

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

ANA PAULA NASCIMENTO JARDIM

**Efeito do padrão de preenchimento em impressão 3D nos resultados de
resistência à tração do polímero acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS)**

**São Leopoldo
2020**

ANA PAULA NASCIMENTO JARDIM

Efeito do padrão de preenchimento em impressão 3D nos resultados de resistência à tração do polímero acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Graduado em Engenharia de Materiais, pelo Curso de Engenharia de Materiais da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. André Canal Marques

São Leopoldo

2020

Este trabalho é dedicado aos meus pais, João Carlos Corrêa Jardim e Eva de Jesus Nascimento (*in memoriam*). Não há exemplo maior de dedicação à família, caráter e honestidade.

RESUMO

A impressão 3D é uma tecnologia de manufatura aditiva (AM) que permite a fabricação de objetos com geometrias complexas partindo de um modelo tridimensional digital. A popularização crescente dos processos de impressão 3D fez aumentar o interesse científico na área. Na elaboração de objetos com impressão 3D via modelagem por fusão e deposição (FDM), é muito comum utilizar uma variada gama de padrões de preenchimento, com o objetivo de reduzir o tempo de impressão e o consumo de material. No entanto, não se conhece adequadamente como esse fator influencia as características mecânicas das peças obtidas. Neste trabalho, foi avaliada a influência de cinco padrões de preenchimento distintos na resistência à tração do polímero ABS. Uma série de corpos de prova de resistência à tração, com padrões de preenchimento do tipo *tri hexagon* (TH), *grid* (GR), *cubic* (CB), *triangle* (TR) e *gyroid* (GY) foi produzida usando uma impressora 3D comercial. Os resultados obtidos mostram que as diferentes configurações de preenchimento alteram os resultados de resistência à tração do ABS. O padrão de preenchimento que apresentou melhor relação entre resistência à tração e massa dos corpos de prova foi a configuração *tri hexagon* (TH). Contudo, são necessários estudos com maior número de repetições para melhor compreender a variação nos resultados.

Palavras-chave: ABS. FDM. Impressão 3D. Padrão de preenchimento. Resistência à Tração.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Charles Hull, vencedor do prêmio European Inventor Award 2014 na categoria países não europeus.	13
Figura 2 – Representação esquemática de uma configuração típica de FDM.	15
Figura 3 – Representação esquemática do processo de manufatura aditiva (impressão 3D).....	21
Figura 4 – Representação do processo de fusão do leito em pó, com base em um feixe de laser que funde o material.	23
Figura 5 – Deposição direta de energia (DED).....	24
Figura 6 – Representação do processo de estereolitografia.	25
Figura 7 – Peça obtida por SLA.	26
Figura 8 – Representação do processo Impressão a jato de tinta (<i>Inkjet printing</i>), também conhecido como <i>material jetting</i> (MJ) ou <i>drop on demand</i> (DOD).....	27
Figura 9 – Processo <i>contour crafting</i>	28
Figura 10 – O “BOD” é um pequeno escritório impresso em 3D com menos de 50 metros quadrados.	28
Figura 11 – Representação da tecnologia LOM.....	29
Figura 12 – Ilustração do processo FDM (FFF).....	30
Figura 13 – Linhas de deposição do processo FDM (FFF).	31
Figura 14 – Ilustração geral dos parâmetros do processo FDM.....	33
Figura 15 – Ilustração dos parâmetros do processo FDM visualizados diretamente no objeto impresso.	33
Figura 16 – Estrutura molecular do ABS.	35
Figura 17 – Filamentos de ABS para impressão 3D, fabricados em diversas colorações.....	37
Figura 18 – Filamento de ABS utilizado no trabalho.	38
Figura 19 – Diagrama esquemático representativo da metodologia utilizada no trabalho.	40
Figura 20 – Impressora 3D Sethi3D S3.....	41
Figura 21 – Interface do <i>software</i> Cura.	42
Figura 22 – Dimensões (em mm) do corpo de prova impresso no trabalho.....	43
Figura 23 – Ensaio de resistência à tração.	45
Figura 24 – Dimensões dos corpos de prova avaliadas na análise dimensional.	49

Figura 25 – Imagem obtida por microscopia ótica da amostra TH.	62
Figura 26 – Imagem obtida por microscopia ótica da amostra GR.....	62
Figura 27 – Imagem obtida por microscopia ótica da amostra CB.....	63
Figura 28 – Imagem obtida por microscopia ótica da amostra TR.....	63
Figura 29 – Imagem obtida por microscopia ótica da amostra GY.....	63
Figura 30 – Região de rompimento da amostra GY (esquerda) e amostra CB (direita).....	64
Figura 31 – Sobreposição dos espectros de infravermelho das amostras avaliadas.	65
Figura 31 – Sobreposição das análises termogravimétricas das amostras avaliadas.	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Massa dos corpos de prova, em gramas (g).....	47
Gráfico 2 – Desvio padrão, em gramas (g).....	49
Gráfico 3 – Erro relativo da dimensão comprimento (%).....	50
Gráfico 4 – Erro relativo da dimensão largura (%).	51
Gráfico 5 – Erro relativo da dimensão largura central (%).....	52
Gráfico 6 – Erro relativo da dimensão espessura (%).....	52
Gráfico 7 – Curva de tensão (MPa) <i>versus</i> deformação (adimensional) da amostra TH.	54
Gráfico 8 – Curva de tensão (MPa) <i>versus</i> deformação (adimensional) da amostra GR.....	54
Gráfico 9 – Curva de tensão (MPa) <i>versus</i> deformação (adimensional) da amostra CB.	55
Gráfico 10 – Curva de tensão (MPa) <i>versus</i> deformação (adimensional) da amostra TR.	55
Gráfico 11 – Curva de tensão (MPa) <i>versus</i> deformação (adimensional) da amostra GY.....	56
Gráfico 12 – Força máxima (kgf) obtida no teste de resistência a tração.....	56
Gráfico 13 – Tensão de escoamento (MPa) obtida no teste de resistência a tração.....	58
Gráfico 14 – Tensão máxima (MPa) obtida no teste de resistência a tração.	58
Gráfico 15 – Tensão de ruptura (MPa) obtida no teste de resistência a tração.	59
Gráfico 16 – Alongamento na ruptura (%) obtida no teste de resistência a tração....	59
Gráfico 17 – Módulo de elasticidade (MPa) obtido no teste de resistência a tração.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - As sete categorias de processos AM da ASTM F42.	22
Tabela 2 - Propriedades do filamento de ABS.	38
Tabela 3 - Parâmetros de impressão usados na elaboração dos corpos de prova...43	
Tabela 4 - Massa dos corpos de prova, em gramas (g).	47
Tabela 5 – Desvio padrão, em gramas (g).	48
Tabela 6 – Avaliação dimensional das amostras, em milímetros (mm).....	50
Tabela 7 – Resultados do ensaio de resistência à tração.	57
Tabela 8 – Resultados do ensaio de resistência à tração normalizados pela massa.	60

LISTA DE SIGLAS

ABS	Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
AM	Manufatura Aditiva
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	Reflectância Total Atenuada
BOD	<i>Building on Demand</i>
C	Comprimento
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CB	<i>Cubic</i>
CPS	Sistemas Ciber Físicos
DED	Deposição Direta de Energia
DIY	<i>Do It Yourself</i>
DLP	Processamento Digital de Luz
DMLS	Sinterização Direta de Metal a Laser
DOD	<i>Drop on Demand</i>
E	Espessura
EBM	Fusão por Feixe de Elétrons
EPO	<i>European Patent Organisation</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i> – Modelagem por Fusão e Deposição
FFF	Fabricação com Filamento Fundido
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
GR	<i>Grid</i>
GY	<i>Gyroid</i>
HIPS	Poliestireno de Alto Impacto
IA	Inteligência Artificial
IoT	Internet das Coisas
L	Largura
LC	Largura Central
LMD	Deposição de Metal a Laser
LOM	Fabricação de Objetos Laminados
MJ	<i>Material Jetting</i>
MJM	Modelagem por Jatos Múltiplos

PA	Poliamida
PBIH	Impressão sobre leito de partículas e jato de tinta
PC	Policarbonato
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PETG	Poli(tereftalato de etileno glicol)
PLA	Poli(ácido láctico)
PMMA	Polimetilmetacrilato
PP	Polipropileno
PVA	Poli(acetato de vinila)
RM	Ressonância Magnética
RP	Prototipagem Rápida
SHS	Sinterização Seletiva por Calor
SLA	Estereolitografia
SLM	Fusão Seletiva a Laser
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
SynBio	Biologia Sintética
TC	Tomografia Computadorizada
Tg	Temperatura de Transição Vítrea
TGA	Análise Termogravimétrica
TH	<i>Tri Hexagon</i>
TPU	Poliuretano Termoplástico
TR	<i>Triangle</i>
UAM	Manufatura Aditiva Ultrassônica
UC	Consolidação Ultrassônica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Tema	12
1.2 Delimitação do Tema	14
1.3 Problema	15
1.4 Objetivos	16
1.4.1 Objetivo Geral	16
1.4.2 Objetivos Específicos	16
1.5 Justificativa	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Impressão 3D	18
2.2 Etapas da impressão 3D	19
2.3 Exemplos de impressão 3D	21
2.3 Modelagem por fusão e deposição (FDM)	30
2.4 Parâmetros de impressão no processo FDM/FFF	32
2.5 ABS	35
3 MATERIAIS E METODOLOGIA	38
3.1 Materiais	38
3.2 Metodologia	39
3.2.1 Preparação dos corpos de prova via FDM/FFF	40
3.2.2 Caracterização	44
3.2.2.1 <i>Gravimetria</i>	44
3.2.2.2 <i>Análise dimensional</i>	44
3.2.2.3 <i>Resistência à Tração</i>	44
3.2.2.4 <i>Microscopia ótica</i>	45
3.2.2.5 <i>Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</i>	46
3.2.2.6 <i>Análise Termogravimétrica (TGA)</i>	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 Gravimetria	47
4.2 Análise Dimensional	49
4.3 Resistência à Tração	54
4.4 Microscopia ótica	61
4.5 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	64

4.6 Análise Termogravimétrica (TGA)	65
5 CONCLUSÕES	67
6 TRABALHOS FUTUROS.....	69
REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

A quarta revolução industrial, ou Indústria 4.0, é um conceito desenvolvido pelo alemão Klaus Schwab, diretor e fundador do Fórum Econômico Mundial. Trata-se de uma expressão que engloba algumas tecnologias para automação e troca de dados e utiliza conceitos de sistemas ciber físicos, internet das coisas e computação em nuvem. Segundo Schwab, a industrialização atingiu uma fase que “transformará fundamentalmente a forma como vivemos, trabalhamos e nos relacionamos” (ORTEGA, 2019).

As principais tecnologias que permitem a fusão dos mundos físico, digital e biológico são a manufatura aditiva (AM), a inteligência artificial (IA), a internet das coisas (IoT), a biologia sintética (SynBio) e os sistemas ciber físicos (CPS). Sendo assim, a impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, é hoje um dos pilares da quarta revolução industrial (AGENDA BRASILEIRA PARA A INDÚSTRIA 4.0, 2017).

A evolução e importância da impressão 3D cresceu de forma acelerada nos últimos anos, e os seus diversos tipos estão cada vez mais inovadores e com menor custo, sendo assim, cresce em importância a necessidade de se conhecer de forma mais profunda a manufatura aditiva.

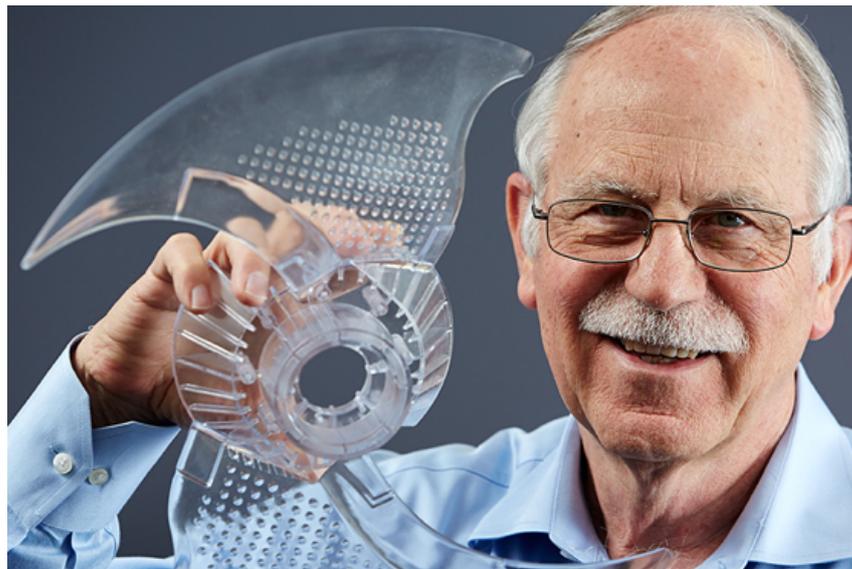
1.1 Tema

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, com sigla AM, do inglês *additive manufacturing*, é o processo pelo qual objetos físicos são criados pela deposição de materiais em camadas, com base em um modelo digital. Todos os processos de impressão 3D requerem o trabalho conjunto de *software*, *hardware* e materiais (IMPRESSÃO 3D, 2020). A tecnologia AM se tornou tão importante, que o impacto atinge diversas áreas humanas, e produz materiais para múltiplos setores, tais como construção, vestuário, odontologia, medicina, eletrônica, automotivo, robótica, militares, oceanografia, aeroespacial e outros (DIZON, 2018).

As primeiras tecnologias de impressão 3D foram criadas no final da década de 1980, e eram denominadas tecnologias de prototipagem rápida (RP). Neste período, os processos foram originalmente concebidos como um método rápido e

mais econômico para criar protótipos para o desenvolvimento de produtos dentro da indústria. O primeiro pedido de patente para a tecnologia RP foi apresentado por Hideo Kodama, no Japão, em maio de 1980, sendo negado na época, pois a especificação completa da patente não foi apresentada antes do prazo de um ano após o pedido. Em termos reais, no entanto, as origens da impressão 3D remontam a 1986, quando a primeira patente foi emitida para o aparelho de estereolitografia (SLA). Essa patente pertencia ao norte-americano Charles Hull, Figura 1, que inventou sua máquina de SLA em 1983, e é considerado ainda hoje como o “pai” da impressão 3D. Hull foi co-fundador da 3D Systems Corporation - uma das maiores organizações que operam no setor de impressão 3D (HISTORY OF 3D PRINTING, 2017).

Figura 1 – Charles Hull, vencedor do prêmio European Inventor Award 2014 na categoria países não europeus.



Fonte: European Patent Organisation (EPO) (2017).

A tecnologia de impressão 3D sofreu um salto evolutivo com a utilização de computadores, e ao mesmo tempo, o vencimento das patentes originais proporcionou uma grande disseminação por meio de entusiastas utilizando-se de plataformas livres (CABREIRA, 2018). Formou-se uma grande comunidade voltada à elaboração de sistemas de código aberto, o que proporcionou o surgimento de equipamentos comerciais e máquinas do tipo faça você mesmo (*Do It Yourself – DIY*) baseadas nesta tecnologia (SANTANA, 2018). Desenvolvimentos recentes

reduziram o custo da AM, expandindo assim suas aplicações em escolas, residências, bibliotecas e laboratórios (NGO, 2018).

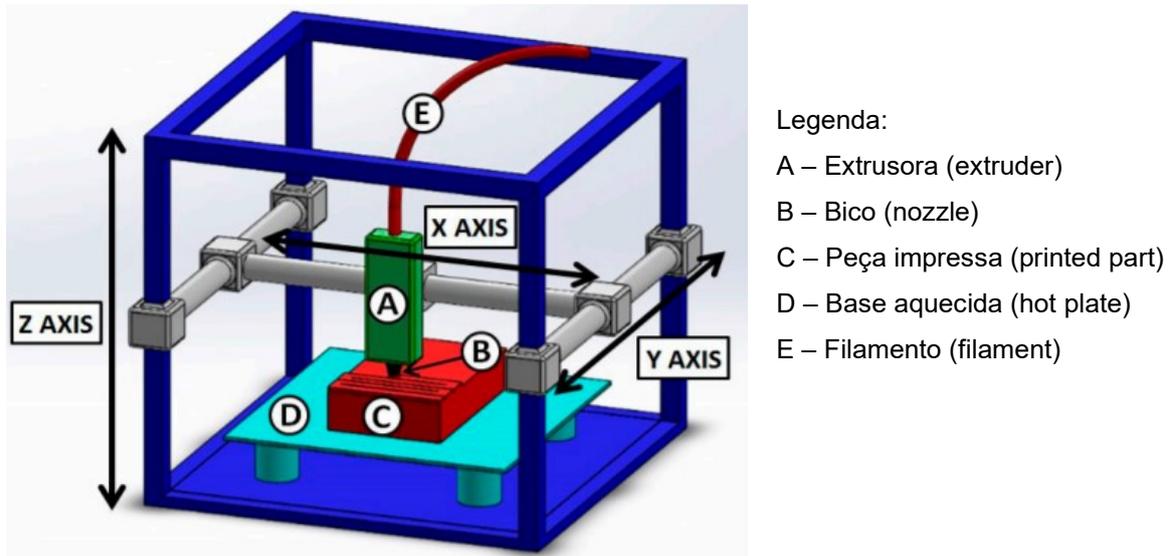
O tamanho que a tecnologia AM alcançou é enorme, visto que o consumo global de sistemas de impressão 3D, materiais de impressão, peças, software e serviços relacionados totalizou mais de 13 bilhões de dólares em 2016. Além disso, espera-se que os gastos mundiais em impressão 3D tenham uma taxa de crescimento anual de 22,3% nos próximos anos, e que ao final de 2020 se atinja 29 bilhões de dólares (DIZON, 2018).

1.2 Delimitação do Tema

Existem diversas formas de processamento por manufatura aditiva, porém o método mais utilizado é o conhecido como modelagem por fusão e deposição (FDM), ou também fabricação com filamento fundido (FFF), sendo este processo objeto de estudo neste trabalho. Além deste, podemos citar os seguintes processos: estereolitografia (SLA), processamento digital de luz (DLP), sinterização seletiva a laser (SLS), fusão seletiva a laser (SLM), fusão por feixe de elétrons (EBM), fabricação de objetos laminados (LOM), bem como impressão a jato de tinta, elaboração de contornos (*contour crafting*) e deposição direta de energia (DED) (SATHISH, 2018).

Em meio a todos estes processos, o mais popular é o FDM devido a sua simplicidade, pois se tratando de uma tecnologia de código aberto, a maioria das impressoras FDM comerciais apresentam tamanhos compactos, preços acessíveis e baixo custo de manutenção. O processo de FDM consiste na deposição de um polímero termoplástico fundido para formar o produto moldado por camadas podendo ser facilmente utilizado para diversas aplicações, desde as industriais até as de uso pessoal. Na Figura 2 podemos observar uma representação simples do processo FDM (AGOSTINI, 2018; CABREIRA, 2018).

Figura 2 – Representação esquemática de uma configuração típica de FDM.



Fonte: Adaptado de Mazzanti (2019).

Como polímero de alimentação no FDM, os principais tipos utilizados nesta categoria são os filamentos termoplásticos de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e poli(ácido láctico) (PLA), e mais recentemente, poli(tereftalato de etileno glicol (PETG), policarbonato (PC) e poliamida (PA) (SANTANA, 2018).

1.3 Problema

Devido a facilidade de acesso à tecnologia FDM, ao baixo custo e inúmeras possibilidades de configurações e personalização, a peça ou protótipo criado possui propriedades distintas em relação às peças obtidas por processos convencionais (extrusão, injeção, sopro, etc), produzidas com polímeros termoplásticos. No FDM, o protótipo adquire características mecânicas não isotrópicas, ou seja, mudam conforme a direção considerada, além da microestrutura do material dentro de cada camada ser diferente em comparação com os limites entre as camadas. A limitada quantidade de informações sobre as variáveis do processo acaba por restringir a sua utilização, principalmente em áreas onde exige maior controle na manufatura (CABREIRA, 2018; SANTANA, 2018).

Dependendo do material, cor, ou fornecedor do filamento, os parâmetros utilizados no processo podem ser diferentes, o que leva, na maior parte dos casos, os usuários a ajustar as configurações através do método de tentativa e erro. Muitas vezes os materiais não possuem folhas técnicas (*datasheets*), ou em alguns casos

fabricantes de impressoras 3D publicam dados sobre os materiais utilizados em suas máquinas, mas são informações “incompletas” (SANTANA, 2018).

Portanto, existe a real necessidade de se conhecer a influência que os parâmetros de impressão ocasionam no protótipo impresso, a fim de garantir melhores propriedades, assim como homogeneidade nas características, evitando o método da tentativa e erro, poupando assim matéria-prima e tempo, diminuindo por consequência o custo desta técnica.

Os principais parâmetros de processo que afetam as características do modelo impresso incluem os do tipo morfológico – temperatura de extrusão, temperatura da mesa, velocidade de deposição e espessura da camada – e os do tipo geométrico – grau de preenchimento, padrão de preenchimento e orientação de preenchimento (CABREIRA, 2018). Dito isto, selecionou-se apenas o padrão de preenchimento (infill pattern) como objeto de estudo, mantendo-se os outros parâmetros invariáveis.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do padrão de preenchimento nas propriedades mecânicas do objeto impresso por impressão 3D via FDM, utilizando filamento do termoplástico acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS).

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Obter, através da tecnologia de modelagem por fusão e deposição (FDM), corpos-de-prova de cada uma das seguintes configurações de preenchimento: *tri hexagon* (TH), *grid* (GR), *cubic* (CB), *triangle* (TR) e *gyroid* (GY);
- b) Realizar as análises de gravimetria e dimensional de cada corpo-de-prova, a fim de avaliar a qualidade das impressões 3D e identificar possíveis defeitos do processo;
- c) Realizar o ensaio de resistência à tração de cada amostra;

- d) Avaliar com o ensaio de microscopia ótica a região de rompimento de cada amostra;
- e) Realizar os testes de espectroscopia no infravermelho com transformada de *Fourier* (FTIR) e análise termogravimétrica (TGA) e proceder uma comparação entre as amostras.
- f) Determinar qual das geometrias utilizadas que apresenta melhores propriedades mecânicas.

1.5 Justificativa

A escolha do padrão de preenchimento (*infill pattern*) como objeto de estudo se deve ao menor número de publicações científicas desta temática, se comparadas aos outros parâmetros de processamento na impressão 3D via FDM. Como exemplo, uma busca pelo termo “FDM” no título de publicações, realizada na base de dados *Science Direct*, retornou um total de 20889 resultados. Quando a busca é realizada com os termos “FDM” e “*infill pattern*”, o resultado cai para 682 publicações. Quando a busca é pelos termos “FDM” e “*printing temperature*”, retornam 3232 resultados, expressivamente maior se comparado ao *infill pattern*. Soma-se a isto, o fato da dificuldade que o usuário de impressão 3D possui em optar por um padrão de preenchimento dentre os vários oferecidos pelos fabricantes, vindo este trabalho auxiliar nesta escolha.

Já a opção pelo polímero ABS para o desenvolvimento do estudo se deve ao fato que ele é a segunda resina mais utilizada nos processos de impressão 3D por FDM, sendo o PLA a primeira. Além disto, o ABS possui menor custo em relação aos outros materiais poliméricos utilizados, possibilitando assim um maior número de testes, evitando gastos excessivos com a matéria-prima.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Impressão 3D

As técnicas de impressão 3D permitem a fabricação rápida de objetos sólidos, a partir de um arquivo digital. De forma oposta aos processos tradicionais de manufatura subtrativa, que removem material de um bloco, a impressão 3D constrói um objeto do zero, camada por camada, a partir de um modelo tridimensional (BARTOLOMÉ, 2017). O comitê técnico do órgão norte-americano de normalização, *American Society for Testing and Materials* (ASTM), através da norma ASTM F42, responsável por supervisionar o desenvolvimento de padrões de manufatura aditiva, define a tecnologia como *“Um processo de unir materiais para criar objetos a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada sobre camada, ao contrário de fabricação por metodologias subtrativas”* (FORD, 2016).

Estes processos são ideais para construir modelos exclusivos e peças de geometrias complexas. Hoje, a impressão 3D se tornou uma técnica incrivelmente popular devido à sua simplicidade e favorável relação custo/desempenho (BARTOLOMÉ, 2017). De um modo geral, os processos possuem como características fundamentais a redução do número de etapas e processos na fabricação de um objeto, a economia de insumos e a possibilidade de combinações inéditas de geometria e materiais. Para a produção de uma única peça de geometria complexa por meios convencionais, pode ser necessário o emprego de diversas máquinas, ferramental específico e processos de usinagem e acabamento - tais como torneamento, fresamento, eletroerosão, retificação - até o produto final, enquanto que uma máquina de manufatura aditiva pode produzir a peça em uma única etapa ou em um número menor de etapas. Além disso, uma vez que a peça é produzida por deposição de material, camada por camada, haveria menor desperdício de materiais (RODRIGUES, 2017).

Além do menor uso de matéria-prima, a característica da impressão 3D em iniciar a produção com baixo custo e menor tempo de *set-up* fornece a manufatura uma espécie de ponte entre o tempo do lançamento do produto e a capacidade total de produção de fábricas, aumentando assim a competitividade dentro da indústria. Em um modelo tradicional de desenvolvimento do produto, este é planejado, desenhado, dando origem a modelos e protótipos, para posteriormente serem

fabricadas as ferramentarias necessárias à sua produção e lançados ao mercado, tendo um intervalo entre seu desenvolvimento e produção. Esta defasagem de tempo pode ser facilmente diminuída ou até mesmo eliminada pelas empresas utilizando tecnologias de impressão 3D até que suas linhas de produção estejam readequadas. Portanto, o encurtamento do tempo em projetos também se configura como uma grande vantagem (CABREIRA, 2018; FORD, 2016).

2.2 Etapas da impressão 3D

A impressão 3D refere-se a um grupo de tecnologias que criam objetos físicos diretamente a partir de modelos tridimensionais auxiliados por computador. Utiliza-se de materiais líquidos, folhas, filamentos ou materiais em pó, camada por camada, para formar componentes com pouco ou nenhum processamento posterior (REDDY, 2016).

Os modelos tridimensionais são criados em programas digitais CAD (*computer aided design*), ou obtidos por tomografia computadorizada (TC), ressonância magnética (RM) e scanners 3D, onde os dados obtidos são convertidos para o formato “. STL” (*standard triangle language*). O *software* de fatiamento, também conhecido como *licer*, faz o fatiamento do arquivo e gera o código G (*G-code*), que transmite à impressora informações como o caminho a percorrer e os parâmetros de impressão (AGOSTINI, 2018).

Devido à fabricação baseada em camadas, em alguns casos as peças fabricadas em AM requerem pós-condicionamento, e como resultado dessas etapas adicionais, o processo pode ser dividido, de maneira geral, em oito etapas distintas (REDDY, 2016; RODRIGUES, 2017):

- a) Etapas gerais para manufatura aditiva assistida por computador: A AM começa no projeto de um modelo com qualquer *software* CAD profissional. O modelo de saída tem que ser uma forma tridimensional ou representação de superfície da parte real. Equipamentos de digitalização e engenharia reversa também podem ser usados para gerar este modelo;
- b) Conversão para o tipo de arquivo AM aceito: STL é o tipo de arquivo padrão aceito pelas máquinas de AM. Uma vez que um modelo CAD é criado, ele deve ser salvo no formato STL através do *software* CAD. O

arquivo STL traduz a superfície no modelo CAD para uma malha de triângulos. O número de triângulos controla a precisão das superfícies arredondadas. O *software* CAD permite ao usuário controlar o número e o tamanho desses triângulos;

- c) Transferência do arquivo STL para a máquina AM: O arquivo STL deve ser transferido para a máquina. O arquivo deve ser verificado quanto ao seu tamanho correto e orientação. Além disso, se houver várias partes, elas deverão ser posicionadas corretamente para que não se sobreponham a outras partes;
- d) Configuração da máquina AM: A configuração da máquina é um passo crucial no processo. Os parâmetros devem ser configurados corretamente para atingir as tolerâncias da peça fabricada. A espessura da camada, a orientação, a energia fornecida, o tempo e a velocidade dos rolos podem ser nomeados como esses parâmetros;
- e) Fase de construção: Esta é a etapa mais automatizada do processo, realizado pela máquina. Monitoramento parcial será necessário para garantir que não ocorram erros e a máquina não fique sem material;
- f) Remoção: Nesta fase, a máquina termina de produzir a peça e o usuário deve retirá-la. O usuário deve seguir protocolos de segurança e procedimentos adequados de desligamento. Isso garantirá a segurança do usuário e da máquina;
- g) Pós-processamento de peças AM: Uma vez que as peças são produzidas, elas podem precisar de algum tratamento adicional, como cura, sinterização e limpeza. Nesta etapa, o produto pode necessitar de cuidado adicional devido a fragilidade, e deve ser manuseado com cautela.
- h) O material impresso encontra-se pronto para a aplicação final.

A Figura 3 a seguir apresenta um diagrama esquemático resumido do processo de manufatura aditiva.

Figura 3 – Representação esquemática do processo de manufatura aditiva (impressão 3D).



Fonte: Adaptado de Medellín-Castillo (2019).

2.3 Exemplos de impressão 3D

Existem diversos processos de impressão 3D, e estes métodos apresentam diferenças nas suas características e materiais utilizados, como apresentado na Tabela 1, adaptado de Reddy (2016 p. 4). Apesar disso, todos os métodos possuem ligação com a ideia original, tendo a capacidade de transformar diretamente modelos virtuais complexos em objetos finais.

Tabela 1 - As sete categorias de processos AM da ASTM F42.

Tipo de Processo	Breve Descrição	Tecnologia Relacionada	Empresas	Materiais
Fusão de leito em pó	Energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó.	Fusão por feixe de elétrons (EBM), sinterização seletiva a laser (SLS), sinterização seletiva por calor (SHS) e sinterização direta de metal a laser (DMLS)	EOS (Alemanha), 3D Systems (EUA), Arcam (Suécia)	Metais, polímeros, cerâmicas.
Deposição direta de energia	Energia térmica concentrada é usada para fundir materiais enquanto o mesmo é depositado.	Deposição de metal a laser (LMD)	Optomec (EUA), POM (EUA)	Metais
Extrusão de material	O material é seletivamente dispensado através de um bocal ou orifício.	Modelagem por fusão e deposição (FDM)	Stratasys (Israel), Bits from Bytes (Inglaterra)	Polímeros
Fotopolimerização em cuba	Fotopolímero líquido em um tanque é seletivamente curado através de polimerização ativada por luz.	Estereolitografia (SLA), processamento digital de luz (DLP)	-	Fotopolímeros
Jateamento de agente de ligação	Um agente de ligação líquido é depositado seletivamente para juntar materiais em pó.	Impressão sobre Leito de partículas e jato de tinta (PBIH), Impressão 3D baseada em gesso	3D Systems (EUA), Ex One (EUA)	Polímeros, metais, areia de fundição.
Jateamento de material	Gotículas do material é seletivamente depositada.	Modelagem por jatos múltiplos (MJM)	Objet (Israel), 3DSystems (EUA)	Polímeros, ceras.
Laminação de folha	Folhas de material são colados para formar um objeto.	Fabricação de objeto laminado (LOM), consolidação ultrassônica (UC)	Fabrisonic (EUA), Mcor (Irlanda)	Papel, metais.

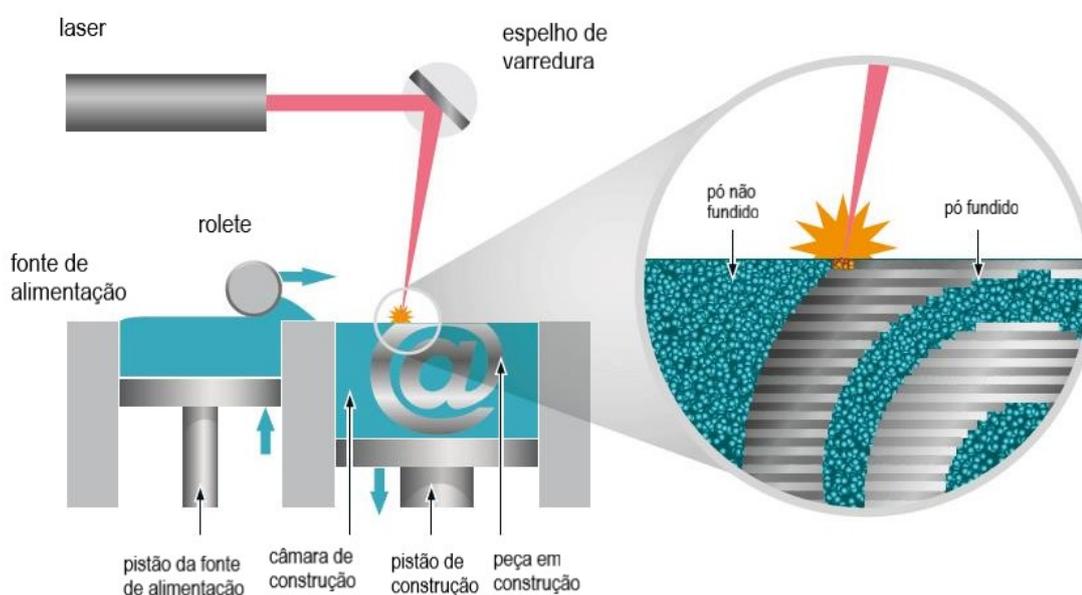
Fonte: Adaptado de Reddy (2016).

Detalhes dos principais métodos de impressão 3D são apresentados a seguir:

- Fusão do leito em pó (*powder bed fusion*)

Os processos de fusão do leito em pó, aos quais fazem parte as tecnologias EBM, SLS, SHS, DMLS, consistem em camadas muito finas de pós, que são espalhados e compactados em uma plataforma. Os pós em cada camada são fundidos com um feixe de laser ou elétrons, e em alguns casos usa-se um material ligante. Camadas subsequentes de pós são laminadas sobre camadas anteriores e fundidos até que a parte 3D final seja construída, conforme Figura 4.

Figura 4 – Representação do processo de fusão do leito em pó, com base em um feixe de laser que funde o material.



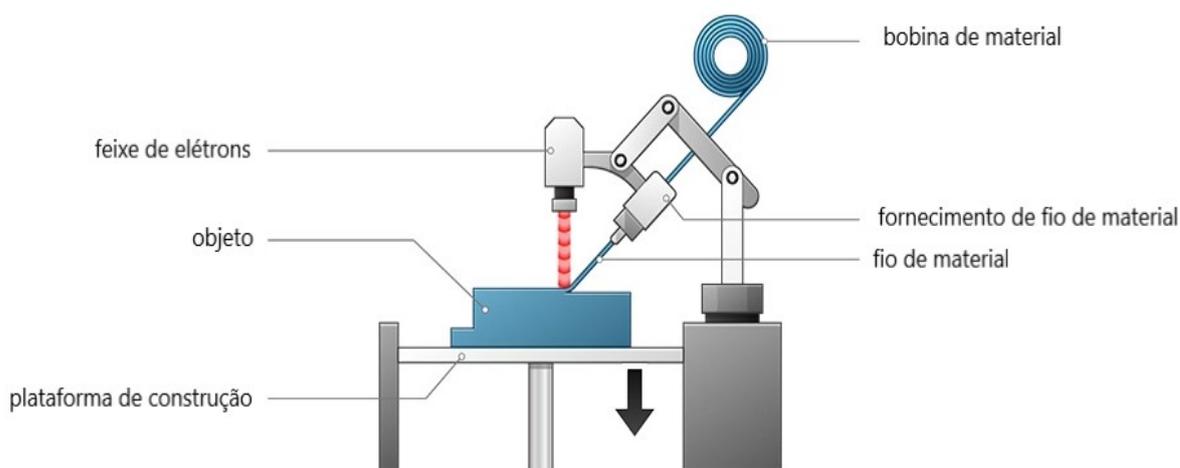
Fonte: Adaptado de Malvern Panalytical (2020).

Variantes deste processo utilizam não somente pós metálicos, mas também cerâmicos, polímeros e vidros. O excesso de pó é então removido por um vácuo e, se necessário, pode ocorrer processamento adicional e detalhes como revestimento, sinterização ou infiltração são realizados. A distribuição do tamanho do pó e empacotamento, que determinam a densidade do impresso, são os fatores mais cruciais para a eficácia deste método. As principais vantagens destes processos são alta resolução e qualidade na impressão, tornando-os adequados para produzir estruturas complexas, no entanto, custos altos, baixa velocidade e porosidade ainda dificultam a sua utilização (CABREIRA, 2018; NGO, 2018; REDDY, 2016).

- Deposição direta de energia

A deposição direta de energia (DED) tem sido usada para a fabricação de superligas metálicas de alto desempenho. Utiliza uma fonte de energia (laser ou feixe de elétrons) que é diretamente focada em uma pequena região do substrato e também é usada para fundir o material de alimentação (pó ou arame) simultaneamente. Uma típica máquina DED consiste em um bocal montado em um braço multi-eixo, que deposita material derretido na superfície especificada, onde se solidifica. Na Figura 5 podemos observar um diagrama esquemático do processo DED alimentado por arame, com fonte de elétrons como energia de fusão.

Figura 5 – Deposição direta de energia (DED).



Fonte: Adaptado de 3Dnatives (2019).

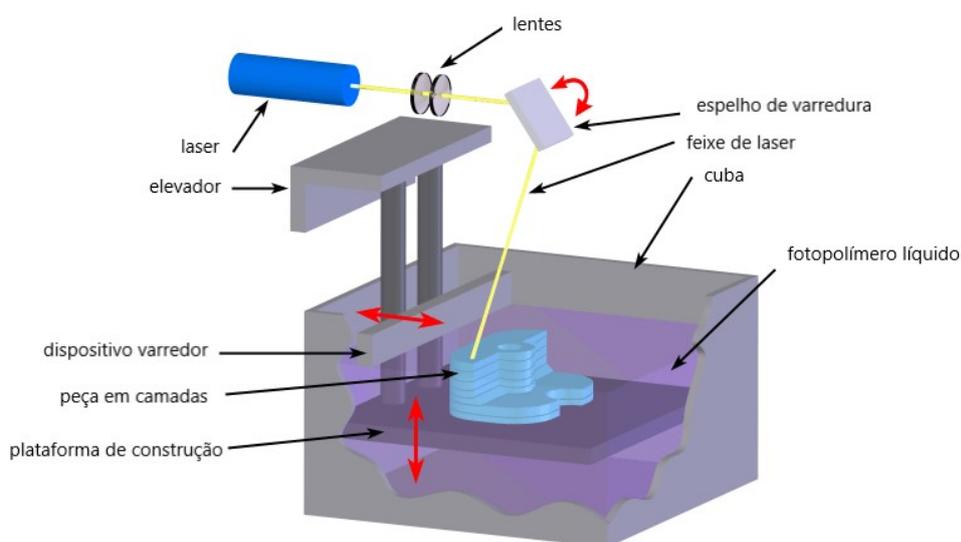
O processo é similar em princípio à extrusão do material, mas o bico pode se mover em múltiplas direções e não é fixado a um eixo específico. A diferença entre os métodos DED e fusão seletiva a laser (SLM) é que nenhum leito em pó é usado em DED e a matéria-prima é fundida antes da deposição, camada por camada, similar a FDM, mas com uma quantidade extremamente elevada de energia para fundir metais. Portanto, pode ser útil para o preenchimento de trincas em peças fabricadas para as quais a aplicação do método do leito em pó é limitada. Além disso, o DED pode ser facilmente combinado com processos convencionais como usinagem para concluir o acabamento do produto. Esta técnica é comumente usada com titânio, Inconel, aço inoxidável, alumínio e ligas relacionadas para aplicações

aeroespaciais. Em geral, o DED é caracterizado por altas velocidades e grandes coberturas de trabalho. No entanto, tem uma precisão menor, menor qualidade de superfície e pode fabricar peças menos complexas em comparação com SLS ou SLM. Portanto, o DED é comumente usado para componentes grandes com baixa complexidade e também para manutenção e reparo de componentes (NGO, 2018).

- Estereolitografia (SLA)

O processo SLA foi a primeira tecnologia AM comercializada usando a tecnologia laser para alcançar a fotopolimerização de resina líquida, na qual ocorre a cura quando exposta ao laser ou luz ultravioleta, a fim de criar objetos poliméricos tridimensionais. Após a solidificação da camada, a plataforma é movimentada de forma a restituir a resina para a próxima camada a ser processada (Figura 6).

Figura 6 – Representação do processo de estereolitografia.

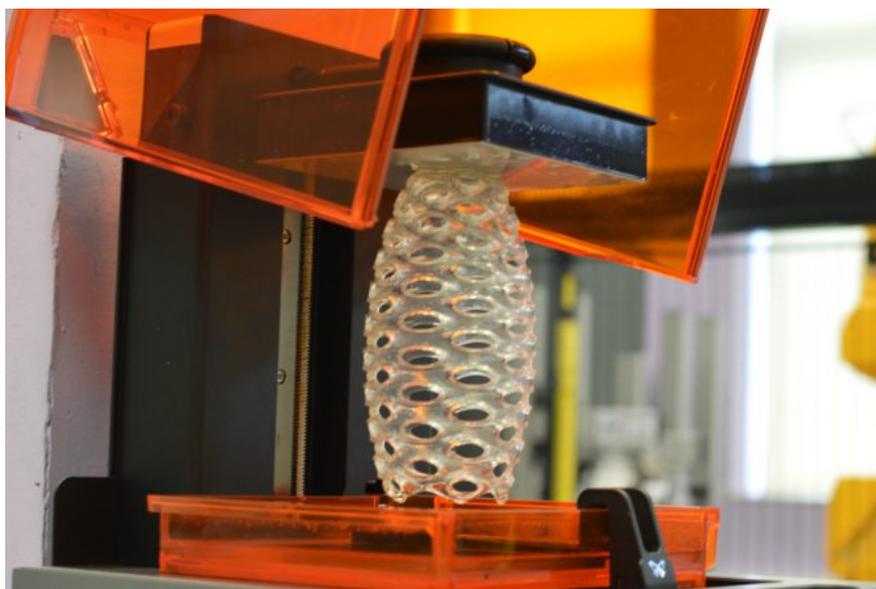


Fonte: Adaptado de CustomPartNet (2020).

A resolução da técnica é limitada apenas pelo modelo de impressora e permite a criação de geometrias complexas em alta resolução, mas requer suportes para as peças, períodos de pós-cura e é limitada a apenas alguns tipos de materiais. As principais vantagens do processo SLA são a resistência à temperatura e a criação de estruturas complexas com paredes muito finas, como no exemplo da Figura 7. A principal desvantagem é a estrutura de suporte necessária para fabricar

objetos que consomem material adicional e prolongam o tempo de produção. No pós-processamento, as peças devem ser removidas e qualquer excesso de resina totalmente drenado, cuidados devem ser tomados para não contaminar a resina e precauções de segurança devem ser adotadas (CABREIRA, 2018; NGO, 2018).

Figura 7 – Peça obtida por SLA.



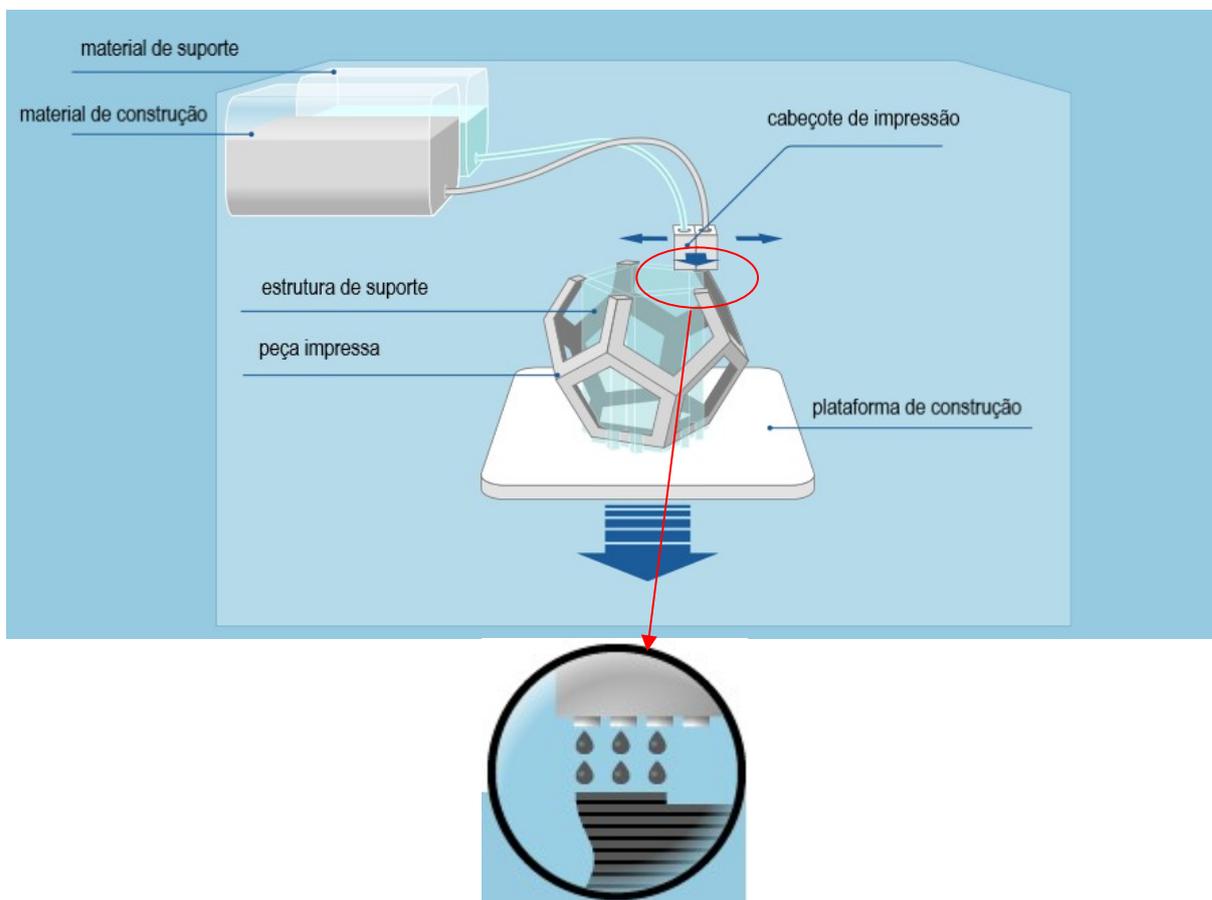
Fonte: Re-FREAM (2020).

- Impressão a jato de tinta (*Inkjet printing*) e elaboração de contornos (*contour crafting*)

A impressão a jato de tinta é um dos principais métodos para a fabricação aditiva de cerâmica. Nele, uma suspensão cerâmica estável é bombeada e depositada na forma de gotículas através do bocal de injeção no substrato. As gotículas formam então um padrão contínuo que se solidifica com força suficiente para manter camadas subsequentes de materiais impressos, conforme podemos observar na Figura 8. Esse método é rápido e eficiente, o que aumenta a flexibilidade para projetar e imprimir estruturas complexas. Dois tipos principais de tintas cerâmicas são as tintas à base de cera e as suspensões líquidas. Tintas à base de cera são derretidas e depositadas em um substrato frio para solidificar. Por outro lado, as suspensões líquidas são solidificadas por evaporação de líquido. A distribuição granulométrica das cerâmicas, a viscosidade da tinta e o teor de sólidos, assim como a taxa de extrusão, o tamanho do bico e a velocidade de impressão, são fatores que determinam a qualidade das peças impressas a jato de tinta. Manter

a molhabilidade, a resolução grosseira e a falta de aderência entre camadas são os principais inconvenientes deste método.

Figura 8 – Representação do processo de Impressão a jato de tinta (*Inkjet printing*), também conhecido como *material jetting* (MJ) ou *drop on demand* (DOD).



Fonte: Adaptado de Additively (2020).

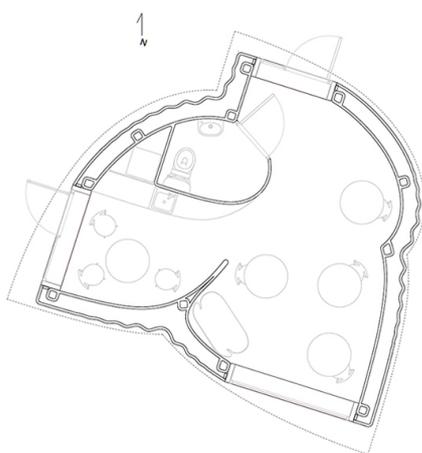
Uma tecnologia semelhante à impressão a jato de tinta, chamada de elaboração de contornos (*contour crafting*), é o principal método de fabricação aditiva de grandes estruturas de edifícios. Este método é capaz de extrudar pasta de concreto ou solo usando bocais maiores e alta pressão. A Figura 9 demonstra o bocal de impressão extrudando concreto para formar as paredes da construção. Na Figura 10 vemos o primeiro edifício impresso em 3D da Europa, chamado “BOD”, que é a abreviatura de “*Building on Demand*”. Ou seja, uma construção realizada sob medida. (CABREIRA, 2018; NGO, 2018; REDDY, 2016).

Figura 9 – Processo *contour crafting*.



Fonte: COBOD (2020).

Figura 10 – O “BOD” é um pequeno escritório impresso em 3D com menos de 50 metros quadrados.

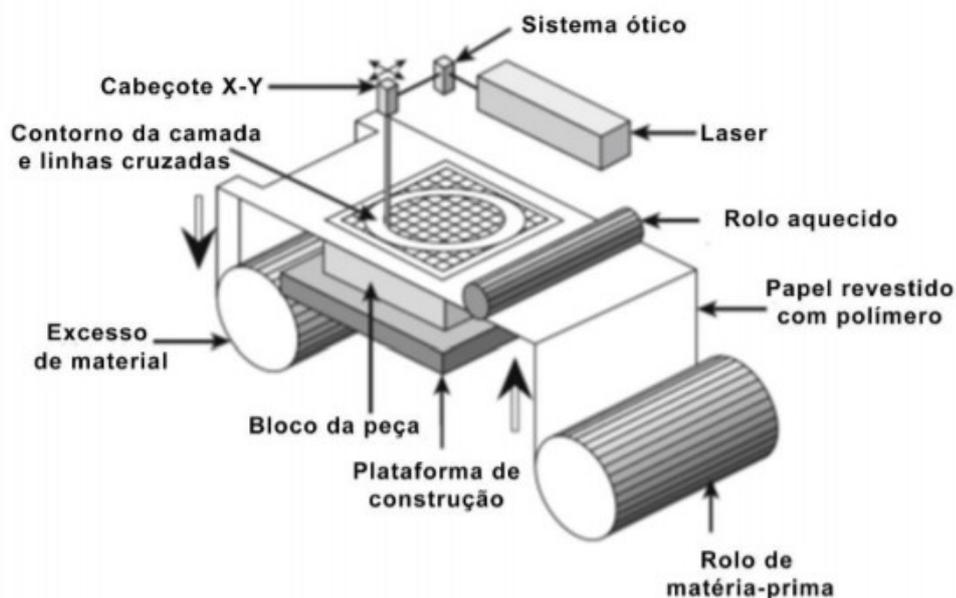


Fonte: COBOD (2020).

- Fabricação de objetos laminados (LOM)

A fabricação de objetos laminados é um dos primeiros métodos de manufatura aditiva comercialmente disponíveis, que se baseia no corte de camada por camada e na laminação de folhas de materiais. Camadas sucessivas são cortadas com precisão usando um cortador mecânico ou laser e são então ligadas, conforme podemos observar no esquema a seguir (Figura 11).

Figura 11 – Representação da tecnologia LOM.



Fonte: Adaptado de Netto (2015).

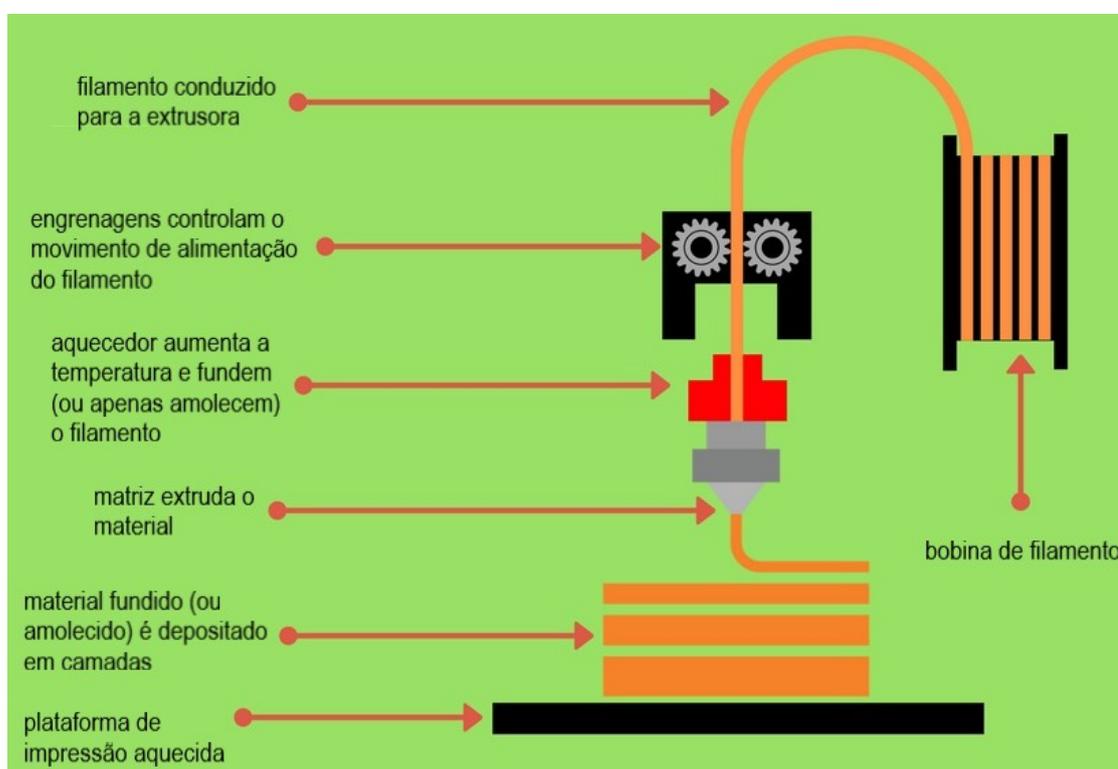
Os processos de laminação de chapas incluem manufatura aditiva ultrassônica (UAM) e manufatura de objetos laminados (LOM). O processo de fabricação aditiva ultrassônica usa folhas ou fitas de metal, que são unidas usando soldagem ultrassônica. Este processo requer uma usinagem adicional para remoção do metal não ligado durante o processo de soldagem. A fabricação de objetos laminados utiliza uma abordagem camada por camada semelhante, mas usa compósitos, papel ou polímero como material e adesivo em vez de soldagem. Objetos laminados são frequentemente usados para impressão de modelos estéticos e não são adequados para uso estrutural. A UAM utiliza metais como alumínio, cobre, aço inoxidável e titânio, os quais são soldados a baixa temperatura e permite que geometrias internas sejam criadas. O processo pode unir diferentes materiais e requer relativamente pouca energia, pois o metal não é fundido (NGO, 2018; REDDY, 2016).

2.3 Modelagem por fusão e deposição (FDM)

O processo de modelagem por fusão e deposição, também conhecido como fabricação com filamento fundido (FFF), é um dos mais simples e baratos comercialmente. Scott Crump, o cofundador da Stratasys, patenteou o processo FDM em 1989. A patente da tecnologia FDM da Stratasys expirou por volta de 2005 e, posteriormente, dois projetos de impressora 3D de código aberto foram iniciados: o *RepRap Movement* e *Fab@Home*. Ambos os projetos tinham o objetivo de desenvolver e compartilhar designs para uma impressora 3D que fosse acessível a uma ampla gama de usuários, consolidando e difundido esta tecnologia no mundo (SU, 2018).

Nesta tecnologia AM, baseada no processo de extrusão, o material é fundido em um cabeçote, que possui uma matriz com orifício de diâmetro variado (usualmente de 0,1 a 0,5 mm), que se move depositando o material em um percurso definido, formando o desenho de cada camada do objeto (CABREIRA, 2018). Na Figura 12 é apresentada uma ilustração representativa do processo FDM (FFF).

Figura 12 – Ilustração do processo FDM (FFF).

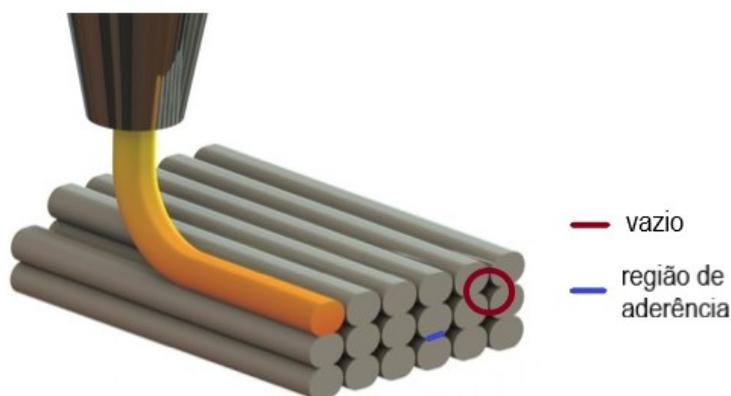


Fonte: Adaptado de Manufactur3D (2020).

De acordo com a arquitetura da impressora e do fabricante, a movimentação nos três eixos pode ser realizada apenas pelo cabeçote, ou em outros casos, o cabeçote se movimenta nos eixos x e y, enquanto a plataforma se movimenta no eixo vertical (z). Em geral, matrizes de menor orifício melhoram a qualidade dimensional da peça, mas aumentam o tempo de impressão (CABREIRA, 2018; POPESCU, 2018).

O filamento é empurrado de acordo com o controle da máquina pelo motor de passo (na ordem de micrômetros), de forma a alimentar o cabeçote, e depositar o material no local específico e de maneira adequada. O material depositado se adere diretamente à camada anterior. Como a deposição no FDM é realizado em pequenas linhas, ocorre a formação de vazios, que são ausentes em processos convencionais como extrusão e injeção, mesmo quando o grau de preenchimento da peça é ajustado para 100%. Além da presença destes vazios (*air gap*), existe a influência da aderência entre as linhas de deposição, que pode não ser suficiente, ocasionando descolamento entre camadas. Na Figura 13 podemos observar os vazios e os pontos de aderência (CABREIRA, 2018).

Figura 13 – Linhas de deposição do processo FDM (FFF).



Fonte: Adaptado de 3D Applications (2018).

Este processo pode imprimir geometrias complexas, mas de menor acabamento e com menor velocidade quando comparada ao processo SLA. Uma variedade cada vez maior de termoplásticos vem sendo utilizados no processo, além dos usuais PLA e ABS, estão sendo utilizados e estudados PET (Politereftalato de etileno), PETG (tereftalato de etileno glicol), PA (poliamida), PP (polipropileno), PC (policarbonato), TPU (poliuretano termoplástico), HIPS (poliestireno de alto impacto),

PVA (poliacetato de vinila) e PMMA (polimetilmetacrilato) (DIZON, 2018; CABREIRA, 2018).

A adição de fibras reforçantes pode melhorar as propriedades mecânicas dos polímeros e é um avanço promissor na impressão 3D. Recentemente, os pesquisadores descobriram que é um desafio desenvolver um reforço de fibra contínua para melhorar as propriedades mecânicas de compósitos de polímero impressos em 3D. Outros materiais emergentes para o processo FDM são nanocompósitos, que são capazes de melhorar as propriedades mecânicas e elétricas dos materiais impressos (NGO, 2018)

2.4 Parâmetros de impressão no processo FDM/FFF

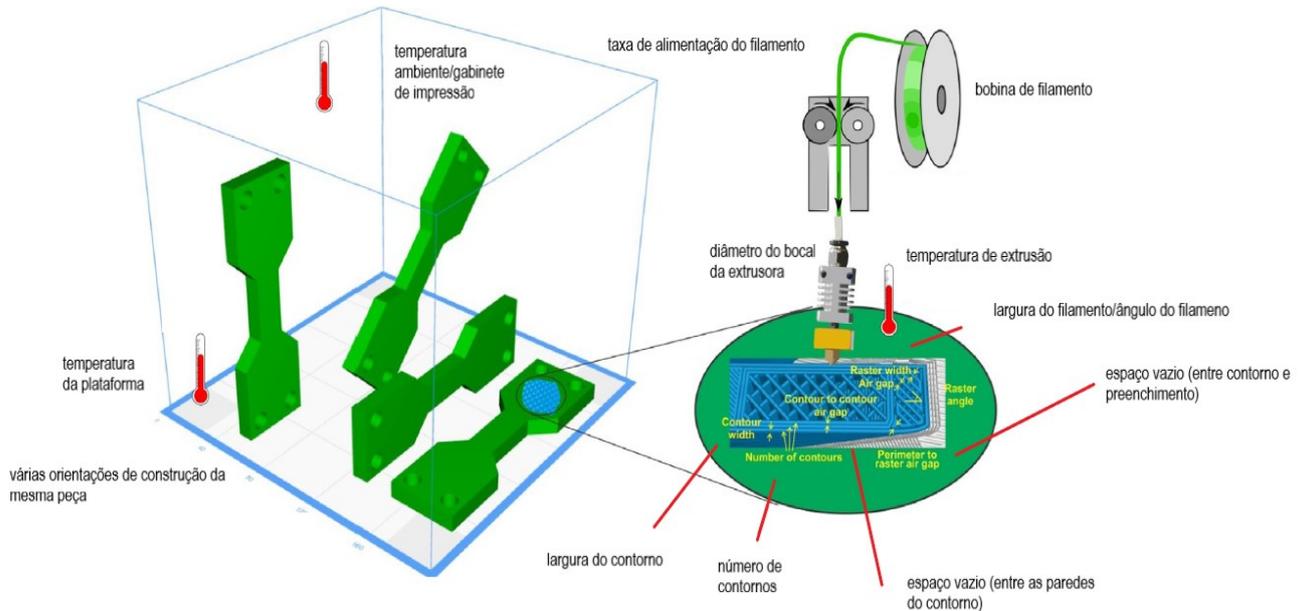
No processo FDM/FFF, os produtos obtidos podem ser caracterizados por índices técnicos, como a resistência à tração e precisão dimensional, ou por índices econômicos, como tempo de fabricação e quantidade de material de construção utilizados. Tais índices são influenciados pelos parâmetros de processo, ou mais especificamente um conjunto deles, os quais podem ser controlados direta ou indiretamente pelo usuário do processo. Neste sentido, a qualidade final do produto impresso é diretamente ligada aos parâmetros de impressão (SANTANA, 2015).

Os parâmetros do processo FDM podem ser categorizados da seguinte maneira:

- Parâmetros de fatiamento - espessura/altura da camada, diâmetro do bico de impressão, fluxo de deposição, velocidade de impressão, grau de preenchimento, padrão de preenchimento, largura do filamento, ângulo do filamento, espaços vazios (entre filamentos, entre contorno e filamento), número de paredes do contorno e largura do contorno;
- Orientação de construção - geralmente os espécimes impressos são orientados horizontalmente, verticalmente ou lateralmente, mas outras orientações também podem ser usadas;
- Condições de temperatura - temperatura ambiente (ou do gabinete da impressora 3D), temperatura de extrusão e temperatura da plataforma (POPESCU, 2018)

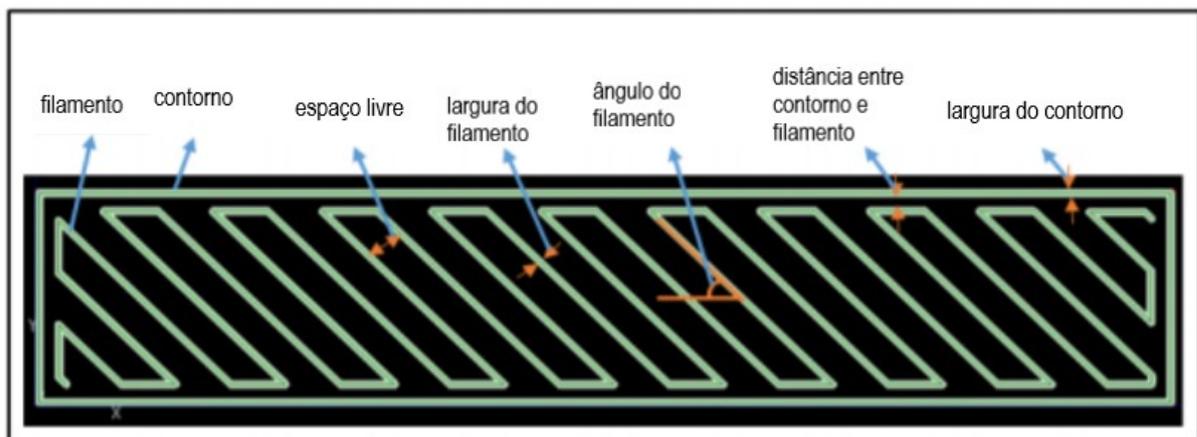
Na Figura 14, podemos visualizar uma ilustração indicando os parâmetros de impressão do processo FDM. Na Figura 15, são detalhados os parâmetros diretamente na peça impressa.

Figura 14 – Ilustração geral dos parâmetros do processo FDM.



Fonte: Adaptado de Popescu (2018).

Figura 15 – Ilustração dos parâmetros do processo FDM visualizados diretamente no objeto impresso.



Fonte: Adaptado de Motaparti (2016).

Alguns parâmetros ilustrados nas Figuras 14 e 15 são brevemente descritos a seguir (SANTANA, 2015):

- Orientação de construção: orientação do objeto na plataforma, em relação aos eixos x, y e z, onde x e y são considerados paralelos à plataforma de construção, e z é o eixo ao longo da direção de construção da peça;
- Espessura/altura da camada: reconhecida como altura da camada, medida ao longo da direção z, depositada a partir do bico extrusor.
- Largura do filamento/largura de varredura (raster width, road width): caracteriza-se pela largura utilizada no preenchimento da parte interna da fatia delimitada pelo contorno. Relacionada ao tamanho do bico, o usuário pode selecionar a largura de varredura dentro de uma faixa recomendada. A variação da espessura de camada teria muito provavelmente o mesmo efeito da variação da largura dos filamentos depositados.
- Largura do contorno: define a largura do perímetro (contorno) que delimita a geometria da fatia;
- Número de paredes de contorno: número de perímetros construídos em torno do objeto;
- Ângulo do filamento (raster angle): é a direção em que as varreduras se encontram em relação ao eixo x da plataforma de construção;
- Espaços vazios (entre filamentos): distância entre dois filamentos adjacentes na mesma camada. Por padrão este valor é zero, o que significa que os filamentos irão apenas se tocar;
- Espaços vazios (entre contorno e filamento): controla a distância entre os filamentos do contorno externo e os de preenchimento interno da peça. Seu valor padrão é zero, sendo assim eles se tangenciam.

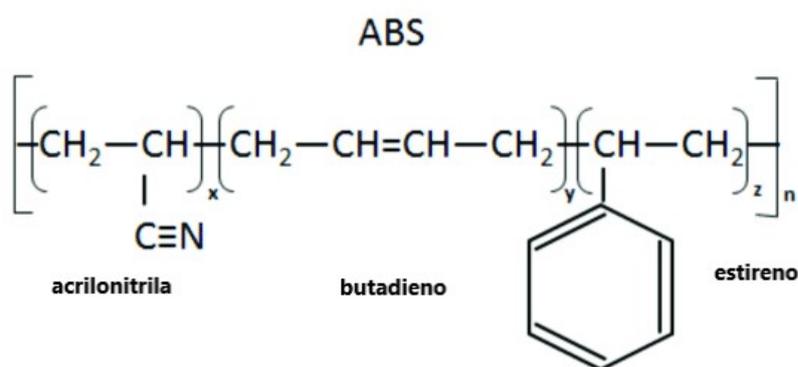
Além dos parâmetros descritos acima, as temperaturas de extrusão e do gabinete de impressão também se apresentam como importantes fatores no processo FDM, sendo que a temperatura de extrusão é ajustada de acordo com as propriedades reológicas (por exemplo, a dependência da viscosidade pela temperatura) e com a temperatura de fusão do material termoplástico utilizado no processo. O diâmetro do bico de impressão é um fator constante para um determinado tipo de impressora, mas muitos sistemas baseados em extrusão permitem a troca de bicos (SANTANA, 2015).

2.5 ABS

Polímero é uma cadeia de macromoléculas formadas por dezenas de milhares de pequenas unidades de repetição (meros), unidas entre si através de ligação covalente. Dependendo do tipo do monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, poderemos dividir os polímeros em três grandes classes: plásticos, borrachas e fibras (CANEVAROLO, 2002).

Um polímero é preparado conectando-se várias unidades de repetição de (monômeros), formando uma cadeia extremamente longa, sendo que as propriedades do polímero final são determinadas pelas espécies iniciais. Quando apenas uma espécie de monômero é polimerizada, o polímero é classificado como homopolímero, quando se utilizam duas ou mais espécies o material fica conhecido como copolímero, e em especial, o polímero usado no presente trabalho, ABS, é classificado como um terpolímero, pois apresenta três meros distintos em sua composição, e pertence à família dos plásticos. As iniciais ABS são oriundas dos monômeros *acrylonitrile butadiene styrene*, ou em português, acrilonitrila-butadieno-estireno, cuja estrutura molecular pode ser vista na Figura 16 (CANEVAROLO, 2002; HARPER, 2002).

Figura 16 – Estrutura molecular do ABS.



Fonte: Adaptado de Turku (2018, p. 5).

Para o ABS, existe uma grande flexibilidade na adaptação das suas propriedades, variando apenas a proporção dos três monômeros. O componente da acrilonitrila (15% a 35%) contribui com resistência ao calor, força e resistência química, enquanto o butadieno (5% a 30%), componente elastomérico, confere

maior resistência ao impacto, tenacidade, retenção de propriedade a baixa temperatura e flexibilidade, e por fim o estireno (40% a 60%), que contribui com rigidez, acabamento brilhante e facilidade de processamento. É também um polímero considerado amorfo, caracterizado por um arranjo molecular desordenado, não apresentando temperatura de fusão definida, apresentando apenas temperatura de transição vítrea (T_g), em aproximadamente 100°C (HARPER, 2002; LACHNIT, 2018).

O copolímero ABS é facilmente processável por diferentes métodos, incluindo moldagem por injeção, extrusão, termoformação, compressão e sopro. Combinado a isso, possui um custo-benefício muito interessante (relação custo/propriedades mecânicas), resultando assim em larga escala de utilização. Estima-se que seu uso no mundo é apenas superado pelos termoplásticos “*commodities*” (polietileno, polipropileno, poliestireno e policloreto de vinila). Devido a boa relação custo-benefício, e a facilidade de adição de retardantes de chama na sua composição, o ABS é comumente empregado em aplicações automotivas, carcaças de refrigeradores e eletrodomésticos em geral, brinquedos, rádios, gabinetes de computador, telefones, gabinetes de televisão e componentes de calçado (HARPER, 2002; LACHNIT, 2018).

Sendo assim, pela flexibilidade na adaptação de suas propriedades e ótimo custo-benefício, o filamento de ABS é um dos polímeros mais utilizados na impressão 3D. As peças impressas com este material, por apresentarem baixa dureza superficial, podem ser lixadas, coladas e pintadas, facilitando o pós-processamento, e estão disponíveis em diversas cores (Figura 17) (All3DP, 2016; HARPER, 2002). A modificação da superfície do ABS permitiu então, seu uso potencial na indústria de dispositivos médicos, onde não havia sido antes usado (PICARD, 2020).

Figura 17 – Filamentos de ABS para impressão 3D, fabricados em diversas colorações.



Fonte: All3DP (2016).

Apesar das diversas vantagens, o ABS apresenta algumas desvantagens no processo de impressão 3D, tais como a necessidade de um melhor gerenciamento de temperatura de impressão, necessitando um controle de resfriamento para evitar problemas de empenamento, descolamento entre camadas e aparecimento de trincas, e também, a liberação de gases com mau odor durante o processo, que são mitigados com uso de gabinete com ventilação forçada (All3DP, 2016; HARPER, 2002).

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 Materiais

Na impressão dos corpos de prova foi utilizado um filamento em forma de bobina, do terpolímero ABS, na cor branca, com diâmetro de 1,75 mm +/- 3 % (Figura 18), fornecido pela empresa F3DBR Comércio de artigos para impressão 3D Ltda.

Figura 18 – Filamento de ABS utilizado no trabalho.



Fonte: Registrada pela autora.

As propriedades fornecidas pela empresa estão relacionadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades do filamento de ABS.

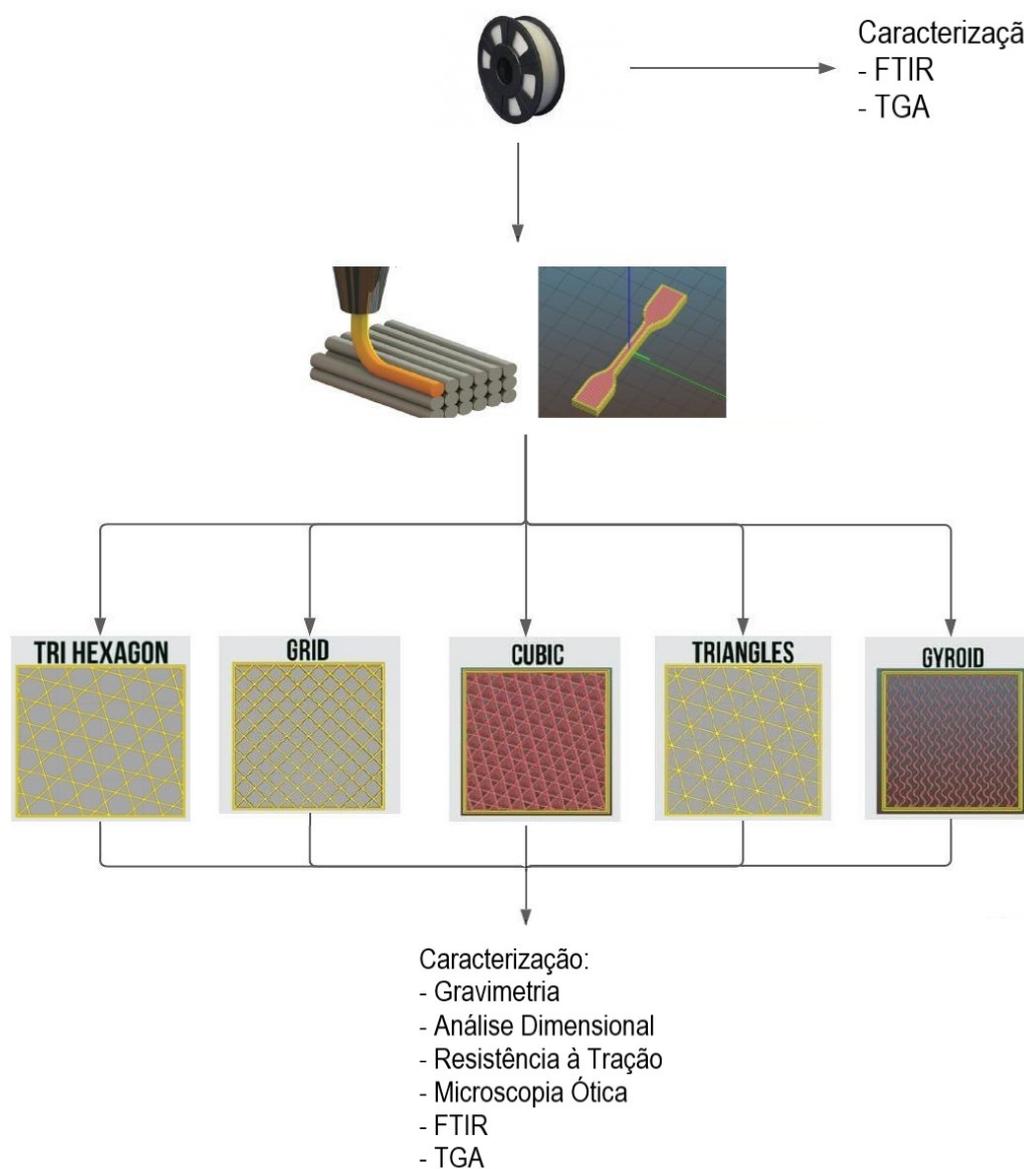
Propriedade	Valor	Unidade	Método/Norma
Densidade	1,04	g/cm ³	ASTM D792
Índice de fluidez	>45	g/10 min, (220°C/10 kg)	ASTM D1238
Dureza	104	Rockwell	ASTM D785
Resistência à tração	40,2	MPa	ASTM D638

Fonte: F3DB (2020).

3.2 Metodologia

O trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência do padrão de preenchimento nas propriedades de resistência à tração do polímero ABS. Para isso, corpos-de-prova para o ensaio de resistência à tração foram impressos através da técnica FDM. Foram selecionados para estudo cinco geometrias distintas, mantendo-se os outros parâmetros invariáveis (grau de preenchimento, orientação, temperatura de extrusão, temperatura da mesa, velocidade de impressão e espessura da camada). Em seguida, foram realizados os ensaios de gravimetria, análise dimensional, resistência a tração, microscopia ótica, espectroscopia no infravermelho com transformada de *Fourier* (FTIR) e análise termogravimétrica (TGA) nos materiais impressos. Para fins de comparação, também foram realizados os testes de espectroscopia no infravermelho e análise termogravimétrica diretamente no filamento. Um diagrama esquemático com os cinco padrões geométricos selecionados pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 19 – Diagrama esquemático representativo da metodologia utilizada no trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.1 Preparação dos corpos de prova via FDM/FFF

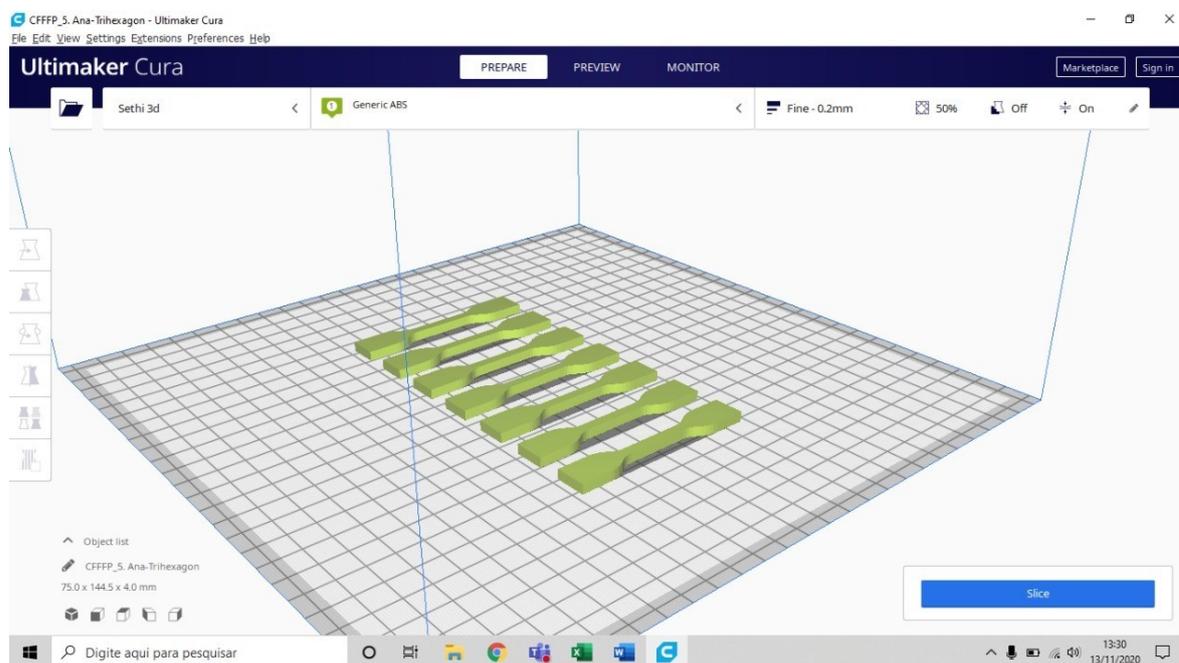
Para a fabricação dos corpos de prova por FDM/FFF, foi utilizada uma impressora 3D fabricada pela empresa Sethi3D, modelo S3, como visualizado na Figura 20, presente no Laboratório de Modelos e Protótipos, da UNISINOS campus Porto Alegre.

Figura 20 – Impressora 3D Sethi3D S3.



Fonte: Registrada pela autora (esquerda) e adaptada de Sethi3D (2020) (direita).

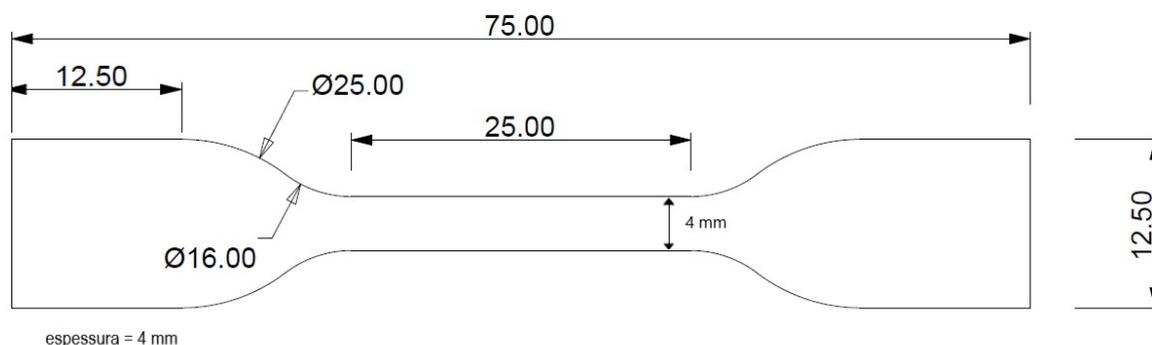
O software de fatiamento (*slicer*) é o responsável por dividir o sólido em camadas, e projetar o trajeto que o bico extrusor deve realizar para depositar o material polimérico de modo a formar cada uma das camadas. No trabalho, foi utilizado o *software* Cura, da empresa Ultimaker, escrito em linguagem python, livre para uso, desenvolvido para trabalhar com diversos tipos de impressoras. No *software* também são inseridos os parâmetros para fabricação da peça, tais como área de impressão, diâmetro do bico de impressão, espessura da camada, orientação de construção, tipo de preenchimento, velocidade de impressão, etc. Estima-se que exista aproximadamente 150 parâmetros de impressão customizáveis, mas claramente, existem configurações pré-existentes indicadas, que facilitam a utilização (AZEVEDO, 2013; All3DP, 2020). Na Figura 21 é apresentada a interface do *software* e as impressões utilizadas no trabalho.

Figura 21 – Interface do *software* Cura.

Fonte: Registrada pela autora.

Na impressora, o bocal de extrusão apresenta 0,4 mm de diâmetro, com mesa de impressão em alumínio totalmente estática, onde o bocal de extrusão que se movimentou nos planos x, y e z. Também foi aplicada uma fina camada de adesivo para manter o material impresso imóvel durante todo o processo. Os corpos de prova foram produzidos em cinco bateladas, onde cada batelada corresponde a sete corpos de prova, variando entre as bateladas apenas o padrão de preenchimento, os quais são identificados como *tri hexagon* (TH), *grid* (GR), *cubic* (CB), *triangle* (TR) e *gyroid* (GY). O tempo de impressão de cada amostra (7 corpos de prova) levou em média 1 h e 55 min. As dimensões dos corpos de prova são apresentadas na Figura 22. Para evitar um defeito corriqueiro na impressão 3D de ABS, o empenamento (*warping*) da peça, foi utilizada a impressão de uma camada fina extra do próprio ABS (tipo *brim*) entre o corpo de prova e a mesa, aumentando assim a área de contato com a mesa, sendo a camada facilmente retirada posteriormente.

Figura 22 – Dimensões (em mm) do corpo de prova impresso no trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

Foi utilizada uma única camada de contorno para manter a precisão dimensional, afetando minimamente o preenchimento do corpo de prova. Durante a fabricação o ambiente foi mantido climatizado a 23°C. Os parâmetros de impressão são apresentados na Tabela 3. Para se observar mais claramente os efeitos de cada padrão de preenchimento, um valor de 100% de grau de preenchimento não seria a melhor escolha, dificultando a distinção de cada padrão, portanto, 50% foi o valor escolhido.

Tabela 3 - Parâmetros de impressão usados na elaboração dos corpos de prova.

Parâmetro	Valor
Temperatura de extrusão	235°C
Temperatura da mesa	110°C
Velocidade de deposição	60 mm/s
Espessura da camada	0,2 mm
Grau de preenchimento	50%
Orientação de preenchimento	45°

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.2 Caracterização

3.2.2.1 Gravimetria

No teste de gravimetria, cada espécime impresso foi pesado em balança analítica Shimadzu, modelo AUY220, com capacidade máxima de 220 g e mínima de 10 mg, e sensibilidade de 0,1 mg, presente no Laboratório de Análise Ambiental da UNISINOS campus São Leopoldo.

3.2.2.2 Análise dimensional

A análise dimensional foi efetuada com auxílio de um paquímetro digital, marca Mitutoyo, número de série 0351720, com resolução de 0,01 mm. Todas as amostras foram medidas após a impressão, em relação ao comprimento total, largura, largura central e espessura, em pelo menos 3 pontos para cada dimensão. A avaliação foi realizada no Laboratório de Metrologia da UNISINOS campus São Leopoldo.

3.2.2.3 Resistência à Tração

O ensaio mecânico de resistência à tração foi realizado de acordo com as orientações da norma ASTM D638-14, no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UNISINOS campus São Leopoldo. Os corpos de prova possuem o formato de gravata, apresentando aproximadamente comprimento total de 75 mm, comprimento central de 25 mm, largura total de 12,5 mm, largura central de 4 mm e espessura de 3 mm (vide Figura 22). Nesta técnica foram medidas as tensões no escoamento, máxima e na ruptura (MPa), módulo de elasticidade (MPa) e o valor de alongamento na ruptura (%). Durante a análise foi gerada uma série de dados de força (kgf) e deslocamento (mm) de onde o software utilizado retira os valores de interesse, resultando em uma tabela de dados. Com os dados obtidos, construiu-se, com auxílio do *software* Microsoft Excel 2013, curvas de tensão (MPa) x deformação (%).

A análise foi realizada mediante a utilização do equipamento marca MTS modelo 370 Load Frame, com célula de carga de 25 kN. Foram utilizadas garras com compressão suficiente para prender os corpos de prova, evitando o

escorregamento durante o ensaio, como visto na Figura 23. A velocidade escolhida foi de 1,8 mm/min, suficiente para que o rompimento das amostras ocorresse entre 0,5 e 5 min de ensaio. Foram testados 7 corpos de prova de cada padrão de geometria, e nenhum dos resultados foi descartado.

Figura 23 – Ensaio de resistência à tração.



Fonte: Registrada pela autora.

3.2.2.4 Microscopia ótica

Para a obtenção das imagens, foi utilizada uma câmera digital e lente auxiliar acoplada a máquina de medição tridimensional marca Starret, modelo Galileo AV 300+, presente no Laboratório de Metrologia da UNISINOS campus São Leopoldo.

Um corpo de prova de cada amostra ensaiada pelo teste de tração, fabricados por FDM, foi selecionado para a análise, e as imagens foram capturadas com 92x e 127x de aumento, exatamente na região onde ocorreu o rompimento no ensaio de tração. A análise de microscopia ótica permite uma comparação entre as amostras após o rompimento, possibilitando visualizar aspectos como a área de rompimento e aderência entre camadas. Esta análise também possibilita visualizar a quantidade de vazios encontrados no interior dos corpos de prova, fator de influência no resultado de resistência à tração.

3.2.2.5 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de *Fourier* (FTIR) foi realizada em um corpo de prova de cada padrão de geometria e também no filamento, escolhidos de forma aleatória, a fim de identificar os grupamentos químicos presentes, para assim proceder uma comparação entre o filamento e os corpos de prova impressos. Dessa forma, utilizou-se um espectrômetro da empresa Agilent Technologies, modelo Cary 630 e acessório ATR (Reflectância Total Atenuada), sendo dispensada a preparação prévia das amostras. O equipamento utilizado está presente no Laboratório de Biologia Molecular e Microbiologia da UNISINOS campus São Leopoldo. Foram obtidos espectros entre as faixas de 650 a 4000 cm^{-1} , resolução de 8 cm^{-1} e 25 scans.

3.2.2.6 Análise Termogravimétrica (TGA)

A Análise Termogravimétrica (TGA) foi realizada utilizando-se entre 5 mg e 15 mg de amostra impressa de cada padrão de geometria e também do filamento, selecionados de forma aleatória. O equipamento usado foi um analisador térmico simultâneo marca Perkin Elmer e modelo STA8000, presente no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais da UNISINOS campus São Leopoldo. O programa de aquecimento utilizado foi de 25°C até 800°C, com rampa de aquecimento de 20°C/min sob atmosfera inerte de nitrogênio (N_2). Com os dados obtidos construiu-se, com auxílio do *software* Microsoft Excel 2013, curvas de perda de massa (%) x temperatura (°C), para fins de comparação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Gravimetria

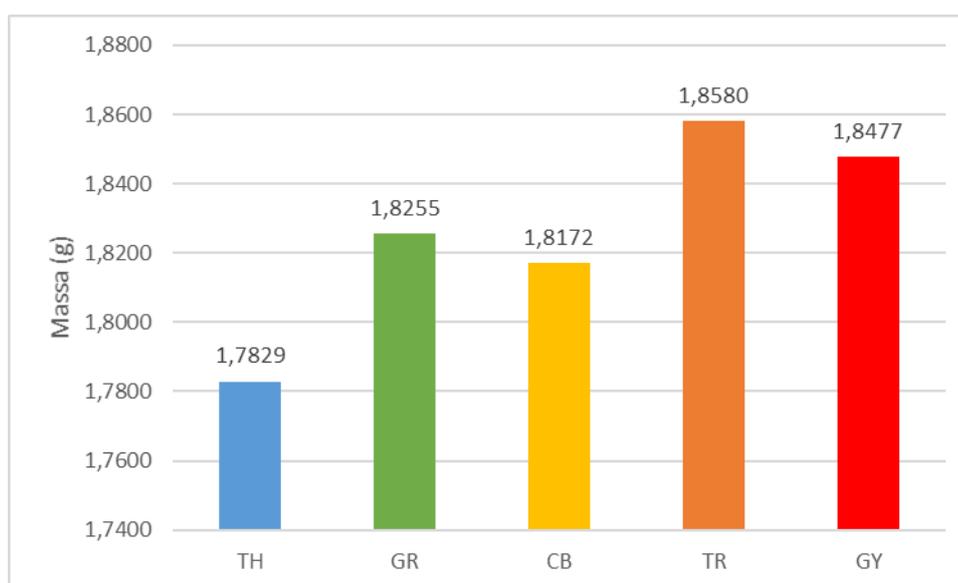
Os valores médios de massa (g) dos corpos de prova são apresentados na Tabela 4. Para fins de comparação, construiu-se com estes valores um gráfico de barras verticais, mostrado no Gráfico 1.

Tabela 4 - Massa dos corpos de prova, em gramas (g).

Amostra	Massa, valor médio (g)
TH	1,7829
GR	1,8255
CB	1,8172
TR	1,8580
GY	1,8477

Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 1 – Massa dos corpos de prova, em gramas (g).



Fonte: Elaborado pela autora.

A amostra TR apresentou a maior massa dentre as avaliadas (1,8580 g), enquanto a amostra TH apresentou o menor valor dentre as avaliadas (1,7829 g).

Calculando-se a média com o valor de todas as amostras, encontramos 1,8263 g, na qual a amostra TR possui massa 5,8% maior que a média, enquanto a amostra TH possui 4,3% menor que a média. Diferenças de massa entre corpos de prova de mesma geometria com padrões de preenchimento distintos também foram encontrados na literatura. Em uma etapa da pesquisa de Abeykoon *et al.* (2020), os autores avaliaram corpos de prova de PLA com 7 padrões de preenchimento distintos, impressos sob mesmas condições de processamento (velocidade de deposição = 90 mm/s, temperatura de extrusão = 215°C, densidade de preenchimento = 50%). Eles identificaram que o padrão *hilbert* apresentou maior massa, enquanto o hexagonal apresentou menor massa dentre os testados, sendo que a diferença foi atribuída pelos autores devido a própria natureza de construção do padrão de preenchimento. Os autores em Khan *et al.* (2017) estudaram os efeitos dos diferentes padrões de preenchimento de FDM/FFF nas propriedades mecânicas de amostras produzidas em ABS, e também encontraram massas diferentes para os padrões *rectilinear*, *concentric* e *honeycomb*, sob condições de igualdade para os outros parâmetros.

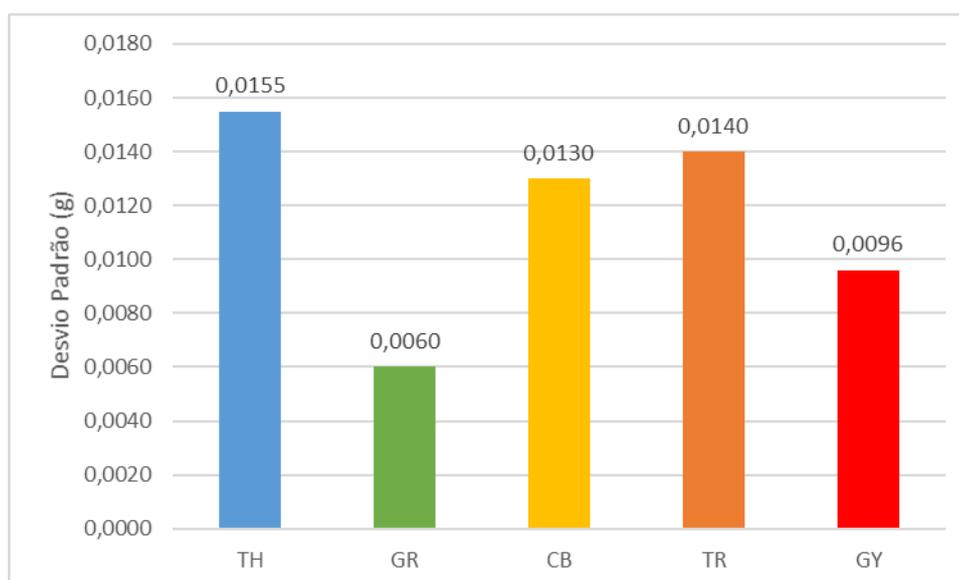
Para fins de comparação, também foi elaborada uma tabela e um gráfico contendo os valores de desvio padrão, em gramas, para cada amostra. Este número indica o grau de variação das massas dentro do mesmo padrão de preenchimento. Observa-se na Tabela 5 e no Gráfico 2 que o padrão de preenchimento GR apresenta o menor desvio padrão, sugerindo menor variação de massa entre os corpos de prova, enquanto o padrão de preenchimento TH apresentou maior desvio padrão, indicando maior variação de massa entre os corpos de prova.

Tabela 5 – Desvio padrão, em gramas (g).

Amostra	Desvio padrão (g)
TH	0,0155
GR	0,0060
CB	0,0130
TR	0,0140
GY	0,0096

Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 2 – Desvio padrão, em gramas (g).

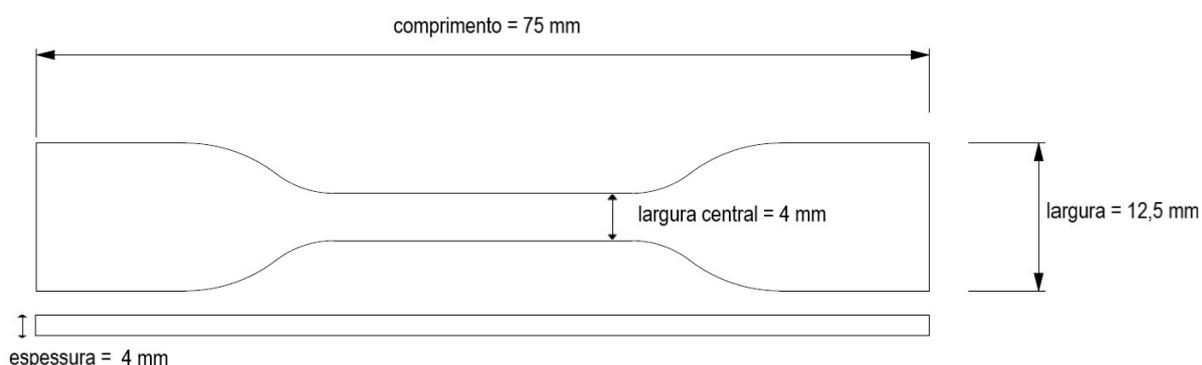


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Análise Dimensional

As dimensões que foram avaliadas na análise dimensional estão especificadas na Figura 24. No detalhe, os valores de cada uma das dimensões, informadas no *set up* da impressora 3D, para a fabricação das amostras.

Figura 24 – Dimensões dos corpos de prova avaliadas na análise dimensional.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6. Estes correspondem ao valor médio encontrado para cada dimensão. Foram realizadas medidas em 7 corpos de prova de cada amostra (padrão de preenchimento), 3 vezes em cada uma das dimensões.

Tabela 6 – Avaliação dimensional das amostras, em milímetros (mm).

	TH	GR	CB	TR	GY
Comprimento, C (mm)	74,76	74,70	74,72	74,71	74,69
Largura, L (mm)	12,58	12,59	12,58	12,62	12,60
Largura Central, LC (mm)	4,18	4,14	4,17	4,20	4,20
Espessura, E (mm)	3,60	3,64	3,66	3,69	3,85

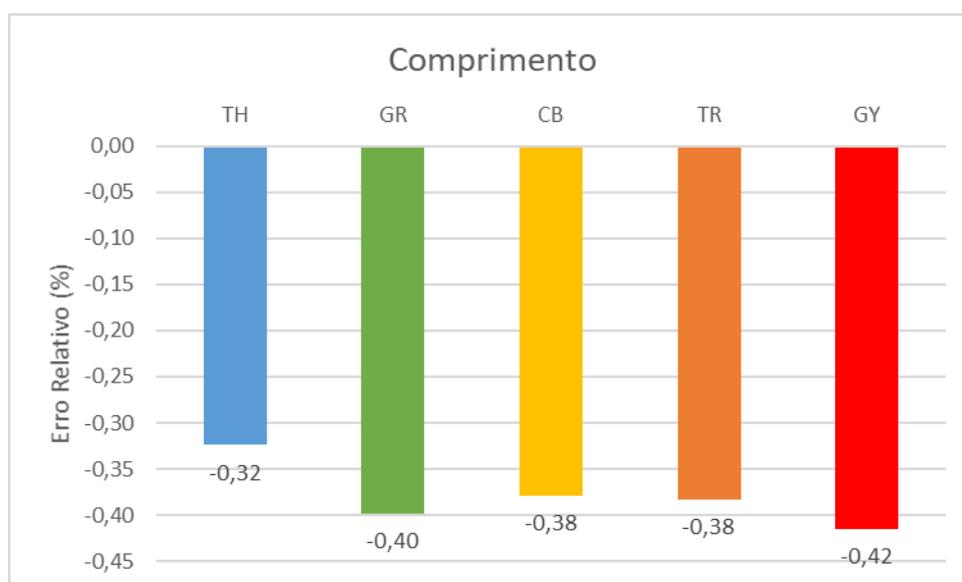
Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que o comprimento das amostras, de maneira geral, difere em relação ao valor original (75 mm), mostrando-se um pouco inferior para todos os padrões de preenchimento, mas muito semelhantes entre si, indicando uniformidade dimensional. Para uma melhor visualização, foi elaborado um gráfico (Gráfico 3), com o erro relativo (%) ao comprimento, calculado da seguinte maneira:

$$\text{Erro Relativo (\%)} = [(\text{valor medido} - \text{valor original}) / \text{valor original}] \times 100$$

Entre todas as amostras, a GY apresentou maior erro relativo (-0,42%) para o comprimento, e avaliando-se o Gráfico 3 como um todo, os erros de comprimento ficaram entre -0,3 e -0,5 %.

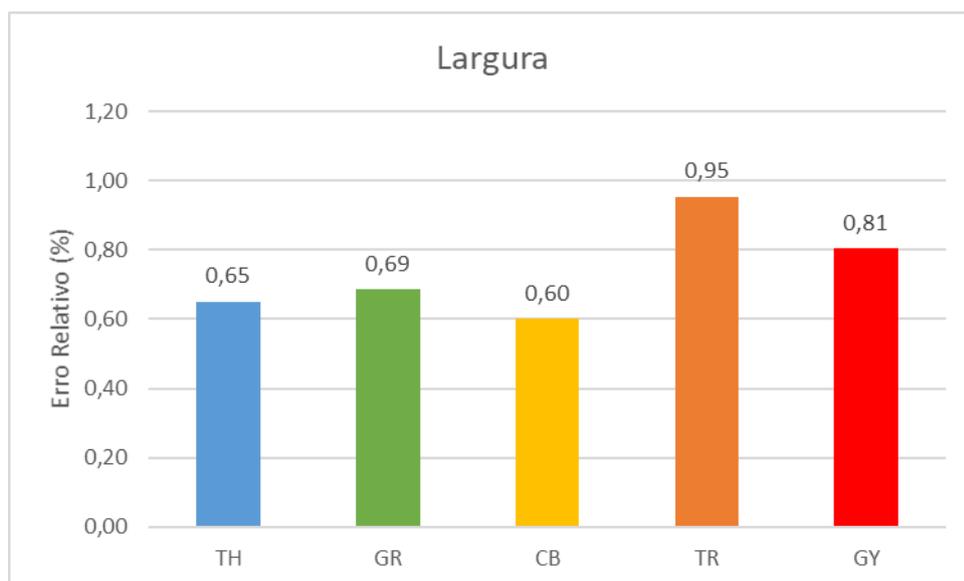
Gráfico 3 – Erro relativo da dimensão comprimento (%).



Fonte: Elaborado pela autora.

Também foram elaborados gráficos com o erro relativo das dimensões largura, largura central e espessura, apresentados nos Gráficos 4, 5 e 6, respectivamente. As amostras apresentaram similaridade em relação a largura (Gráfico 4), todas com erros menores de 1%, onde o padrão de preenchimento TR foi o que apresentou maior erro relativo, de 0,95%.

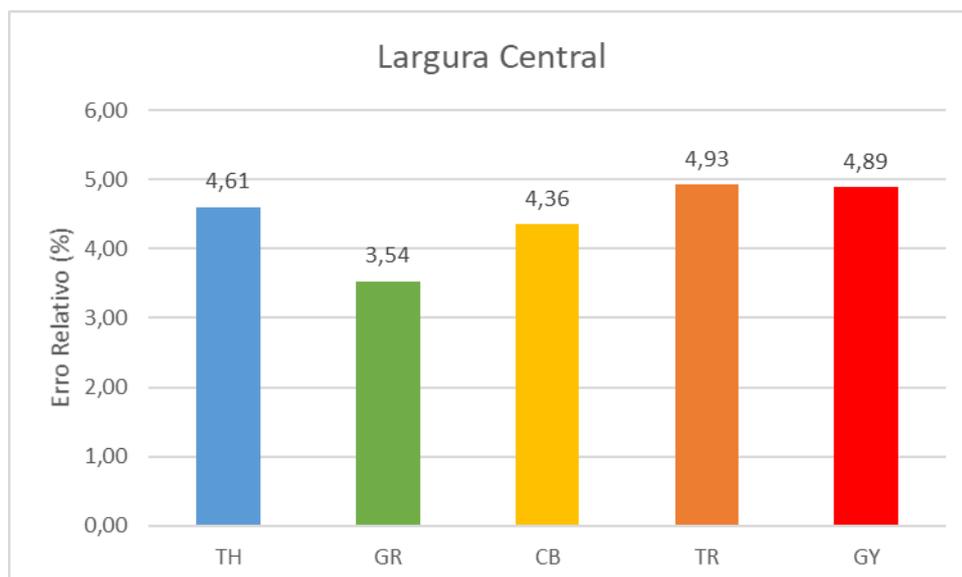
Gráfico 4 – Erro relativo da dimensão largura (%).



Fonte: Elaborado pela autora.

Nas dimensões largura central e espessura, já se esperavam erros relativos maiores, pois ambas são as menores dimensões consideradas. No Gráfico 5, nota-se diferenças na largura central, com valores entre 3 e 5% maiores, sendo que o maior erro relativo foi observado para a amostra TR (4,9 %).

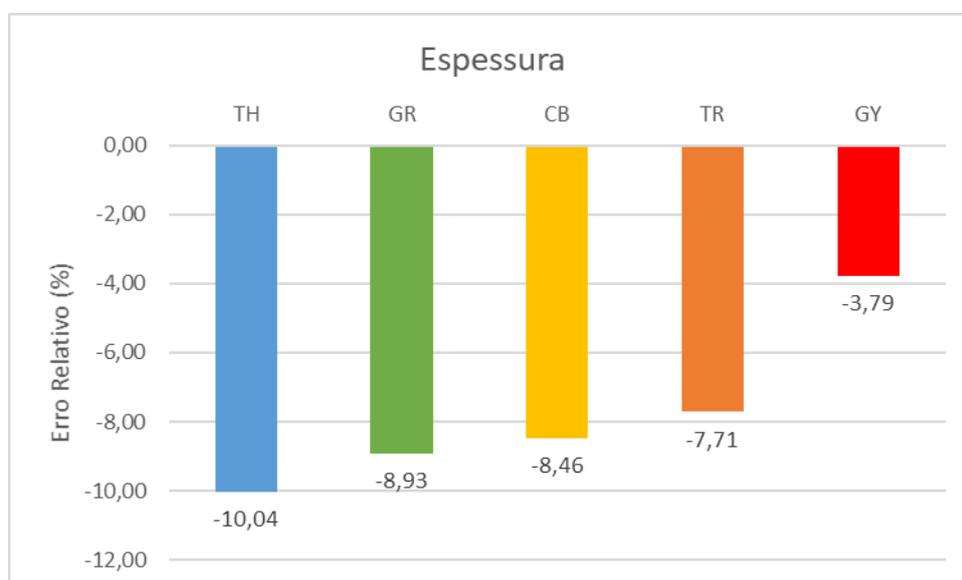
Gráfico 5 – Erro relativo da dimensão largura central (%).



Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, o gráfico 6 apresenta os erros relativos da espessura, que se situam entre -3,5 e -10,0%, sendo máximo para a amostra TH (-10,0%), e mínimo para a amostra GY (-3,8 %).

Gráfico 6 – Erro relativo da dimensão espessura (%).



Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, comparando-se todos os resultados obtidos neste trabalho, diferentes padrões de preenchimento apresentaram desvios dimensionais em relação a sua referência. Para o processo de FDM, isto pode ser compensado com o ajuste das variáveis de processamento ou do projeto. Neste caso, os maiores erros relativos

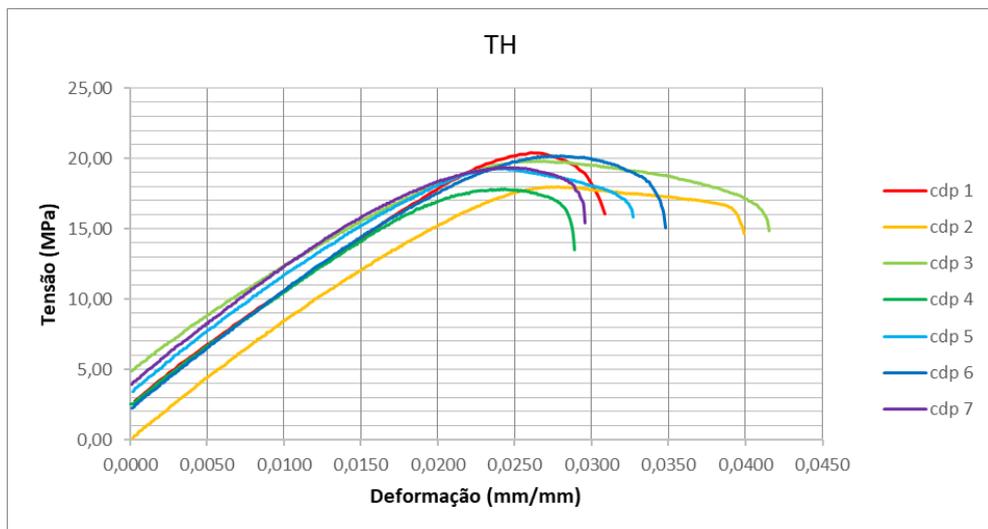
encontrados, na largura central e espessura, poderiam ser mitigados realizando-se mais testes, alterando-se parâmetros como espessura de camada, velocidade de deposição e diâmetro do bocal, ou ainda, realizando-se uma compensação na geometria da peça a ser impressa.

No trabalho descrito em Messimer et. al (2019), foi realizado um grande levantamento estatístico de avaliação dimensional (6930 medições) no processo de manufatura aditiva de FDM para peças de densidade total (100% de preenchimento). Foram estudadas três orientações de impressão diferentes, bem como sete ângulos de varredura (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°) para o padrão de preenchimento *rectilinear*. Todas as medições foram replicadas dez vezes em dez amostras diferentes para garantir um conjunto de dados abrangente. Onze materiais poliméricos foram considerados: ABS, PLA, PLA de alta temperatura, compósito de PLA com madeira, compósito de PLA com fibra de carbono, compósito de PLA com cobre, compósito de PLA com alumínio, HIPS, PETG, PC e PA. Os corpos de prova eram do teste de resistência ao impacto, padrão ASTM, uma vez que esta geometria permite a medição do erro em três escalas diferentes (espessura, largura e comprimento). Foram encontrados para ABS, erros relativos na faixa de -0,52% a 2,86% para a espessura, 1,31% a 2,63% para a largura e -0,38% e 0,15% para o comprimento. Os autores observaram que erros dimensionais abaixo de 0,15% podem ser obtidos com as configurações corretas, mas isso é altamente dependente do tamanho das amostras em questão, sendo que amostras menores mostraram um erro muito maior. Na pesquisa de outros artigos, Messimer et. al (2019) relatam que em termos de erro dimensional absoluto, a maioria dos estudos mostrou a capacidade de construir peças com erro inferior a 0,20 mm, independentemente do tamanho do corpo de prova. Enquanto a maioria dos estudos relatou o erro como uma porcentagem das dimensões da amostra, é claro a partir dos dados apresentados que o erro está mais relacionado às dimensões nominais e, portanto, tamanhos de amostra diferentes mostrarão erros de porcentagem diferentes para o mesmo material e parâmetros.

4.3 Resistência à Tração

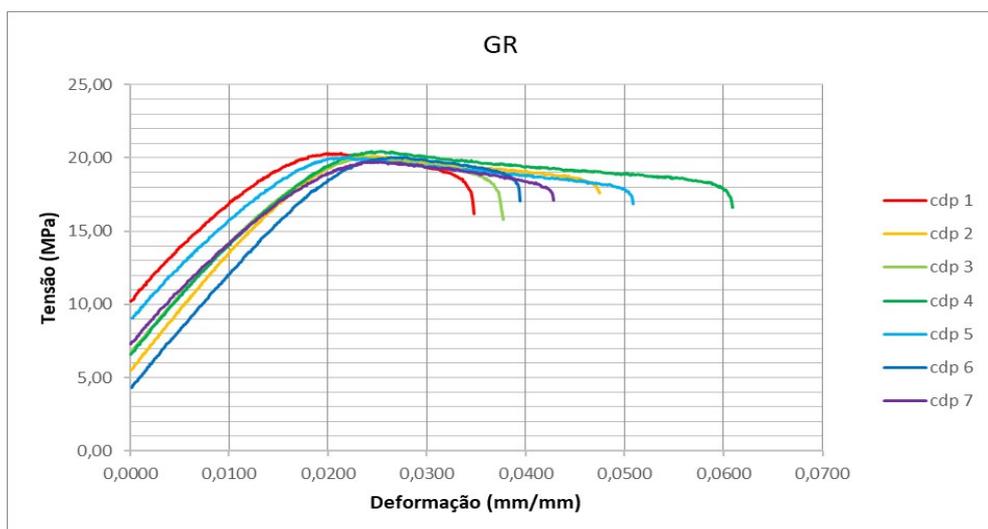
Os resultados do ensaio de resistência à tração para os padrões de preenchimento TH, GR, CB, TR e GY estão apresentados nos Gráficos 7, 8, 9, 10 e 11, respectivamente.

Gráfico 7 – Curva de tensão (MPa) *versus* deformação (adimensional) da amostra TH.



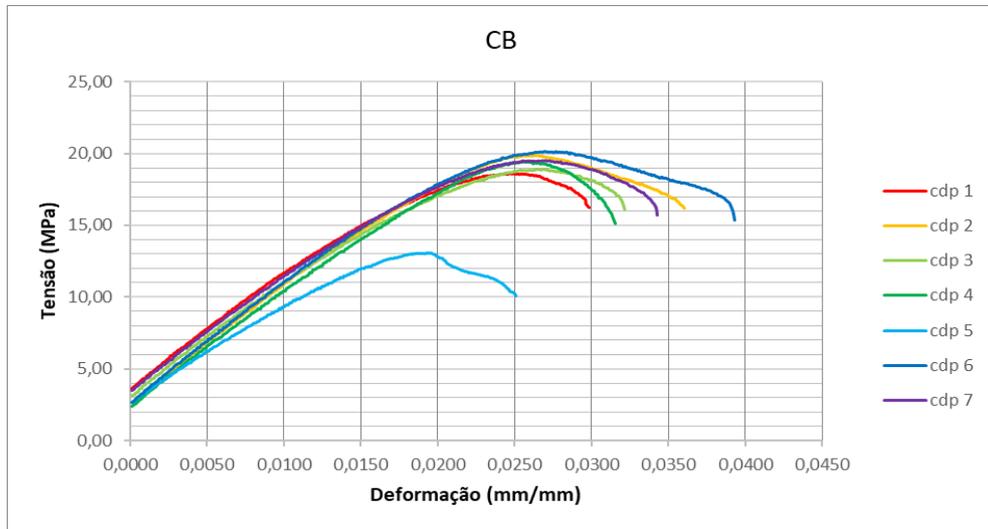
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 8 – Curva de tensão (MPa) *versus* deformação (adimensional) da amostra GR.



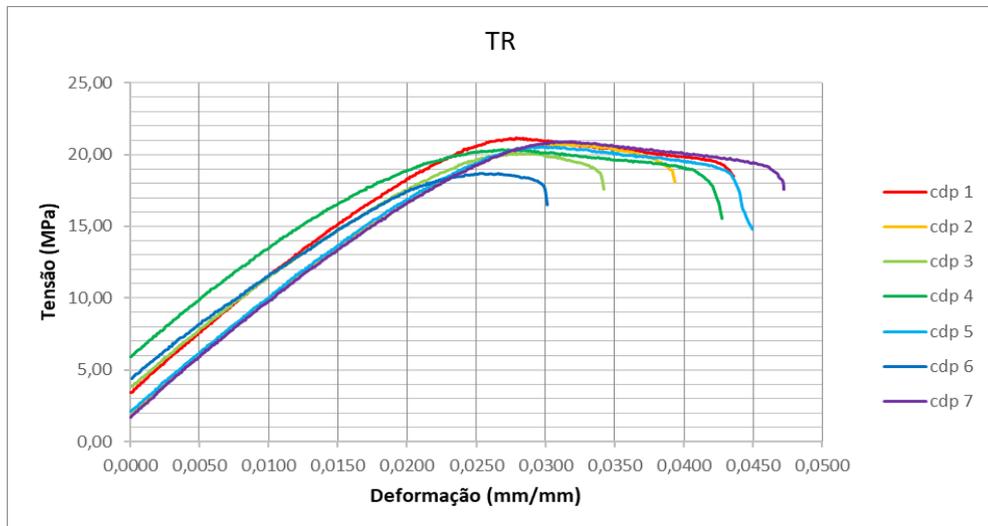
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 9 – Curva de tensão (MPa) versus deformação (adimensional) da amostra CB.



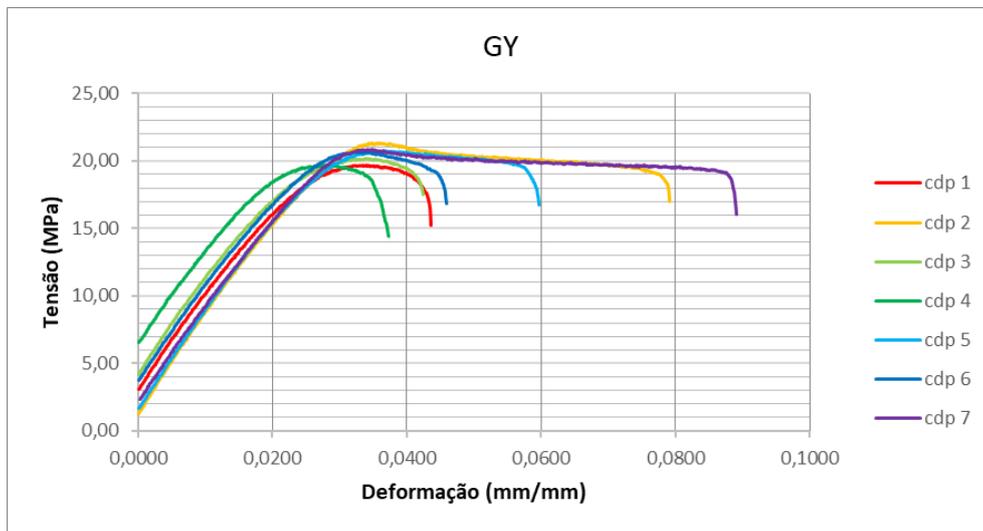
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 10 – Curva de tensão (MPa) versus deformação (adimensional) da amostra TR.



Fonte: Elaborado pela autora.

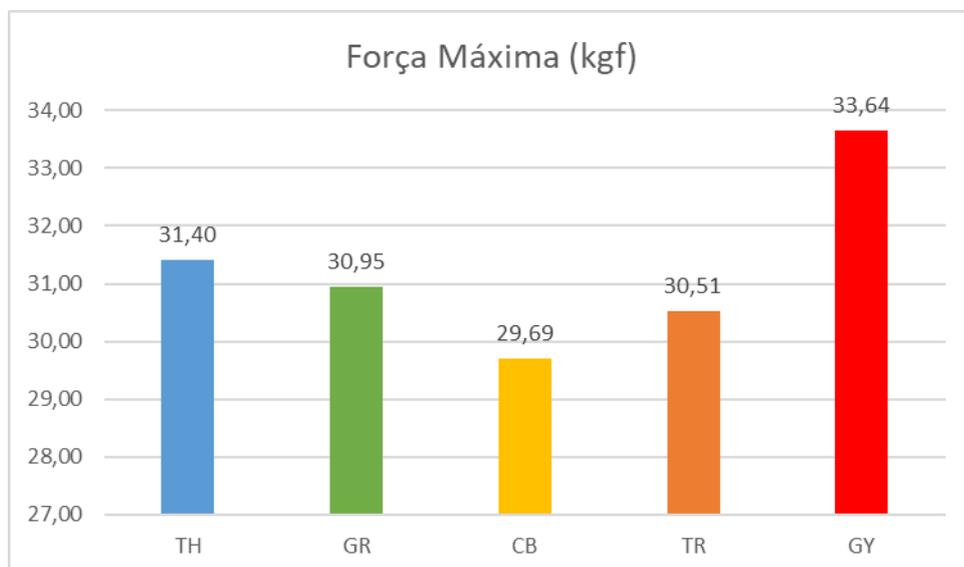
Gráfico 11 – Curva de tensão (MPa) versus deformação (adimensional) da amostra GY.



Fonte: Elaborado pela autora.

Durante a análise, o *software* da máquina MTS gerou uma série de dados de força (kgf) e deslocamento (mm), resultando em um conjunto de dados. Um gráfico de barras contendo a força máxima obtida também foi construído para ilustrar a diferença entre as amostras (Gráfico 12). Nota-se que o padrão de preenchimento que gerou a maior força máxima entre as cinco amostras foi a *gyroid* (GY), de aproximadamente 34 kgf, enquanto a amostra *cubic* (CB) apresentou o menor resultado, de 30 kgf.

Gráfico 12 – Força máxima (kgf) obtida no teste de resistência a tração.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos gráficos acima e tabelas de dados gerados pela MTS, foi possível obter os resultados de tensão de escoamento, tensão máxima, tensão de ruptura, alongamento na ruptura e módulo de elasticidade, que estão relacionados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de resistência à tração.

	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
TH	20,46	20,46	15,07	0,89	731
GR	20,09	20,10	16,83	1,79	648
CB	19,16	19,18	15,83	1,63	731
TR	19,35	19,35	17,30	2,05	704
GY	20,46	20,59	16,74	1,69	629

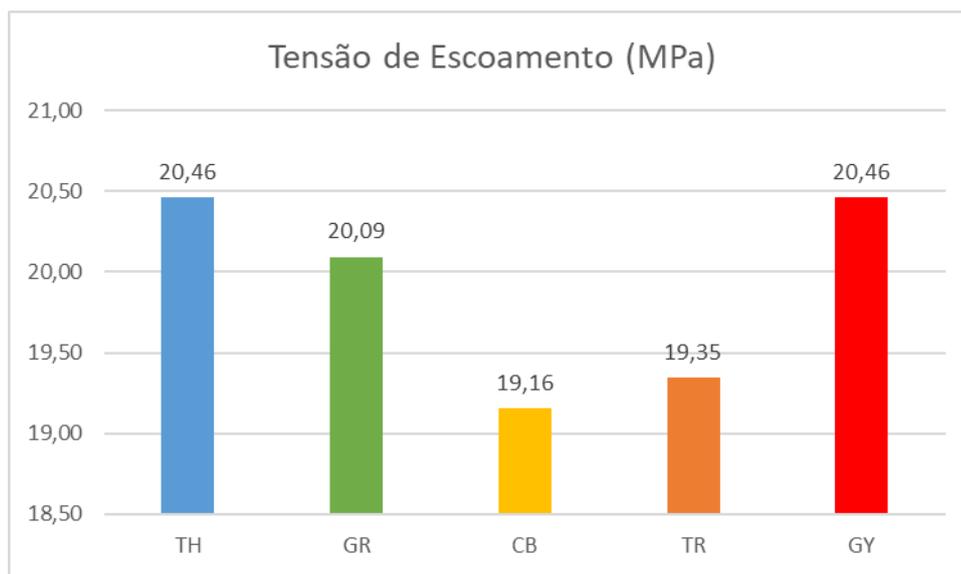
Fonte: Elaborado pela autora.

Entre as amostras avaliadas, o padrão de preenchimento que apresentou maior força máxima, GY, também apresentou maior tensão de escoamento e tensão máxima, como era o esperado. De maneira análoga, a amostra TH também apresentou resultados idênticos a GY com relação a tensão de escoamento e tensão máxima. Portanto, ambas apresentaram os maiores valores de tensão de escoamento e máxima. Já com relação ao módulo de elasticidade, as amostras HC e CB foram as que apresentaram os maiores resultados, ambas com 731 MPa. E por fim, a amostra TR foi a que apresentou maior % de alongamento na ruptura, 2,05%.

Se compararmos o maior valor de tensão máxima (MPa) obtida entre as amostras, que é 20,6 MPa, com o valor de resistência à tração informado pelo fabricante do filamento de ABS, que é 40,2 MPa, encontramos um valor de aproximadamente 50% menor. Em Khan *et. al* (2017), os autores identificaram que amostras fabricadas com densidade de 50% produzem uma resistência mecânica muito inferior a 50% da sua matéria-prima correspondente. Cabreira (2018) atribui esta diferença ao fato de que as resinas para fabricação de filamentos são testadas com corpos de prova moldados pelo processo de injeção, o qual promove alta compactação do material e elimina os vazios, o que leva a maior área transversal efetiva de material e maior resistência mecânica de forma geral.

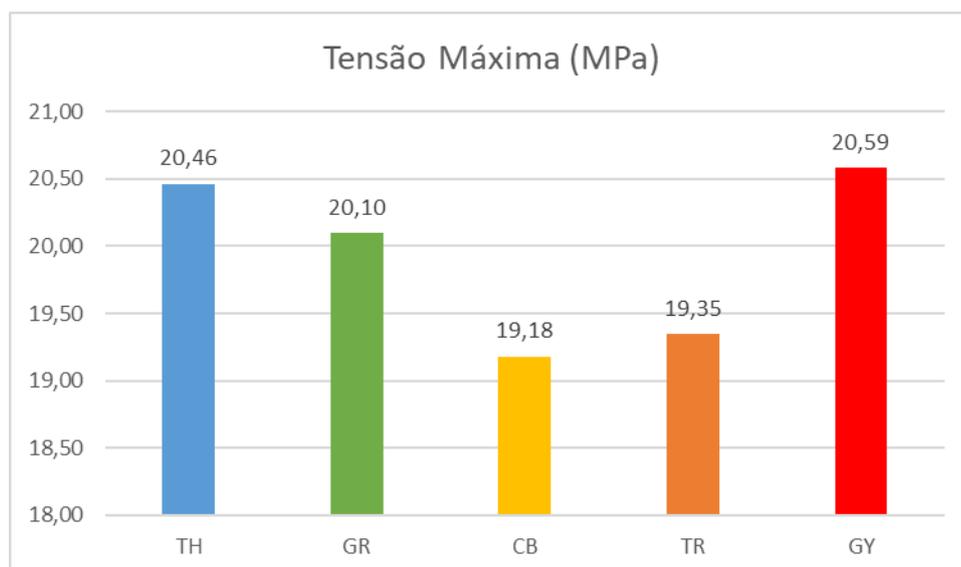
Para uma melhor visualização comparativa entre os resultados de resistência à tração, foram construídos gráficos de barras verticais com os valores de tensão de escoamento, tensão máxima, tensão de ruptura, alongamento na ruptura e módulo de elasticidade, apresentados nos Gráficos 13, 14, 15, 16 e 17, respectivamente.

Gráfico 13 – Tensão de escoamento (MPa) obtida no teste de resistência a tração.



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 14 – Tensão máxima (MPa) obtida no teste de resistência a tração.

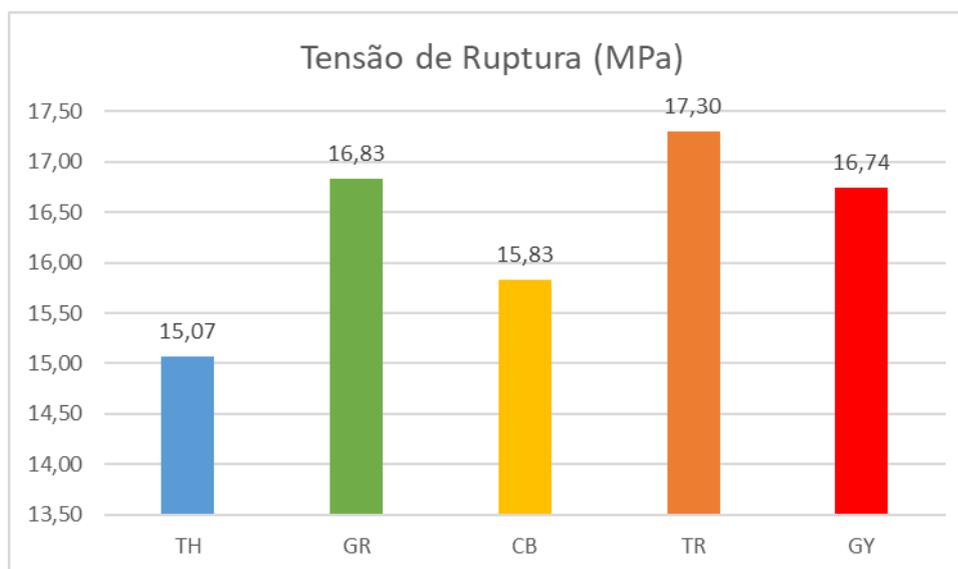


Fonte: Elaborado pela autora.

O resultados de tensão de ruptura apresentaram-se diferentes, se comparadas a tensão de escoamento e máxima. No Gráfico 15, podemos verificar

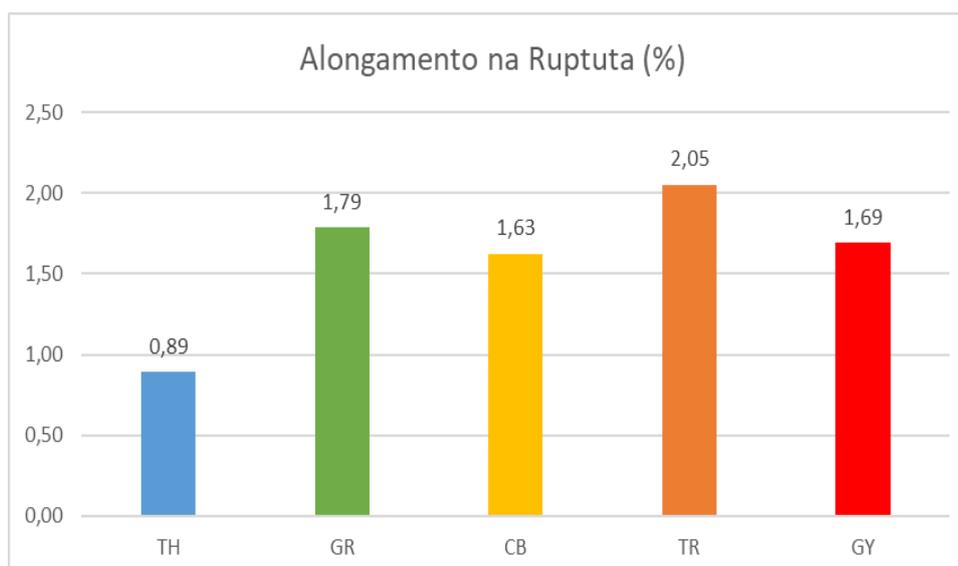
que a amostra TR apresentou o maior valor entre as avaliadas, de 17,3 MPa, enquanto a amostra TH foi a que apresentou o menor valor, de 15,1 MPa, sendo a diferença nominal entre elas de aproximadamente 2,2 MPa. O alongamento na ruptura (gráfico 16) seguiu a mesma tendência da tensão de ruptura, e apresentou maior valor para a amostra TR, 2,0 %, e menor valor para a amostra TH, 0,9 %, sendo a diferença nominal entre estes extremos de 1,1 %.

Gráfico 15 – Tensão de ruptura (MPa) obtida no teste de resistência a tração.



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 16 – Alongamento na ruptura (%) obtida no teste de resistência a tração.

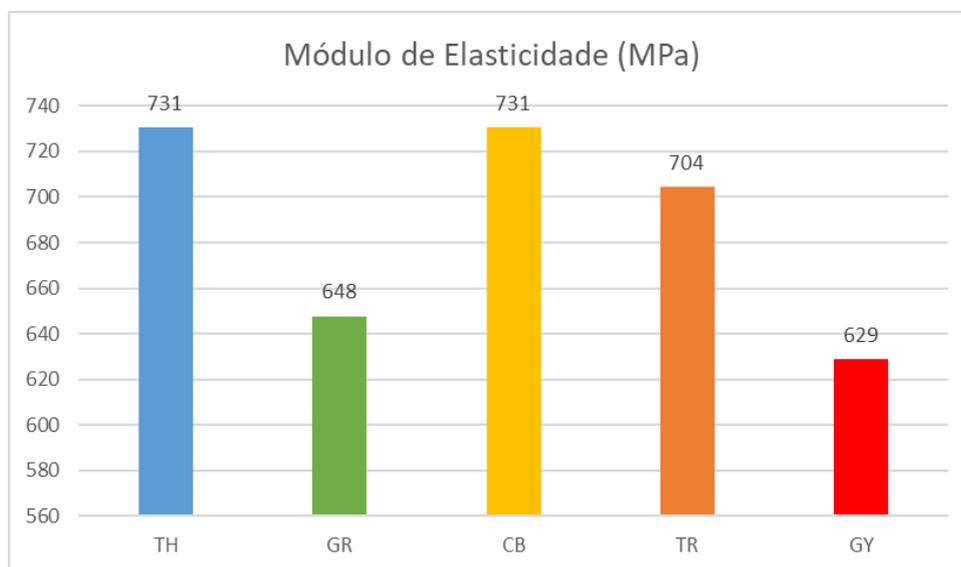


Fonte: Elaborado pela autora.

Para o módulo de elasticidade, encontrou-se o maior valor para as amostras TH e CB, que foi de 731 MPa, e menor valor para a amostra GY, que foi de 629

MPa. Diferentemente do que se esperava, o fato da amostra GY apresentar maior tensão de escoamento e tensão máxima não se refletiu na módulo de elasticidade.

Gráfico 17 – Módulo de elasticidade (MPa) obtido no teste de resistência a tração.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para proceder uma melhor comparação entre os padrões de preenchimento, os resultados da resistência à tração foram normalizados em relação a massa dos corpos de prova correspondentes. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8. Das amostras avaliadas, a que apresentou maior valor de razão propriedade/massa foi a *tri hexagon* (TH), demonstrando ser a melhor escolha de padrão de preenchimento, seguindo as mesmas condições de processamento.

Tabela 8 – Resultados do ensaio de resistência à tração normalizados pela massa.

	Tensão de escoamento /massa (MPa/g)	Tensão máxima /massa (MPa/g)	Tensão ruptura /massa (MPa/g)	Alongamento na ruptura /massa (%/g)	Módulo de elasticidade /massa (MPa/g)
TH	11,5	11,5	11,5	0,5	410
GR	11,0	11,0	10,7	1,0	355
CB	10,5	10,6	10,6	0,9	402
TR	10,4	10,4	10,4	1,1	379
GY	11,1	11,1	11,1	0,9	340

Fonte: Elaborado pela autora.

Resultados distintos foram observados nas referências consultadas. Em Fernando-Vicente *et. al* (2016), os autores estudaram a influência de duas variáveis, o padrão (*rectilinear, honeycomb, line*) e a densidade (20%, 50%, 100%) de

preenchimento nas características do ABS impresso pelo processo FDM, e chegaram nas seguintes conclusões:

- O padrão *rectilinear* com densidade de preenchimento de 100% atingiu o maior valor de resistência à tração, com valor de 36,4 MPa.
- Sob a mesma densidade, o padrão *honeycomb* mostra uma melhor resistência à tração, embora a diferença entre os padrões seja inferior a 5%. Os autores atribuíram esta discrepância a pequenas variações de quantidade de polímero depositado para cada padrão de preenchimento.
- As trajetórias de deposição e, conseqüentemente, as zonas de ligação entre camadas são muito diferentes entre os padrões *honeycomb* e *rectilinear*. Isto pode ser uma razão para explicar a diferença do módulo de elasticidade.

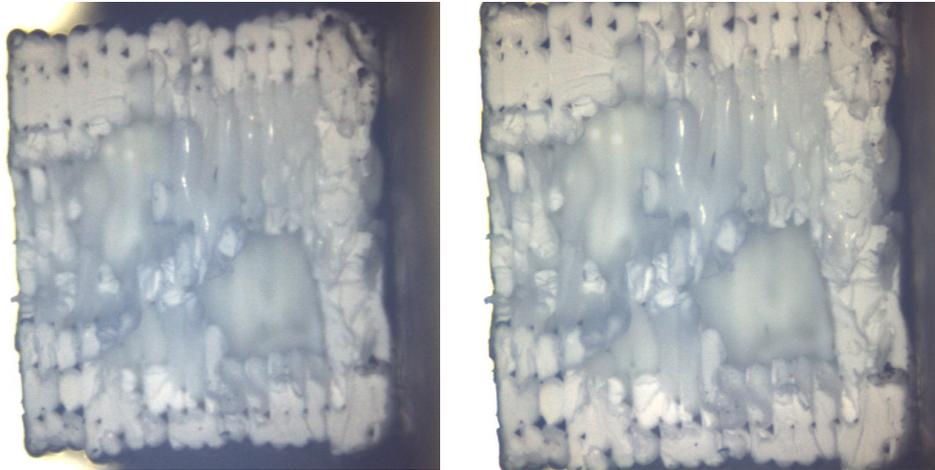
Em Khan *et. al* (2017), os autores avaliaram três padrões de preenchimento distintos (*honeycomb*, *rectilinear* e *colinear*) com relação a sua resistência à tração, e identificaram que o padrão *rectilinear* apresentou a melhor resposta mecânica, enquanto o padrão *colinear* apresentou o melhor alongamento.

4.4 Microscopia ótica

As imagens mostradas abaixo foram obtidas com auxílio de microscopia ótica, com aumento de 92x (esquerda) e 127x (direita). Foram selecionados um corpo de prova de cada padrão de preenchimento, de forma aleatória, e as imagens foram realizadas na face rompida, após ensaio de resistência à tração. Observa-se que a área efetiva que sofre a força de tração é menor em todas as amostras, devido à natureza do processo FDM. Com o grau de preenchimento de 50% e padrão de preenchimento interno com distintas configurações, formam-se espaços vazios e descontinuidades, o que fatalmente ocasionam alterações de resistência mecânica, principalmente se comparados aos processamentos mais tradicionais como injeção e moldagem por compressão. Este fato fica mais evidente na Figura 30, onde podemos ver que aparentemente a amostra GY (esquerda) possui menor quantidade de vazios e descontinuidades se comparada a amostra CB (direita), corroborando a diferença de tensão máxima na resistência à tração, que foi de aproximadamente 1,4 MPa superior para a GY. Observou-se também que as amostras TH e GY aparentemente apresentam maior área efetiva na região de

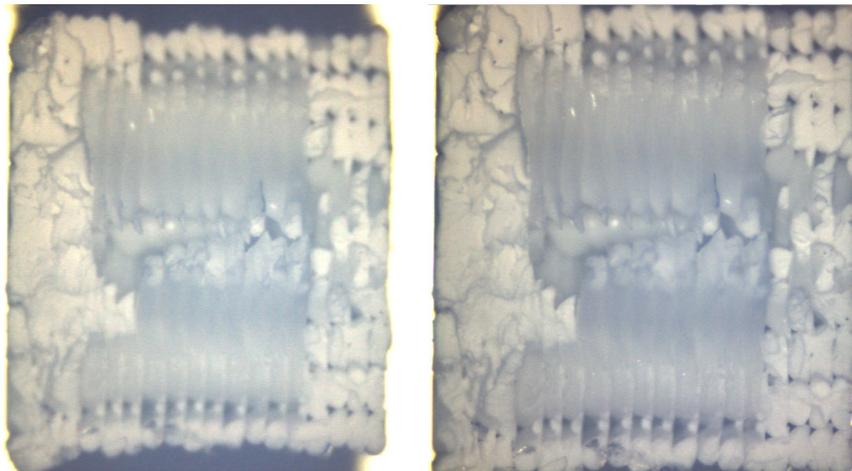
rompimento, e por consequência, apresentaram maiores valores de tensão de escoamento e tensão máxima entre os padrões de preenchimento avaliados.

Figura 25 – Imagem obtida por microscopia ótica da amostra TH.



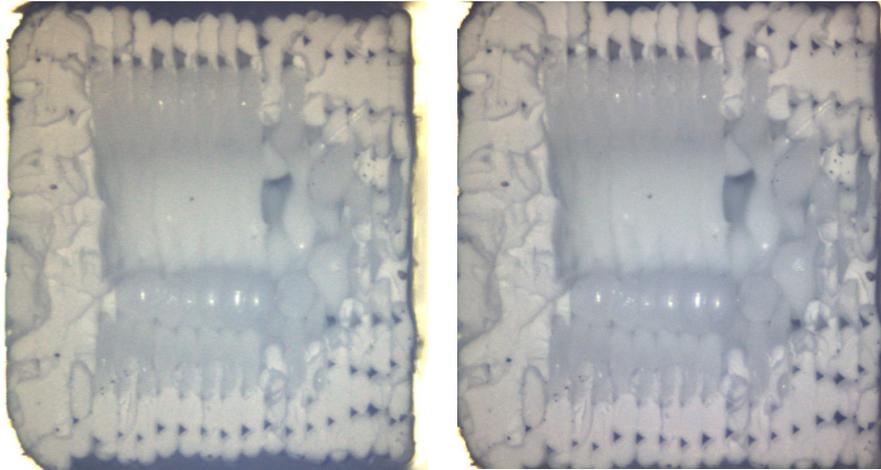
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 26 – Imagem obtida por microscopia ótica da amostra GR.



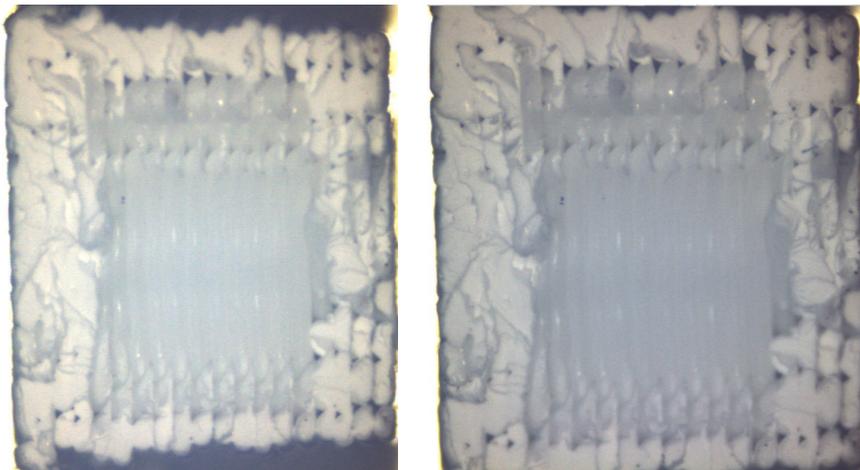
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 27 – Imagem obtida por microscopia ótica da amostra CB.



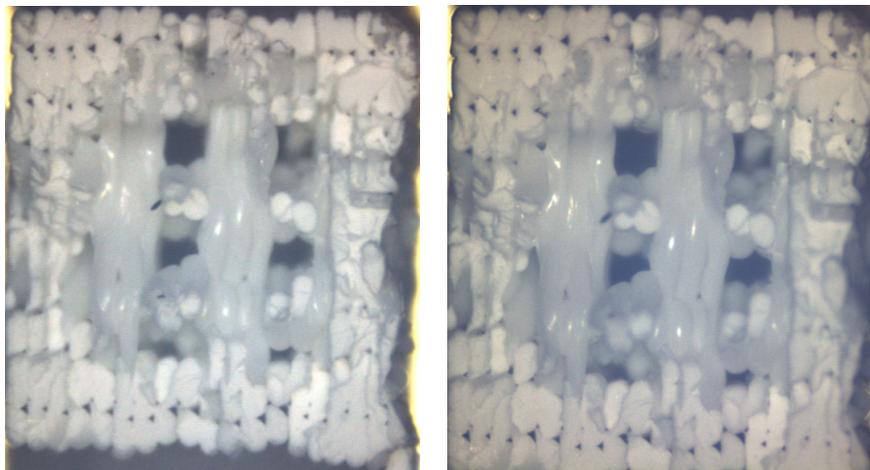
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 28 – Imagem obtida por microscopia ótica da amostra TR.



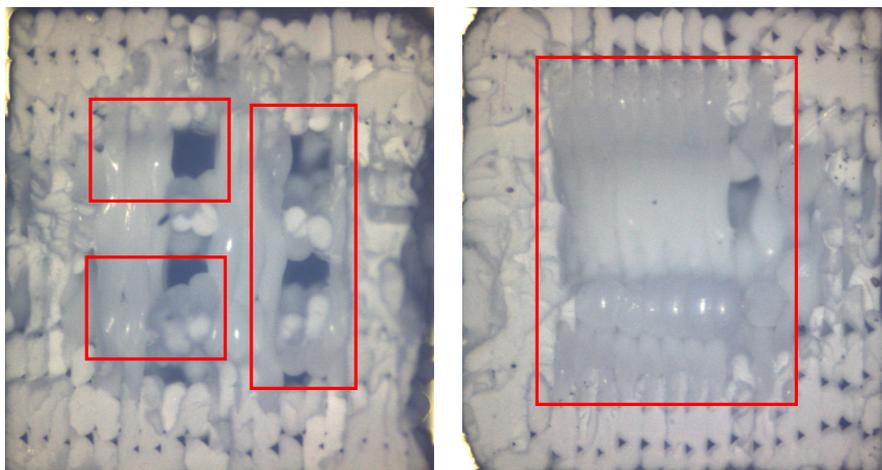
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 29 – Imagem obtida por microscopia ótica da amostra GY.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 30 – Região de rompimento da amostra GY (esquerda) e amostra CB (direita).

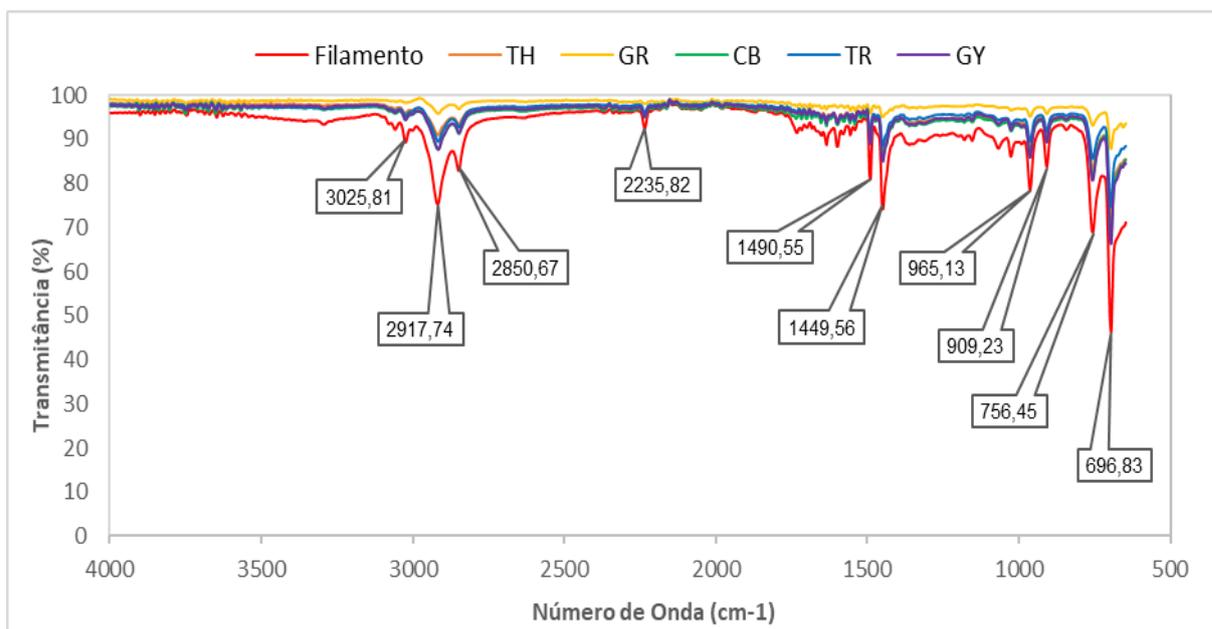


Fonte: Elaborado pela autora.

4.5 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Na Figura 31, foi realizada a sobreposição dos espectros de infravermelho das amostras avaliadas, juntamente ao espectro do filamento. As bandas de transmissão características de cada componente do polímero ABS foram confirmadas a partir da literatura (AGOSTINI, 2018; LI, 2017). As vibrações do estiramento C-H aromático e alifático são claramente observadas na faixa de $3200-3000\text{ cm}^{-1}$ e $3000-2800\text{ cm}^{-1}$, respectivamente. A absorção característica da unidade de acrilonitrila representada pela ligação $\text{C}\equiv\text{N}$ aparece em 2236 cm^{-1} . Em 1491 cm^{-1} observa-se a vibração de estiramento do anel aromático da unidade de estireno. A vibrações da deformação C-H de átomos de hidrogênio ligados ao $\text{C}=\text{C}$ é vista em 965 cm^{-1} (1,4 butadieno) e 909 cm^{-1} (1,2 butadieno). E por fim, as absorções em 756 cm^{-1} e 696 cm^{-1} são atribuídas ao estireno.

Figura 31 – Sobreposição dos espectros de infravermelho das amostras avaliadas.



Fonte: Elaborado pela autora.

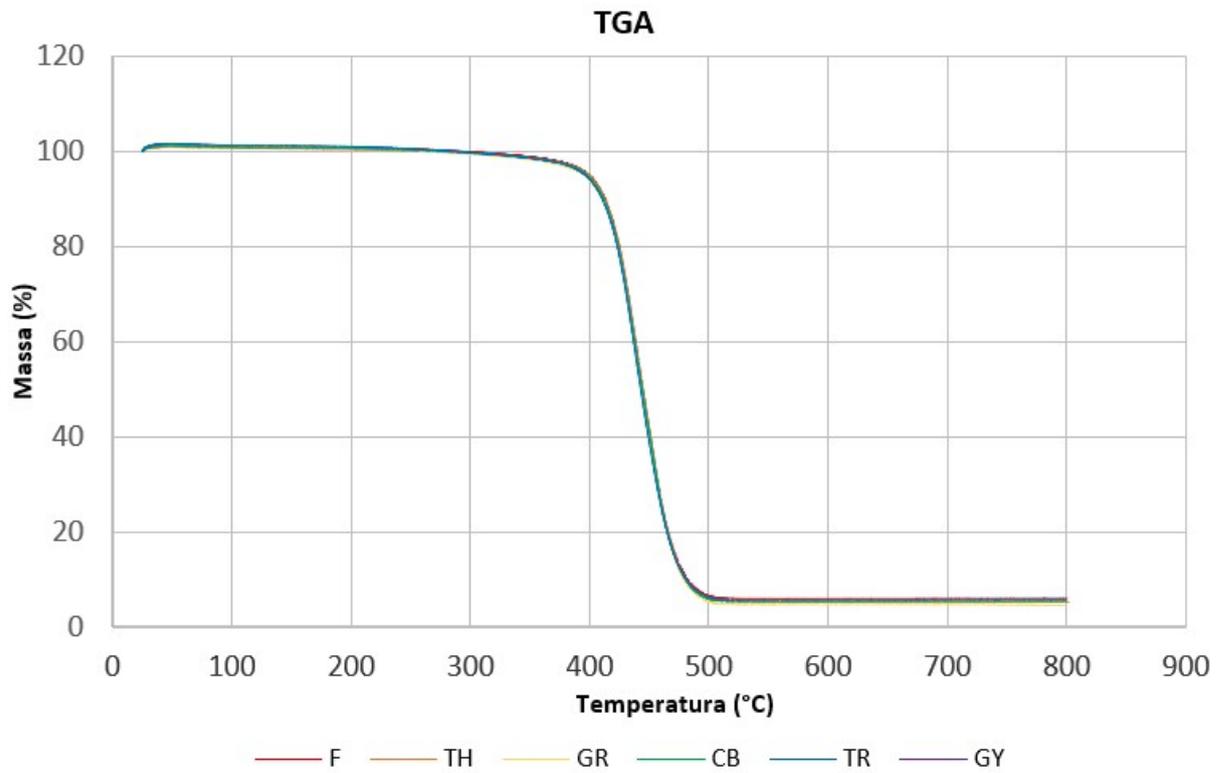
Os espectros apresentam-se idênticos, sem a presença de bandas anômalas ao ABS, portanto, evidenciando a ausência de outros materiais poliméricos. Também fica demonstrado que o processo FDM não ocasionou modificações químicas no material, demonstrando a segurança da temperatura de extrusão escolhida para o processo.

4.6 Análise Termogravimétrica (TGA)

A Figura 32 apresenta as curvas TGA para as amostras F (filamento), TH, GR, CB, TR e GY, as quais apresentaram comportamentos de decomposição térmica muito similares. Observou-se que as amostras sofreram completa decomposição na faixa de 320-525°C, com temperatura de início de decomposição em torno de 330°C, e temperatura final em torno de 510°C, e ainda, temperatura máxima de decomposição em aproximadamente 442°C. A decomposição ocorreu em etapa única, e o valor médio encontrado para o resíduo final (em 800°C) foi de 6%. Em Lustosa et. al (2020), os autores caracterizaram compósitos produzidos com o terpolímero acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) reforçados com fibras de polpa de celulose modificadas com nanopartículas de sílica (SiO₂), e obtiveram para o

TGA do ABS puro, decomposição também em etapa única, com temperatura máxima de decomposição em 420°C, semelhante ao obtido neste trabalho.

Figura 32 – Sobreposição das análises termogravimétricas das amostras avaliadas.



Fonte: Elaborado pela autora.

5 CONCLUSÕES

O processo de fabricação por FDM mostrou-se promissor em fornecer resultados bons e reproduzíveis em relação à resistência mecânica das peças impressas. Nas análises de FTIR e TGA não foram evidenciadas alterações tais como grupos químicos anômalos ou perfil de decomposição diferente do esperado para o ABS. Portanto, os parâmetros de processamento selecionados, tais como velocidade de deposição, temperatura de extrusão, temperatura da mesa, espessura da camada, orientação de construção e preenchimento, mostraram-se adequados, não ocasionando modificações químicas e no perfil de decomposição do polímero base do filamento.

Observou-se diferenças nas massas dos corpos de prova dos diferentes padrões de preenchimento, onde a amostra *triangle* apresentou massa 5,8 % maior que a média, enquanto que a amostra *tri hexagon* apresentou massa 4,3 % menor que o valor médio, diferença esta atribuída à própria natureza de construção dos diferentes tipos de preenchimento.

As amostras impressas apresentaram pouca variação dimensional, se consideradas as dimensões comprimento e largura dos corpos de prova, com erro relativo menores que 1%, ao passo que se consideradas dimensões menores como largura central e espessura, observaram-se diferenças maiores entre o projeto e o protótipo impresso. A literatura consultada também apresentou comportamentos similares, indicando que tamanhos de amostra diferentes mostrarão erros relativos diferentes para o mesmo material e parâmetros de processamento. Contudo, são necessários estudos com maior número de repetições e variáveis para melhor entender a variação dimensional.

A respeito do desempenho mecânico relativo à tração, os tipos de preenchimento apresentaram diferenças nos valores de tensão de escoamento e tensão máxima, sendo a amostra *gyroid* (GY) a que apresentou maior valor nominal, de 20,5 MPa e 20,6 MPa, respectivamente. Já para tensão de ruptura e alongamento na ruptura, a amostra *triangle* (TR) apresentou maior valor nominal, sendo 17,3 MPa e 2,0 %, respectivamente. Para o módulo de elasticidade, as amostras *tri hexagon* (TH) e *cubic* (CB) apresentaram valor idêntico, 731 MPa, sendo o maior entre todas as amostras.

Por fim, comparando-se a razão dos resultados de resistência à tração normalizados pela massa dos corpos de prova em questão, identifica-se que o melhor resultado obtido é o da amostra *tri hexagon* (TH), pois foi dos padrões de preenchimento avaliados o que apresentou maiores valores de tensão/massa (MPa/g). Devido as diversas possibilidades de escolha nos parâmetros de impressão, e visto que existem influências destes na qualidade do material impresso, o assunto abordado no trabalho é muito amplo, devendo ser aprofundado para melhor compreensão da relação entre o padrão de preenchimento e resistência mecânica do produto impresso.

6 TRABALHOS FUTUROS

- I. Realização de novos estudos onde os experimentos são selecionados com base estatística para definir os parâmetros de impressão mais críticos. Uma ferramenta estatística sugerida é o *design of experiments* (DOE).
- II. Estudo sobre os efeitos do padrão de preenchimento na impressão 3D em propriedades mecânicas distintas dos ABS, tais como compressão, flexão e resistência ao impacto. Realizar em paralelo, os mesmos ensaios em corpos de prova de ABS obtidos pelo processo de injeção.
- III. Utilização de técnicas de caracterização mais avançadas tais como microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliar a microestrutura do material impresso.

REFERÊNCIAS

- 3D Printing – Stereolithography (SLA). **Re-FREAM**, 2020. Disponível em <<https://www.re-fream.eu/portfolio/3d-printing-stereolithography-sla/>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.
- ABEYKOON, Chamil; SRI-AMPHORN, Pimpisut; FERNANDO, Anura. Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, v. 3, n. 3, p. 284-297, 2020.
- AGENDA BRASILEIRA PARA A INDÚSTRIA 4.0. **Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial**. 2017. Disponível em: <<http://www.industria40.gov.br/>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.
- AGOSTINI, Nicole Bohm. **Reciclagem primária de resíduos poliméricos provindos do processo FDM**. Trabalho de conclusão (Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, p. 62. 2018.
- ASTM D638-14. Standard test method for tensile properties of plastics. **ASTM International**, 2014. Disponível em <<http://www.dept.aoe.vt.edu/~aborgolt/aoe3054/manual/expt5/D638.38935.pdf>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.
- AZEVEDO, Fábio Mariotto de. **Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D**. Trabalho de Conclusão (Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo (USP). São Carlos, p. 48. 2013.
- BARTOLOMÉ, Elena *et al.* ABS 3D printed solutions for cryogenic applications. **Cryogenics**, v. 82, p. 30-37, 2017.
- CABREIRA, Vinicius. **Avaliação dos parâmetros de processamento em impressão 3D nas propriedades do poliácido láctico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, p. 104. 2018.
- CANEVAROLO JR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**. Artliber editora, São Paulo, 2002.
- CARLOTA V. The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing. **3Dnatives**, 2019. Disponível em: <<https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/#!>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.
- CHAKRAVORTY, Dibya. 2020 Cura Tutorial: Master Cura Slicer Software Settings. **All3DP**. Disponível em <<https://all3dp.com/1/cura-tutorial-software-slicer-cura-3d/>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.

COMO FUNCIONA A IMPRESSÃO 3D – FDM/FFF. **3D Applications**, 2018. Disponível em <<https://www.3dapplications.com.br/2018/02/06/como-funciona-a-impresao-3d-fdm-fff/>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.

DIZON, John Ryan C. *et al.* Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Additive Manufacturing**, v. 20, p. 44-67, 2018.

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.

FORD, Simon; DESPEISSE, Mélanie. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. **Journal of cleaner Production**, v. 137, p. 1573-1587, 2016.

HARPER, Charles A. **Handbook of plastics, elastomers, and composites**. New York: McGraw-Hill, 2002.

HISTORY OF 3D PRINTING. **3D Printing Industry**, 2017. Disponível em: <<https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#02-history>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.

HOW FDM/FFF 3D PRINTING TECHNOLOGY WORKS? **Manufactur3D**, 2020. Disponível em <<https://manufactur3dmag.com/working-fdm-fff-3d-printing-technology/>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.

IMPRESSÃO 3D. **Autodesk**. 2020. Disponível em <<https://www.autodesk.com.br/solutions/3d-printing>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.

IMPRESSORA Sethi3D S3. **Sethi3D**, 2020. Disponível em <<https://www.sethi3d.com.br/imprensa-sethi3d-s3>> Acesso em: 02 de nov. de 2020.

KHAN, Shaheryar Atta *et al.* Evaluation of the Effect of Infill Pattern on Mechanical Stregnth of Additively Manufactured Specimen. **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications Ltd, p. 128-132, 2017.

LACHNIT, Marco Antônio. **Compósito Termoplástico de PA-6/ABS e PA-6 copoliéster reforçado com fibra de vidro para aplicação em palmilha de montagem para calçado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, p. 73. 2018.

LI, Jiarong *et al.* FTIR analysis on aging characteristics of ABS/PC blend under UV-irradiation in air. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 184, p. 361-367, 2017.

LOCKER, Anatol. ABS Filament for 3D Printing – All You Need to Know. **All3DP**. Disponível em <<https://all3dp.com/abs-3d-printer-filament-explained/>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.

LUSTOSA, Emanuela Camargo de Barros *et al.* Propriedades térmicas de compósitos de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e fibras de celulose modificadas com nanopartículas de sílica (SiO₂). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 3, 2020.

MATERIAL JETTING. **Additively**, 2020. Disponível em <<https://www.additively.com/en/learn-about/material-jetting>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.

MAZZANTI, Valentina; MALAGUTTI, Lorenzo; MOLLICA, Francesco. FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties. **Polymers**, v. 11, n. 7, p. 1094, 2019.

MEDELLIN-CASTILLO, Hugo I.; ZARAGOZA-SIQUEIROS, Jorge. Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 32, n. 1, p. 53, 2019.

MESSIMER, Sherri L. *et al.* Full-density fused deposition modeling dimensional error as a function of raster angle and build orientation: Large dataset for eleven materials. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 3, n. 1, p. 6, 2019.

MOTAPARTI, Krishna Prasanth. **Effect of build parameters on mechanical properties of ultem 9085 parts by fused deposition modeling**, 2016. Disponível em <https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=8512&context=masters_theses>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.

NETTO, Joaquim Manoel Justino. **Caracterização da adesão em tecnologia LOM e proposta de mock-up de um sistema de deposição aplicado a uma impressora 3-D portátil**. Trabalho de Conclusão (Engenharia de Materiais e Manufatura) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo (USP). São Carlos, p. 29. 2015.

NGO, Tuan D. *et al.* Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 143, p. 172-196, 2018.

ORTEGA, João. Indústria 4.0: entenda o que é a quarta revolução industrial. **StartSe**. 2019. Disponível em: <<https://www.startse.com/noticia/nova-economia/industria-4-0-entenda-o-que-e-quarta-revolucao-industrial>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.

PICARD, Maisyn; MOHANTY, Amar K.; MISRA, Manjusri. Recent advances in additive manufacturing of engineering thermoplastics: challenges and opportunities. **RSC Advances**, v. 10, n. 59, p. 36058-36089, 2020.

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.

POWDER BED FUSION. **Malvern Panalytical**, 2020. Disponível em: <<https://www.malvernpanalytical.com/en/industries/advancedmaterials/powdermetallurgy/powder-bed-fusion/index.html>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.

PROPRIEDADES do filamento de ABS. **F3DB**, 2020. Disponível em <<https://www.filamentos3dbrasil.com.br/fichatecnica/>>. Acesso em: 02 de nov. de

REDDY, Srinivasulu; DUFERA, Solomon. Additive Manufacturing Technologies. **Best: International Journals of Management, Information Technology and Engineering** (BEST: IJMITE), v. 4, p. 2348-0513, 2016.

RODRIGUES, Vinícius Picanço *et al.* Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, v. 12, n. 3, p. 1, 2017.

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

SANTANA, Leonardo. **Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, p. 166. 2015.

SATHISH, T.; VIJAYAKUMAR, M. D.; AYYANGAR, Anshumaan Krishnan. Design and fabrication of industrial components using 3D printing. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 6, p. 14489-14498, 2018.

STEREOLITHOGRAPHY. **CustomPartNet**, 2020. Disponível em <<https://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.

SU, Amanda; AL'AREF, Subhi J. **History of 3D Printing**. In: 3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine. Academic Press, p. 1-10, 2018.

THE BOD – Europe's first 3D printed building. **COBOD**, 2020. Disponível em <<https://cobod.com/the-bod/>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.

TURKU, Irina; KASALA, Sushil; KÄRKI, Timo. Characterization of polystyrene wastes as potential extruded feedstock filament for 3D printing. **Recycling**, v. 3, n. 4, p. 57, 2018.

Winner of the European Inventor Award 2014 in the category Non-European countries. **European Patent Organisation (EPO)**, 2017. Disponível em: <<https://www.epo.org/news-events/events/europeaninventor/finalists/2014/hull.html>>. Acesso em: 02 de nov. de 2020.