de deformação, as lacunas existentes dentro da estrutura do material, já foram preenchidas e, a partir deste momento, a resistência a compressão tende a aumentar exponencialmente visto que a estrutura se tornará cada vez mais maciça. As amostras 2,3,4 e 5 apresentaram inícios não lineares e, portanto, este início foi desconsiderado para realizar o traço paralelo a reta de deformação elástica no ponto de 0,002% de deformação a fim de determinar o limite de escoamento.

As amostras com padrão de preenchimento *Fast Honeycomb* e densidade de 50%, possuíam um peso médio de $2,4738 \pm 0,071$ gramas, apresentaram um Módulo de Elasticidade médio de $0,4967 \pm 0,0554$ GPa e Limite de escoamento médio de $20,6510 \pm 0,6225$ Mpa. Quando comparadas a outras amostras com 50% de densidade, estas amostras apresentaram a menor média e maior variabilidade de massa. A Figura 28 apresenta a amostra impressa utilizando o preenchimento *Fast Honeycomb* com densidade de 50%

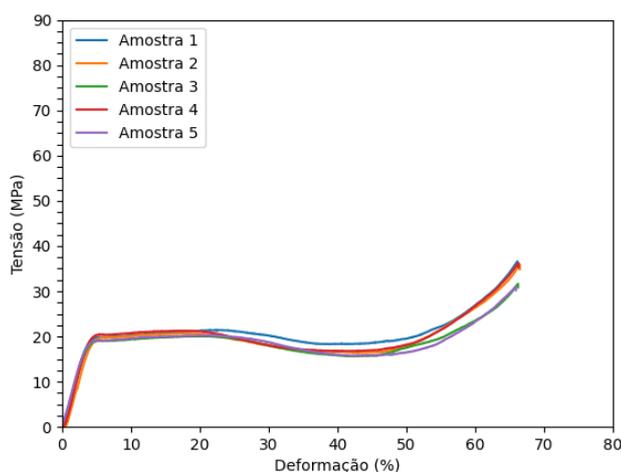


Figura 28 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra *FastHoneycomb* 50%.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Ao analisar a Figura 28, é possível observar que, após aproximadamente 50% de deformação, as lacunas existentes dentro da estrutura do material, já foram preenchidas. Todas amostras apresentaram inícios lineares.

4.2 FULL HONEYCOMB

As amostras com padrão de preenchimento *Full Honeycomb* e densidade de 25%, possuíam um peso médio de $2,227 \pm 0,168$ gramas, apresentaram um Módulo de Elasticidade médio de $0,3472 \pm 0,0999$ GPa e Limite de escoamento médio de $15,5205 \pm 1,7274$ Mpa. Quando comparadas a outras amostras com 25% de densidade, estas amostras apresentaram a maior variabilidade de massa e o menor módulo de elasticidade. A Figura 29 apresenta o gráfico Tensão x Deformação para amostras impressas utilizando o preenchimento *Full Honeycomb* com densidade de 25%.

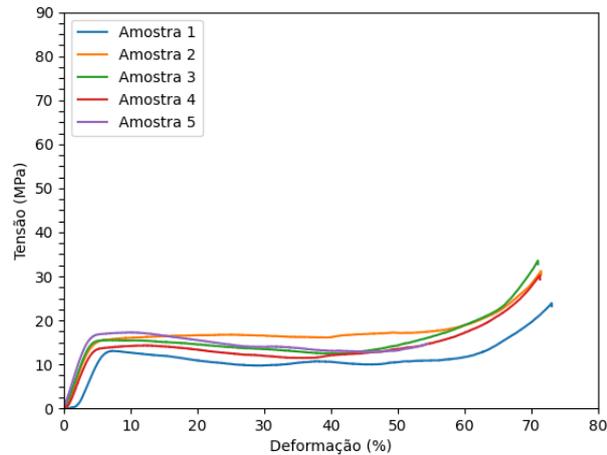


Figura 29 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra *FullHoneycomb* 25%.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Conforme a Figura 29, é possível observar que, após aproximadamente 65% de deformação, as lacunas existentes dentro da estrutura do material, já foram preenchidas. Apenas a Amostra 1 apresentou um início não linear.

As amostras com padrão de preenchimento *Full Honeycomb* e densidade de 50%, possuíam um peso médio de $2,870 \pm 0,064$ gramas, apresentaram um Módulo de Elasticidade médio de $0,5158 \pm 0,1400$ GPa e Limite de Escoamento médio de $18,9553 \pm 0,8175$ Mpa. Quando comparadas a outras amostras com 50% de densidade, estas amostras apresentaram o menor limite de escoamento. A Figura 30 apresenta o gráfico Tensão x Deformação para amostras impressas utilizando o preenchimento *Full Honeycomb* com densidade de 50%.

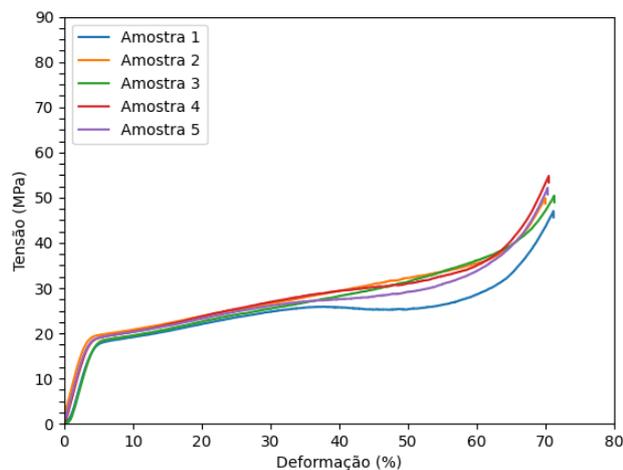


Figura 30 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra *FullHoneycomb* 50%.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Analisando a Figura 30, é possível observar que há um aumento contínuo da resistência a compressão do limite de escoamento até a deformação de aproximadamente 65%, demonstrando uma deformação uniforme da amostra. Após esta deformação, as lacunas existentes dentro da estrutura do material, já foram preenchidas. As amostras 1 e 3 apresentaram inícios não lineares.

4.3 GRID

As amostras com padrão de preenchimento *Grid* e densidade de 25%, possuíam um peso médio de $2,344 \pm 0,139$ gramas, apresentaram um Módulo de Elasticidade médio de $0,4137 \pm 0,2041$ GPa e Limite de Escoamento médio de $18,2163 \pm 3,1182$ Mpa. Quando comparadas a outras amostras com 25% de densidade, estas amostras apresentaram a maior média de massa, maior variabilidade do módulo de elasticidade, maior média e maior variabilidade do limite de escoamento. A Figura 31 apresenta o gráfico Tensão x Deformação para amostras impressas utilizando o preenchimento *Grid* com densidade de 25%.

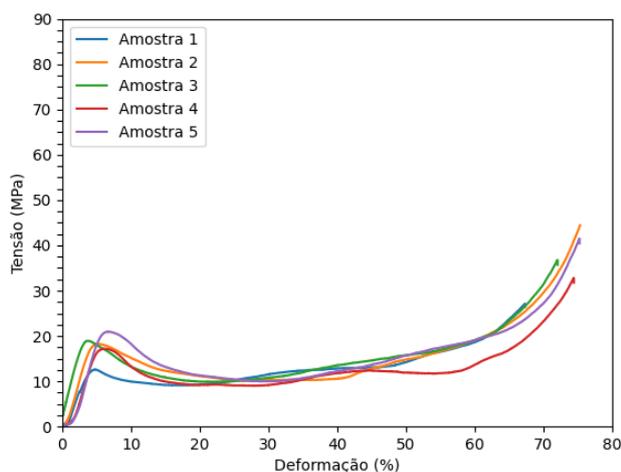


Figura 31 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra *Grid* 25%
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Conforme a Figura 31, é possível observar que, após aproximadamente 60% de deformação, as lacunas existentes dentro da estrutura do material, já foram preenchidas. Apenas a Amostra 5 apresentou um início não linear.

As amostras com padrão de preenchimento *Grid* e densidade de 50%, possuíam um peso médio de $3,286 \pm 0,047$ gramas, apresentaram um Módulo de Elasticidade médio de $0,4742 \pm 0,0433$ GPa e Limite de Escoamento médio de $29,6069 \pm 1,293$ Mpa. Quando comparadas a outras amostras com 50% de densidade, estas amostras apresentaram um menor

módulo de elasticidade, menor variabilidade do módulo de elasticidade e maior variabilidade do limite de escoamento. A Figura 32 apresenta o gráfico Tensão x Deformação para amostras impressas utilizando o preenchimento *Grid* com densidade de 50%.

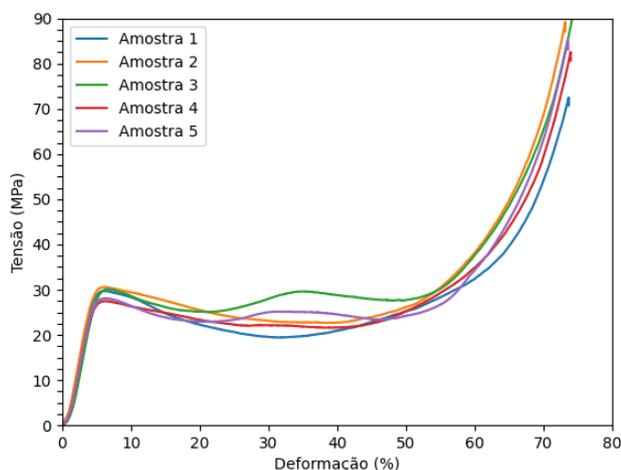


Figura 32 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra *Grid* 50%.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Ao analisar a Figura 32, é possível observar que após aproximadamente 50% de deformação, as lacunas existentes dentro da estrutura do material, já foram preenchidas. Todas amostras apresentaram inícios não lineares.

4.4 RECTILINEAR

As amostras com padrão de preenchimento *Rectilinear* e densidade de 25%, possuíam um peso médio de $2,207 \pm 0,009$ gramas, apresentaram um Módulo de Elasticidade médio de $0,3773 \pm 0,0751$ GPa e Limite de Escoamento médio de $15,0425 \pm 0,4244$ Mpa. Quando comparadas a outras amostras com 25% de densidade, estas amostras apresentaram a menor variabilidade de massa e menor variabilidade do limite de escoamento. A Figura 33 apresenta o gráfico Tensão x Deformação para amostras impressas utilizando o preenchimento *Rectilinear* com densidade de 25%.

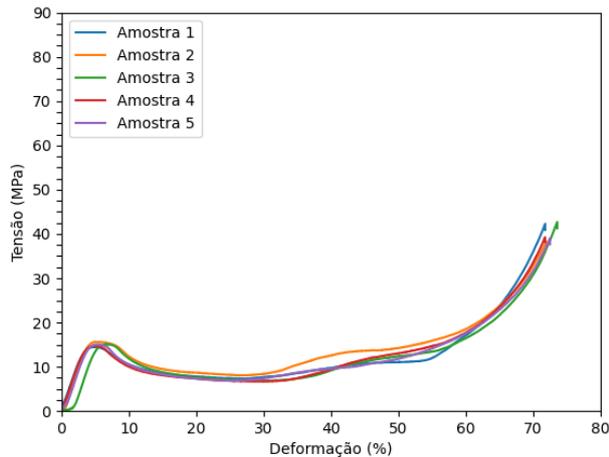


Figura 33- Gráfico Tensão x Deformação da amostra *Rectilinear* 25%.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Analisando a Figura 33, é possível observar que, após aproximadamente 55% de deformação, as lacunas existentes dentro da estrutura do material, já foram preenchidas. Apenas a Amostra 3 apresentou um início não linear.

As amostras com padrão de preenchimento *Rectilinear* e densidade de 50%, possuíam um peso médio de $3,045 \pm 0,015$ gramas, apresentaram um Módulo de Elasticidade médio de $0,6484 \pm 0,1672$ GPa e Limite de Escoamento médio de $20,4768 \pm 0,1819$ Mpa. Quando comparadas a outras amostras com 50% de densidade, estas amostras apresentaram a maior variabilidade do módulo de elasticidade e menor variabilidade do limite de escoamento. A Figura 34 apresenta o gráfico Tensão x Deformação para amostras impressas utilizando o preenchimento *Rectilinear* com densidade de 50%.

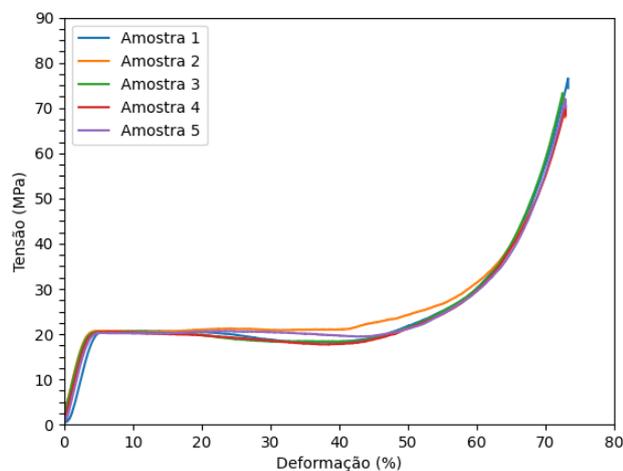


Figura 34 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra *Rectilinear* 50%.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Conforme a Figura 34, é possível observar que, após aproximadamente 55% de deformação, as lacunas existentes dentro da estrutura do material, já foram preenchidas. Somente a Amostra 1 apresentou um início não linear.

4.5 TRIANGULAR

As amostras com padrão de preenchimento *Triangular* e densidade de 25%, possuíam um peso médio de $2,119 \pm 0,145$ gramas, apresentaram um Módulo de Elasticidade médio de $0,4275 \pm 0,0410$ GPa e Limite de escoamento médio de $14,477 \pm 2,8039$ Mpa. Quando comparadas a outras amostras com 25% de densidade, estas amostras apresentaram a menor variabilidade do módulo de elasticidade e menor média do limite de escoamento. A Figura 35 apresenta o gráfico Tensão x Deformação para amostras impressas utilizando o preenchimento *Triangular* com densidade de 25%.

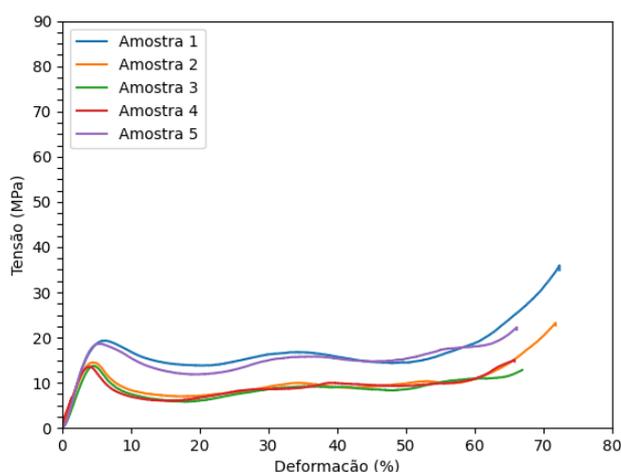


Figura 35 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra *Triangular* 25%.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Analisando a Figura 35, é possível observar que em função do padrão de preenchimento não ter sido depositado de forma não uniforme como pode ser observado na Tabela 4, as amostras 1 e 5 apresentaram uma maior resistência mecânica que as mostras 2,3 e 4. Apesar do padrão de preenchimento ter sido depositado de forma diferente, o preenchimento de lacunas ocorreu em deformações semelhantes para todas as amostras. Todas amostras apresentaram inícios lineares.

As amostras com padrão de preenchimento *Triangular* e densidade de 50%, possuíam um peso médio de $3,574 \pm 0,041$ gramas, apresentaram um Módulo de Elasticidade médio de $0,6510 \pm 0,0621$ GPa e Limite de escoamento médio de $34,2588 \pm 0,3858$ Mpa. Quando

comparadas a outras amostras com 50% de densidade, estas amostras apresentaram a maior média de massa e maior limite de escoamento. A Figura 36 apresenta o gráfico Tensão x Deformação para amostras impressas utilizando o preenchimento *Triangular* com densidade de 50%.

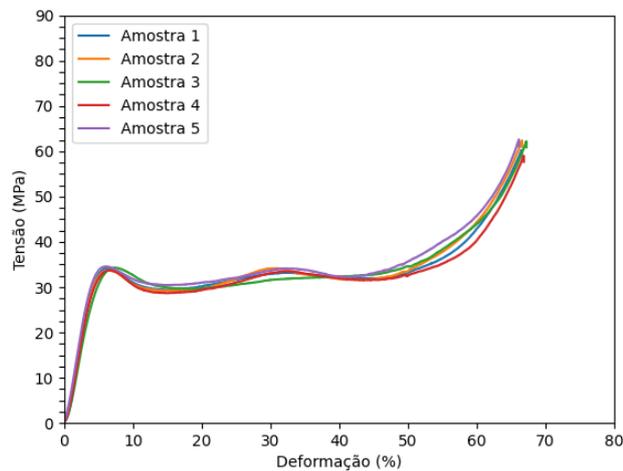


Figura 36 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra *Triangular* 50%.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Ao analisar a Figura 36, é possível observar que, após aproximadamente 50% de deformação, as lacunas existentes dentro da estrutura do material, já foram preenchidas. Todas amostras apresentaram inícios lineares.

4.6 WIGGLE

As amostras com padrão de preenchimento *Wiggle* e densidade de 25%, possuíam um peso médio de $2,139 \pm 0,036$ gramas, apresentaram um Módulo de Elasticidade médio de $0,4311 \pm 0,055$ GPa e Limite de Escoamento médio de $17,086 \pm 0,3633$ Mpa. Quando comparadas a outras amostras com 25% de densidade, estas amostras apresentaram um maior módulo de elasticidade. A Figura 37 apresenta o gráfico Tensão x Deformação para amostras impressas utilizando o preenchimento *Wiggle* com densidade de 25%.

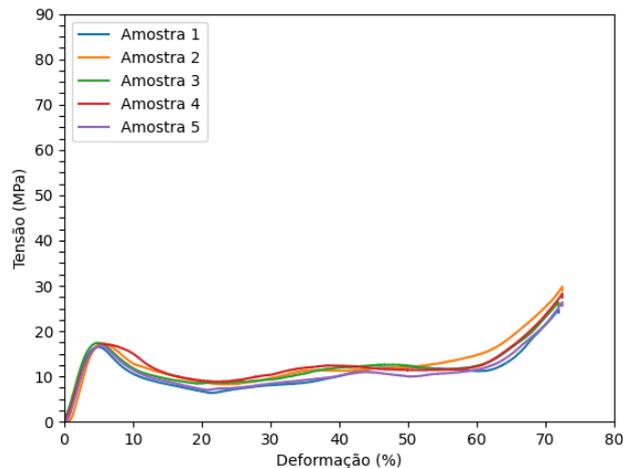


Figura 37 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra *Wiggle* 25%.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Conforme a Figura 37, é possível observar que, após aproximadamente 60% de deformação, as lacunas existentes dentro da estrutura do material, já foram preenchidas. Apenas a Amostra 2 apresentou um início não linear.

As amostras com padrão de preenchimento *Wiggle* e densidade de 50%, possuíam um peso médio de $2,894 \pm 0,004$ gramas, apresentaram um Módulo de Elasticidade médio de $0,7076 \pm 0,1273$ GPa e Limite de Escoamento médio de $23,78 \pm 0,3869$ Mpa. Quando comparadas a outras amostras com 50% de densidade, estas amostras apresentaram a menor variabilidade de massa e maior módulo de elasticidade. A Figura 38 apresenta o gráfico Tensão x Deformação para amostras impressas utilizando o preenchimento *Wiggle* com densidade de 50%.

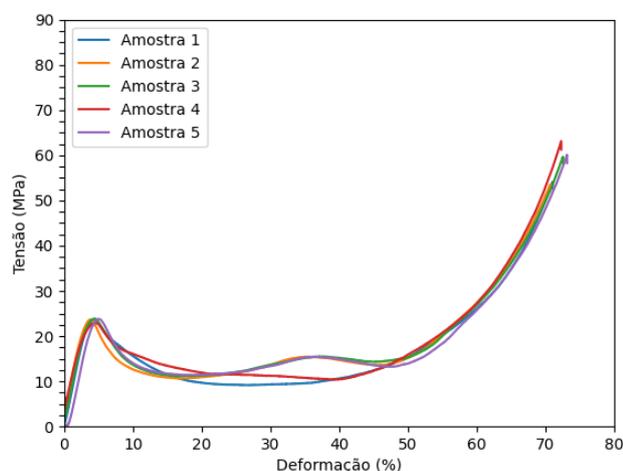


Figura 38 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra *Wiggle* 50%.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Analisando a Figura 38, é possível observar que, após aproximadamente 50% de deformação, as lacunas existentes dentro da estrutura do material, já foram preenchidas. Apenas a Amostra 5 apresentou um início não linear.

4.7 LINEAR 100%

As amostras com padrão linear e densidade de preenchimento igual a 100%, possuíam um peso médio de $4,513 \pm 0,006$ gramas, apresentaram um Módulo de Elasticidade médio de $0,7972 \pm 0,0896$ GPa e Limite de Escoamento médio de $42,041 \pm 2,0498$ Mpa. A Figura 39 apresenta o gráfico Tensão x Deformação para amostras impressas utilizando o preenchimento com densidade de 100%.

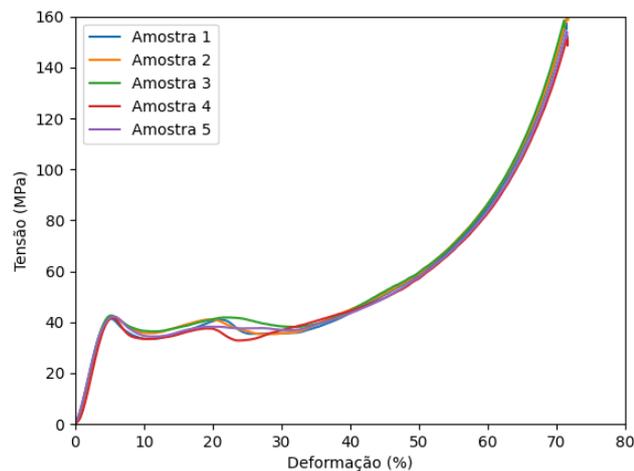


Figura 39 - Gráfico Tensão x Deformação da amostra Linear 100%.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Ao analisar a Figura 39, é possível observar que, após aproximadamente 40% de deformação, as lacunas existentes dentro da estrutura do material, já foram preenchidas. Todas amostras apresentaram inícios lineares.

4.8 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS DA PESQUISA EXPERIMENTAL

Para simplificação dos resultados e maior facilidade de comparação entre as amostras, os dados referentes às amostras foram reunidos e demonstrados por meio dos Gráficos representados pelas Figuras 40,41 e 42. A Figura 40 demonstra uma comparação da média da massa de todas as amostras.

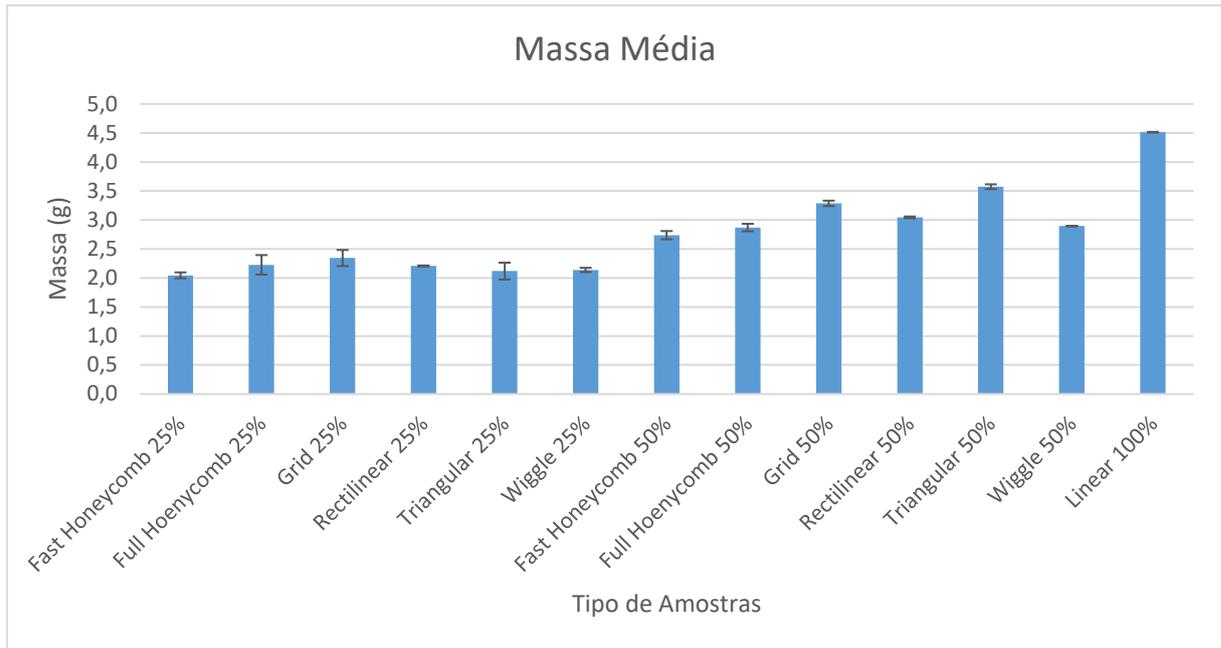


Figura 40 – Gráfico de comparação da massa média de todas amostras.
Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Como pode ser observado pela Figura 40, as amostras *Grid* apresentaram a maior média massa dentre as amostras de 25% e as amostras *Triangular* apresentaram a maior média de massa para amostras de 50%. As menores médias de massa estão relacionadas às amostras *Fast Honeycomb* tanto para a densidade de preenchimento de 25% quanto para de 50%.

A Figura 41 demonstra a comparação entre o módulo de elasticidade médio de todas as amostras.

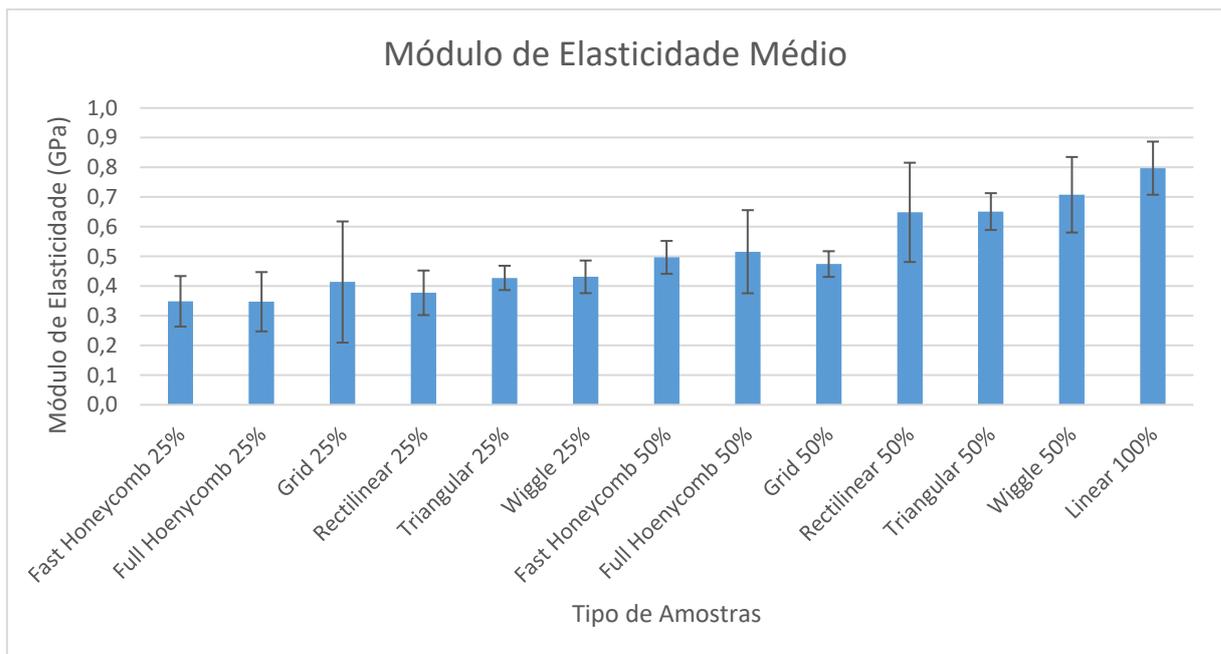


Figura 41 – Gráfico de comparação do módulo de elasticidade médio de todas amostras.
Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Como pode ser observado na Figura 41, as amostras *Wiggle* apresentaram a maior média do módulo de elasticidade para amostras de 25% e de 50%. Em contrapartida, as amostras que apresentaram menor média do módulo de elasticidade foram as *Full Honeycomb* para densidades de preenchimento de 25% e *Grid* para densidades de preenchimento de 50%.

A Figura 42 demonstra a comparação do limite de escoamento médio para todas as amostras.

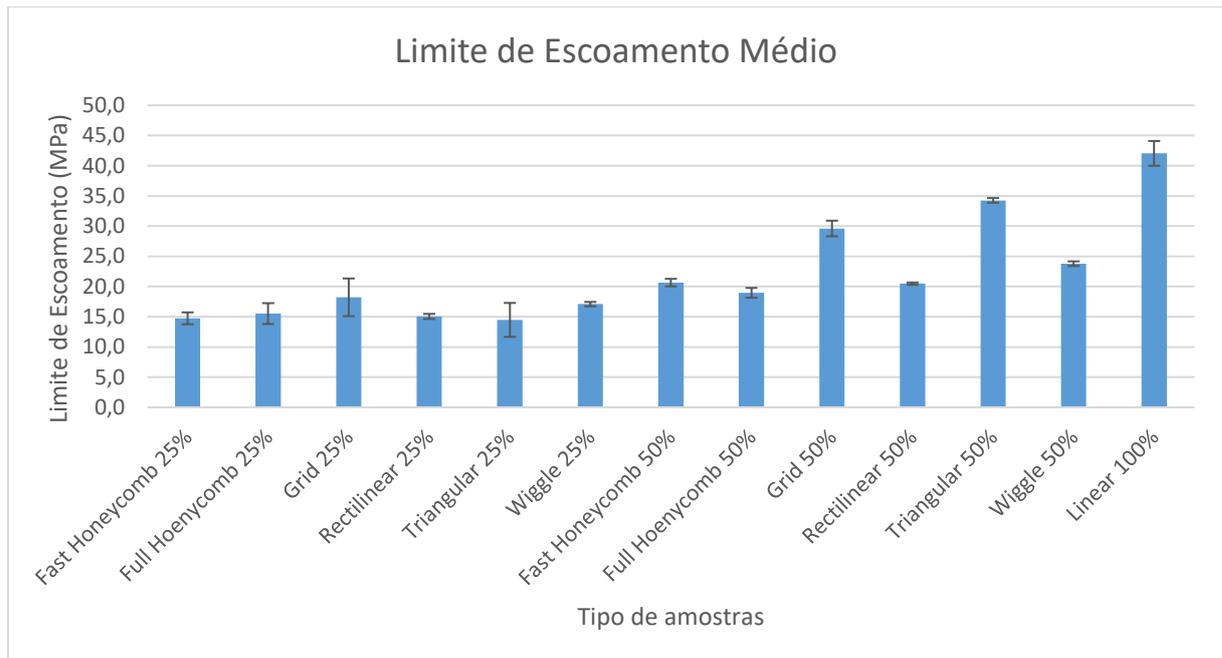


Figura 42 – Gráfico de comparação do limite de escoamento médio de todas amostras.
Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Como pode ser observado Pela Figura 42, as amostras *Grid* apresentaram a maior média do limite de escoamento para amostras de 25% de densidade de preenchimento enquanto que, para 50% de densidade de preenchimento, as amostras *Triangular* apresentaram a maior média do limite de escoamento. As amostras *Triangular* e *Full Honeycomb* apresentaram a menor média do limite de escoamento para densidade de 25% e 50%, respectivamente.

Os dados foram disponibilizados também em forma numérica e podem ser observados pela Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação geral das amostras

	Amostra 25%						Amostras 50%					
	Massa		Módulo de Elasticidade		Limite de Escoamento		Massa		Módulo de Elasticidade		Limite de Escoamento	
	(g)		(GPa)		(Mpa)		(g)		(GPa)		(Mpa)	
	Média	%	Média	%	Média	%	Média	%	Média	%	Média	%
Fast Honeycomb	2,046 ± 0,051	45,3	0,3487 ± 0,0851	43,7	14,7380 ± 0,9851	35,1	2,738 ± 0,071	60,7	0,4967 ± 0,0554	62,3	20,6510 ± 0,6225	49,1
Full Hoenycomb	2,227 ± 0,168	49,3	0,3472 ± 0,0999	43,6	15,520 5 ± 1,7274	36,9	2,870 ± 0,064	63,6	0,515 8 ± 0,14	64,7	18,9553 ± 0,8175	45,1
Grid	2,344 ± 0,139	51,9	0,4137 ± 0,2041	51,9	18,2163 ± 3,1182	43,3	3,286 ± 0,047	72,8	0,4742 ± 0,0433	59,5	29,6069 ± 1,293	70,4
Rectilinear	2,207 ± 0,009	48,9	0,3773 ± 0,0751	47,3	15,0425 ± 0,4244	35,8	3,045 ± 0,015	67,5	0,6484 ± 0,1672	81,3	20,4768 ± 0,1819	48,7
Triangular	2,119 ± 0,145	47,0	0,4275 ± 0,041	53,6	14,4770 ± 2,8039	34,4	3,574 ± 0,041	79,2	0,6510 ± 0,0621	81,7	34,2588 ± 0,3858	81,5
Wiggle	2,139 ± 0,036	47,4	0,4311 ± 0,055	54,1	17,0860 ± 0,3633	40,6	2,894 ± 0,004	64,1	0,7076 ± 0,1273	88,8	23,7808 ± 0,3869	56,6
100%	4,513 ± 0,006	100	0,7972 ± 0,0896	100	42,0410 ± 2,0498	100	4,513 ± 0,006	100	0,7972 ± 0,0896	100	42,0410 ± 2,0498	100

Fonte: Pesquisa direta (2021)

A Tabela 6 sugere uma comparação das amostras entre si e também demonstra uma comparação percentual em relação às amostras com 100% de densidade de preenchimento.

É possível observar que o aumento da porcentagem de preenchimento de 25% para 50% demonstrou uma diferença significativa na massa, módulo de elasticidade e limite de escoamento. A maior variabilidade da média de massa foi observada nas amostras do tipo Triangular, apresentando em média, 1,455 gramas de diferença. A menor variabilidade entre a média de massa foi observada nas amostras do tipo Full Honeycomb, apresentando uma média de 0,643 gramas de diferença.

Para o módulo de elasticidade, a maior variabilidade se deu nas amostras Wiggle, apresentando uma diferença de 0,2765 GPa enquanto a menor diferença do módulo de elasticidade ocorreu nas amostras Grid, apresentando uma diferença de 0,0605 GPa.

Quando analisado o limite de escoamento, a maior diferença entre limites ocorreu nas amostras do tipo Triangular, representando uma diferença de 19,818 MPa. Em contrapartida a amostra do tipo Full Honeycomb apresentou a menor diferença, representada pelo valor de 3,4348 MPa.

4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Através dos resultados obtidos, foi possível analisar a resistência mecânica das amostras fabricadas em PETG através do processo FDM variando as densidades e padrões de preenchimento variados. Foi identificado na pesquisa que tanto o padrão de preenchimento quanto a densidade de preenchimento possuem influência na resistência mecânica das amostras.

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões referentes aos resultados obtidos no trabalho e os possíveis trabalhos e recomendações futuras relacionadas a esta pesquisa.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos através do ensaio de compressão é possível concluir que o padrão de preenchimento possui uma influência significativa sobre a resistência mecânica à compressão. Os resultados demonstraram que as amostras impressas utilizando os padrões propostos pelo Simplify3D não são uniformes para um mesmo padrão e por isso podem apresentar diferentes propriedades.

É possível afirmar também que as amostras com mesma densidade de preenchimento não apresentam a mesma massa e que a densidade de preenchimento possui influência sobre a resistência mecânica à compressão, sendo que, quanto maior o grau de preenchimento, maior é a resistência mecânica.

Foi possível observar que o aumento da densidade de preenchimento demonstra um acréscimo de resistência mecânica a compressão não proporcional ao aumento de densidade e o aumento de resistência mecânica proporcionado pelo aumento da densidade é diferente e único para cada tipo de preenchimento.

Para componentes impressos com densidades de 25% ou inferiores é sugerida a utilização do padrão de preenchimento *Rectilinear* pois este apresenta uma melhor uniformidade da disposição interna do padrão conferindo uma resistência mecânica uniforme em todas porções do componente. Além disso a amostra *Rectilinear* apresenta médias interessantes de massa, módulo de elasticidade de limite de escoamento.

Para componentes impressos com densidades de 50% ou superiores é sugerida a utilização do padrão *Triangular* pois este apresenta o maior limite de escoamento e médias interessantes de massa e módulo de elasticidade.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Devido à pouca quantidade de estudos que buscam mapear e analisar a influência dos padrões de preenchimento, densidades de preenchimento e materiais de impressão na resistência mecânica de elementos fabricados via FDM, existe uma quantidade significativa de trabalhos que possam ser realizados futuramente.

Além disso, é possível também buscar formas de utilizar os resultados destes estudos para o mapeamento das propriedades mecânicas a fim de que estas sejam aplicadas a

métodos de elementos finitos para simulação computacional sob diversos tipos de densidades de preenchimento, padrões de preenchimento e materiais de impressão aplicados ao método FDM. Portanto os trabalhos futuros podem ser previstos da seguinte forma:

- Realizar um estudo para analisar a influência dos padrões de preenchimento na resistência mecânica quando submetidas ao ensaio de tração.
- Realizar um estudo para analisar a influência dos padrões de preenchimento em conjunto com a orientação de construção na resistência mecânica de amostras submetidas ao ensaio de compressão e tração.
- Realizar um estudo para analisar a resistência mecânica de amostras utilizando diferentes tipos de materiais através de ensaios de tração e compressão.
- Analisar meios de utilização dos dados obtidos para aplicação das propriedades de materiais impressos em simulações de elementos finitos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- 3DXTECH. Download Center. 2021. Disponível em:<<https://www.3dxttech.com/tech-data-sheets-safety-data-sheets/>>. Acesso em 23/05/2021.
- ABBAS, T.; OTHMAN, Farhad Mohammad; ALI, Hind Basil. Effect of infill Parameter on compression property in FDM Process. **dimensions**, v. 12, n. 12.7, p. 25.4, 2017. AGOSTON, M. K.; AGOSTON, AGOSTON, Max K.; AGOSTON, Max K. **Computer graphics and geometric modeling**. London: Springer, 2005.
- AKHOUNDI, B.; BEHRAVESH, A. H. Effect of filling pattern on the tensile and flexural mechanical properties of FDM 3D printed products. **Experimental Mechanics**, v. 59, n. 6, p. 883-897, 2019.
- ALOYAYDI, Bandar Abdullah; SIVASANKARAN, Subbarayan; AMMAR, Hany Rizk. Influence of infill density on microstructure and flexural behavior of 3D printed PLA thermoplastic parts processed by fusion deposition modeling. **AIMS materials science**, v. 6, n. 6, p. 1033-1048, 2019.
- ALVES, P. H. T. F. et al. Dispositivo Robótico de Inspeção de Trilhos. [S.l.], 2020.
- AMARAL, Renato Dias Calado; DE PINA FILHO, Armando Carlos. A Evolução do CAD e sua Aplicação em Projetos de Engenharia. 2010.
- AMBROSE, Stanley H. Paleolithic technology and human evolution. **Science**, v. 291, n. 5509, p. 1748-1753, 2001.
- AMIN, Dina et al. 3D printing of face shields during COVID-19 pandemic: a technical note. **Journal of Oral and Maxillofacial Surgery**, v. 78, n. 8, p. 1275, 2020.
- ASHBY, Michael. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. Elsevier Brasil, 2013.
- ASTM.D638-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. [S.l.]: ASTM International, 2014.
- ASTM.D695-15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. [S.l.]: ASTM International, 2015.
- AZPURUA, Hector et al. EspeleoRobô-a robotic device to inspect confined environments. In: **2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)**. IEEE, 2019. p. 17-23.
- BALA, Abduladim et al. Elements and materials improve the FDM products: A review. In: **Advanced Engineering Forum**. Trans Tech Publications Ltd, 2016. p. 33-51.
- BATHE, Klaus-Jürgen. Finite element method. **Wiley encyclopedia of computer science and engineering**, p. 1-12, 2007.
- BAUMANN, Felix et al. Influence of slicing tools on quality of 3D printed parts. **Computer-Aided Design and Applications**, v. 13, n. 1, p. 14-31, 2016.
- BEATTIE, Nicholas et al. Effects of Build Orientation on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. **Journal of Materials Engineering and Performance**, p. 1-7, 2021.
- BIKAS, Harry; STAVROPOULOS, Panagiotis; CHRYSSOLOURIS, George. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 83, n. 1-4, p. 389-405, 2016.

- BOTSCH, Mario et al. Geometric modeling based on polygonal meshes. 2007.
- BOWYER, Adrian. 3D printing and humanity's first imperfect replicator. **3D printing and additive manufacturing**, v. 1, n. 1, p. 4-5, 2014. BROWN, R. Handbook of polymer testing: short-term mechanical tests. [S.l.]: Rapra technology, 2002.
- CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials science and engineering: an introduction**. New York: Wiley, 2018.
- CAMARGO, José C. et al. Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 103, n. 5-8, p. 2423-2443, 2019.
- CAMPBELL, Thomas et al. Could 3D printing change the world. **Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing, Atlantic Council, Washington, DC**, v. 3, 2011.
- CANEVAROLO JR, Sebastião V. Ciência dos polímeros. **Artiliber editora, São Paulo**, p. 110-115, 2002.
- CHACÓN, J. M. et al. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. **Materials & Design**, v. 124, p. 143-157, 2017.
- DALENOGARE, Lucas Santos et al. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics**, v. 204, p. 383-394, 2018.
- DA SILVA, Edna Lucia; MENEZES, Estera Muszkat. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. **UFSC, Florianópolis, 4a. edição**, v. 123, 2005.
- DAVE, Harshit K. et al. Effect of infill pattern and infill density at varying part orientation on tensile properties of fused deposition modeling-printed poly-lactic acid part. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 235, n. 10, p. 1811-1827, 2021.
- DEROSSA, A. et al. Extending the 3D food printing tests at high speed. Material deposition and effect of non-printing movements on the final quality of printed structures. **Journal of Food Engineering**, v. 275, p. 109865, 2020.
- DEY, Arup; YODO, Nita. A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 3, n. 3, p. 64, 2019.
- DIETER, GEORGE E. Metalurgia Mecânica. 2ª edição. **Editora Guanabara Dois**, 1981.
- DIZON, John Ryan C. et al. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Additive Manufacturing**, v. 20, p. 44-67, 2018.
- DUDEK, P. F. D. M. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. **Archives of metallurgy and materials**, v. 58, n. 4, p. 1415--1418, 2013.
- DUPAIX, Rebecca B.; BOYCE, Mary C. Finite strain behavior of poly (ethylene terephthalate)(PET) and poly (ethylene terephthalate)-glycol (PETG). **Polymer**, v. 46, n. 13, p. 4827-4838, 2005.
- ERAGUBI, Munir. Slicing 3D CAD model in STL format and laser path generation. **International journal of innovation, management and technology**, v. 4, n. 4, p. 410, 2013.

- ESUN3D.Download Center. 2021. Disponível em:<<https://www.esun3d.net/DownLoad/>>. Acesso em 23/05/2018.
- F3DB.Produutos. 2021. Disponível em:<<https://www.filamentos3dbrasil-.com.br/produutos/>>. Acesso em 23/05/2021.
- FERNANDEZ-VICENTE, Miguel et al. Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing. **3D printing and additive manufacturing**, v. 3, n. 3, p. 183-192, 2016.
- FILHO, L. W. d. R. et al. Relatório de Experimentos de Campo na Mina do Salobo. [S.l.], 2020.
- FOUNTAS, N. A. et al. Experimental investigation and statistical modelling for assessing the tensile properties of FDM fabricated parts. **Procedia Structural Integrity**, v. 26, p. 139-146, 2020.
- GAO, Wei et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, v. 69, p. 65-89, 2015.
- GARCIA, A. Ensaio Dos Materiais. [S.l.]: LTC, 2012. ISBN 9788521620679.
- GARDAN, Julien. Additive manufacturing technologies: state of the art and trends. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 10, p. 3118-3132, 2016.
- GEBISA, Aboma Wagari; LEMU, Hirpa G. Investigating effects of Fused-Deposition Modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ULTEM 9085 using designed experiment. **Materials**, v. 11, n. 4, p. 500, 2018.
- GEBISA, Aboma Wagari; LEMU, Hirpa G. Influence of 3D printing FDM process parameters on tensile property of ULTEM 9085. **Procedia Manufacturing**, v. 30, p. 331-338, 2019.
- GEMBIRD. Filaments for 3D printers. 2021. Disponível em: <<https://gembird.com/products.aspx?sg=285>>. Acesso em 23/05/2021.
- GIGANTO, Sara et al. Analysis of Geometric and Dimensional Stability Over Time of Printed Parts by CJP Additive Technique.
- GIL, Antonio Carlos. Como classificar as pesquisas. **Como elaborar projetos de pesquisa**, v. 4, p. 44-45, 2002.
- GURRALA, Pavan Kumar; REGALLA, Srinivasa Prakash. Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling: This paper studies how coalescence of filaments contributes to the strength of final FDM part. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 9, n. 3, p. 141-149, 2014.
- HALEEM, Abid; JAVAID, Mohd. Additive manufacturing applications in industry 4.0: a review. **Journal of Industrial Integration and Management**, v. 4, n. 04, p. 1930001, 2019.
- HANON, Muammel M.; MARCZIS, Róbert; ZSIDAI, László. Anisotropy evaluation of different raster directions, spatial orientations, and fill percentage of 3D printed PETG tensile test specimens. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications Ltd, 2019. p. 167-173.
- HAUSMAN, Kalani Kirk; HORNE, Richard. **3D printing for dummies**. John Wiley & Sons, 2014.
- HEIDARI-RARANI, Mohammad; RAFIEE-AFARANI, M.; ZAHEDI, A. M. Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 175, p. 107147, 2019.

HUGHES, Thomas JR; COTTRELL, John A.; BAZILEVS, Yuri. Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, v. 194, n. 39-41, p. 4135-4195, 2005.

JOHNSON, Gabriel A.; FRENCH, Jesse J. Evaluation of infill effect on mechanical properties of consumer 3D printing materials. **Advances in Technology Innovation**, v. 3, n. 4, p. 179, 2018.

JONES, Rhys et al. RepRap—the replicating rapid prototyper. **Robotica**, v. 29, n. 1, p. 177-191, 2011.

KITSAKIS, K. et al. An investigation of dimensional accuracy of multi-jet modeling parts. In: **Proceedings of the International Conference in Applied Mathematics, Computational Science and Engineering, Crete, Greece**. 2015.

LALIBERTE, Thierry; GOSSELIN, Clement M.; COTE, Gabriel. Practical prototyping. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, v. 8, n. 3, p. 43-52, 2001.

LEE, Byoung Hun; ABDULLAH, Jamaluddin; KHAN, Zahid A. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. **Journal of materials processing technology**, v. 169, n. 1, p. 54-61, 2005.

LI, Longmei et al. Composite modeling and analysis for fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties. **Journal of manufacturing processes**, v. 4, n. 2, p. 129-141, 2002.

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

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed.-São Paulo: Atlas, 2003.

MATWEB. Overview of materials for PETG Copolyester. 2021. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4de1c85bb946406a86c52b688e3810d0>>. Acesso em 23/05/2021.

MATWEB. Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Extruded. 2021. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3a8afcddac864d4b8f58d40570d2e5aa>>. Acesso em 23/05/2021.

MATWEB. Overview of materials for Nylon 6, Unreinforced. 2021. Disponível em: <www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fb48404b7e04433bb3ee3d2a0af922ff>. Acesso em 23/05/2021.

MATWEB. Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer. 2021. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278>>. Acesso em 23/05/2021.

MAURYA, Nagendra Kumar; RASTOGI, Vikas; SINGH, Pushpendra. An overview of mechanical properties and form error for rapid prototyping. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 29, p. 53-70, 2020.

MAZURCHEVICI, Andrei Danut et al. Additive manufacturing of composite materials by FDM technology: A review. **Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS)**, v. 27, n. 2, p. 179-192, 2021.

MILDE, Ján et al. Research of ABS and PLA materials in the process of fused deposition modeling method. **Ann. DAAAM Proc**, v. 28, p. 812-820, 2017.

- MISHRA, Swayam Bikash; MALIK, Rameez; MAHAPATRA, S. S. Effect of external perimeter on flexural strength of FDM build parts. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 42, n. 11, p. 4587-4595, 2017.
- MONZÓN, M. D. et al. Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects. **The international journal of advanced manufacturing technology**, v. 76, n. 5-8, p. 1111-1121, 2015.
- MOTAPARTI, Krishna P. et al. Effects of build parameters on compression properties for ULTEM 9085 parts by fused deposition modeling. 2016.
- MOTAPARTI, Krishna P. et al. Experimental investigation of effects of build parameters on flexural properties in fused deposition modelling parts. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 12, n. 3, p. 207-220, 2017.
- NING, Fuda et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. **Composites Part B: Engineering**, v. 80, p. 369-378, 2015.
- NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**. bookman editora, 2013.
- OLIVERA, Sharon et al. Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review. **Journal of materials science**, v. 51, n. 8, p. 3657-3674, 2016.
- PANDZIC, Adi; HODZIC, Damir; MILOVANOVIC, Aleksa. EFFECT OF INFILL TYPE AND DENSITY ON TENSILE PROPERTIES OF PLAMATERIAL FOR FDM PROCESS. **Annals of DAAAM & Proceedings**, v. 30, 2019.
- PANG, Xuan et al. Polylactic acid (PLA): research, development and industrialization. **Biotechnology Journal**, v. 5, n. 11, p. 1125-1136, 2010.
- PARANDOUSH, Pedram; LIN, Dong. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. **Composite Structures**, v. 182, p. 36-53, 2017.
- PENG, W. A. N. G. et al. Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK. **Chinese Journal of Aeronautics**, 2020.
- PETERSEN, Emily E.; PEARCE, Joshua. Emergence of home manufacturing in the developed world: Return on investment for open-source 3-D printers. **Technologies**, v. 5, n. 1, p. 7, 2017.
- POLYMAKER. Download. 2021. Disponível em: <<https://polymaker-.com/download/>>.
- Acesso em 23/05/2021.
- POPESCU, Diana et al. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. **Polymer Testing**, v. 69, p. 157-166, 2018.
- POZDNYAKOVA, Ulyana A. et al. Genesis of the revolutionary transition to industry 4.0 in the 21st century and overview of previous industrial revolutions. In: **Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century**. Springer, Cham, 2019. p. 11-19.
- PRODANOV, Cleber Cristiano; DE FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição**. Editora Feevale, 2013.
- RAJPUROHIT, Shilpesh R.; DAVE, Harshit K. Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part. **Rapid Prototyping Journal**, 2018.
- RAJPUROHIT, Shilpesh R.; DAVE, Harshit K. Flexural strength of fused filament fabricated (FFF) PLA parts on an open-source 3D printer. **Advances in Manufacturing**, v. 6, n. 4, p. 430-441, 2018.

REDWOOD, Ben; SCHÖFFER, Filemon; GARRET, Brian. **The 3D printing handbook: technologies, design and applications**. 3D Hubs, 2017.

SANATGAR, Raziéh Hashemi; CAMPAGNE, Christine; NIERSTRASZ, Vincent. Investigation of the adhesion properties of direct 3D printing of polymers and nanocomposites on textiles: Effect of FDM printing process parameters. **Applied Surface Science**, v. 403, p. 551-563, 2017.

SARCAR, M. M. M.; RAO, K. Mallikarjuna; NARAYAN, K. Lalit. **Computer aided design and manufacturing**. PHI Learning Pvt. Ltd., 2008.

SHAH, Paras; RACASAN, Radu; BILLS, Paul. Comparison of different additive manufacturing methods using computed tomography. **Case studies in nondestructive testing and evaluation**, v. 6, p. 69-78, 2016.

SHIH, Randy; SCHILLING, Paul. **Parametric Modeling with SOLIDWORKS 2020**. Sdc Publications, 2020.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 2001.

SINGH, Sunpreet; RAMAKRISHNA, Seeram; BERTO, Filippo. 3D Printing of polymer composites: A short review. **Material Design & Processing Communications**, v. 2, n. 2, p. e97, 2020.

ŠLJIVIC, M. et al. Comparing the accuracy of 3D slicer software in printed enduse parts. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2019. p. 012082.

SOLOMON, I. John; SEVVEL, P.; GUNASEKARAN, J. A review on the various processing parameters in FDM. **Materials Today: Proceedings**, v. 37, p. 509-514, 2021.

SRINIVASAN, R. et al. Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modelling. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 1838-1842, 2020.

SYSTEMES, Dassault. Solidworks. 2019. **Dessault Systemes: Vélizy-Villacoublay, France**, 2011.

TEOTÔNIO, R. d. O. et al. Projeto de um dispositivo robótico para inspeção de tubulações com diâmetros reduzidos. [S.l.], 2020.

TORO, Elena Verdejo et al. Analysis of the influence of the variables of the Fused Deposition Modeling (FDM) process on the mechanical properties of a carbon fiber-reinforced polyamide. **Procedia Manufacturing**, v. 41, p. 731-738, 2019.

ULTRAFUSE. Choose the right filament. 2021. Disponível em: <<https://www.ultrafuseff.com/product-category/innopro/>>. Acesso em 23/05/2019.

VAEZI, Mohammad; SEITZ, Hermann; YANG, Shoufeng. A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, n. 5-8, p. 1721-1754, 2013.

VALE, I. T. Atuamos em pesquisa e geração de conhecimento por um futuro mais sustentável. 2021. Disponível em: <<http://www.itv.org/>>. Acesso em 10/05/2021.

VALE, I. T. Robótica Aplicada à Mineração. 2021. Disponível em: <<http://www.itv.org/linha-de-pesquisa/robotica-aplicada-a-mineracao/>>. Acesso em 10/05/2021.

VERGARA, Sylvia Constant. Projetos e relatórios de pesquisa. **São Paulo: Atlas**, 2006.

- VIDAKIS, Nectarios et al. On the strain rate sensitivity of fused filament fabrication (FFF) processed PLA, ABS, PETG, PA6, and PP thermoplastic polymers. **Polymers**, v. 12, n. 12, p. 2924, 2020.
- VINODH, S. et al. Agile product development through CAD and rapid prototyping technologies: an examination in a traditional pump-manufacturing company. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 46, n. 5, p. 663-679, 2010.
- WANG, Jianlei et al. A novel approach to improve mechanical properties of parts fabricated by fused deposition modeling. **Materials & Design**, v. 105, p. 152-159, 2016.
- WANG, Lu; GRAMLICH, William M.; GARDNER, Douglas J. Improving the impact strength of Poly (lactic acid)(PLA) in fused layer modeling (FLM). **Polymer**, v. 114, p. 242-248, 2017.
- WICKRAMASINGHE, Sachini; DO, Truong; TRAN, Phuong. FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. **Polymers**, v. 12, n. 7, p. 1529, 2020.
- WILTGEN, Filipe. Protótipos e prototipagem rápida aditiva sua importância no auxílio do desenvolvimento científico e tecnológico. In: **Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), São Carlos-SP**. 2019.
- WOHLERS, Terry T. **Wohlers report 2012: additive manufacturing and 3D printing state of the industry: annual worldwide progress report**. Wohlers Associates, 2012.
- WONG, Kaufui V.; HERNANDEZ, Aldo. A review of additive manufacturing. **International scholarly research notices**, v. 2012, 2012.
- WU, Wenzheng et al. 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**, v. 8, n. 9, p. 5834-5846, 2015.
- YADAV, Pushpendra; SAHAI, Ankit; SHARMA, Rahul Swarup. Strength and surface characteristics of FDM-based 3D printed PLA parts for multiple infill design patterns. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series C**, v. 102, n. 1, p. 197-207, 2021.
- YANG, Teng-Chun; YEH, Chin-Hao. Morphology and Mechanical Properties of 3D Printed Wood Fiber/Poly(lactic acid) Composite Parts Using Fused Deposition Modeling (FDM): The Effects of Printing Speed. **Polymers**, v. 12, n. 6, p. 1334, 2020.
- ZHANG, Wei et al. Interfacial bonding strength of short carbon fiber/acrylonitrile-butadiene-styrene composites fabricated by fused deposition modeling. **Composites Part B: Engineering**, v. 137, p. 51-59, 2018.