



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

IGOR CESAR DE CARLOS ROSA

ESTUDO EXPERIMENTAL E TEÓRICO DAS INFLUÊNCIAS DOS PARÂMETROS DE
CONTROLE DA MANUFATURA ADITIVA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
FLEXÃO DO PLA EXTRUDADO

UBERLÂNDIA – MG

2019

ESTUDO EXPERIMENTAL E TEÓRICO DAS INFLUÊNCIAS DOS PARÂMETROS DE
CONTROLE DA MANUFATURA ADITIVA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
FLEXÃO DO PLA EXTRUDADO

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
**BACHAREL em ENGENHARIA
MECÂNICA.**

Área de concentração: Processos de
Fabricação e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi.

UBERLÂNDIA – MG

2019

ESTUDO EXPERIMENTAL E TEÓRICO DAS INFLUÊNCIAS DOS
PARÂMETROS DE CONTROLE DA MANUFATURA ADITIVA NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE FLEXÃO DO PLA EXTRUDADO

Projeto de fim de curso _____
pelo Colegiado do Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Faculdade de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia

Uberlândia, 12 de julho de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi, FEMEC/UFU – Orientador

Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior, FEMEC/UFU

Prof. Dr. Cleudmar Amaral de Araújo, FEMEC/UFU

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família Maria Elisa, Henrique Venceslau e Júlio Cesar que me auxiliaram ao longo destes árduos anos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi pela dedicação, paciência e orientação no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Professores Dr. Washington Martins da Silva Junior e Dr. Cleudmar Amaral de Araújo pela participação na banca de defesa e pelas preciosas contribuições.

Ao aluno de mestrado Giannini Barcellos de Oliveira pelo companheirismo e auxílio no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores, Dra. Núbia dos Santos Saad e Dr. Alexandre Zuquete Guarato pelo apoio intelectual e técnico oferecido ao longo deste trabalho.

Ao técnico Diego Augusto Alves pela paciência e auxílio no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Cleudmar Amaral de Araújo pelo apoio de materiais e infraestrutura, sem os quais não seria possível realizar esta pesquisa.

Ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU/FEMEC/UFU.

ROSA, Igor Cesar de Carlos Rosa. **Estudo experimental e teórico das influências dos parâmetros de controle da manufatura aditiva nas propriedades mecânicas de flexão do PLA extrudado**. 2019. 70 p. Projeto de Fim de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

RESUMO: Devido à crescente demanda da indústria por peças com baixo peso e elevada resistência mecânica, inviáveis economicamente ou dificilmente produzidas por técnicas tradicionais de usinagem (manufatura subtrativa), faz-se necessária a utilização de novas abordagens de fabricação. A manufatura aditiva (MA) vem ganhando destaque por conciliar a fabricação de objetos e conjuntos montados funcionais de macrogeometrias complexas em uma única etapa, associando diferentes materiais e propriedades. Apesar do aumento do interesse pela MA, as informações sobre as influências das variáveis de processo continuam escassas. A falta de normas técnicas para padronização dos parâmetros da MA reduzem a confiabilidade e compreensão dos comportamentos mecânicos de peças fabricadas por MA. Nesse contexto, o presente trabalho visa determinar as propriedades mecânicas do material PLA extrudado por meio de ensaios de flexão três pontos, além de apresentar novos métodos de cálculo considerando o momento de inércia de área real de peças com interior não homogêneo. Os parâmetros de entrada de impressão investigados foram: (a) porcentagem de preenchimento, (b) padrão de preenchimento, (c) orientação de construção, (d) espessura de contorno, (e) espessura da base e topo, (f) temperatura do bocal, (g) temperatura da mesa e (h) distância entre camadas. Os resultados apontam que o incremento da porcentagem do preenchimento após 30 % não é acompanhado da melhoria das propriedades mecânicas e os atuais métodos de análise da tensão de flexão não condizem com a teoria da Lei de Hook por apresentar uma significativa modificação do módulo de elasticidade para o mesmo material. O novo método proposto reduz estas alterações na rigidez e apresenta um tratamento de dados mais condizente com a teoria da Lei de Hook. Os resultados indicam que as tolerâncias dimensionais são afetadas pelos parâmetros de entrada, sendo que o aumento do número de camadas ou da temperatura de extrusão resultam em tolerâncias mais estreitas.

Palavra-chave: Manufatura Aditiva, Extrusão Polimérica, PLA, Otimização Mecânica, Normatização Experimental, Ensaio de Flexão Três Pontos.

ROSA, Igor Cesar de Carlos Rosa. **Estudo experimental e teórico das influências dos parâmetros de controle da manufatura aditiva nas propriedades mecânicas de flexão do PLA extrudado.** 2019. 70 p. End Course Project (Graduation in Mechanical Engineering) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

ABSTRACT: Due to the increasing demand of the industry for parts with low weight, high strength, and economically unviable produced by traditional machining techniques (subtractive manufacturing), it is necessary to use new approaches to manufacturing. The additive manufacturing (AM) is gaining prominence for its ability to reconcile the production of objects and functional assembled sets of complex macrogeometrias in one step, combining different materials and properties. Despite the increased interest in MA, information on the influence of process variables remain scarce and together with the lack of technical standards for standardization of parameters, generate a lack of reliability and understanding of the mechanical behavior of parts manufactured by MA. In this context, This study aims to determine the mechanical properties of the PLA materials extruded through three points bending tests, and presents new methods of calculation considering the actual area moment of inertia. The print input parameters investigated were the (a) percentage of fill, (b) fill pattern, (c) building orientation, (d) thickness contour, (e) the thickness of the base and top, (f) nozzle temperature, (g) table temperature and (h) distance between layers. The results show that increasing the percentage of fill after 30 % is not accompanied by improved mechanical properties and current analytical methods of bending tests are not consistent with the theory of Hooke's Law due the significant alteration of elastic modulus for the same material. The new proposed method decrease the change of the material's rigidity and shows a data processing more consistent with the Hook's Law. The results indicate that dimensional tolerance were affected by the input parameters, whereas the increased of the layer's number and extrusion temperature were responsible for the tighter tolerance.

Keywords: Additive Manufacturing, Polymer Extrusion, PLA, Mechanical Optimization, Experimental Standardization, Three-Point Bending Test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação industrial dos materiais usados na manufatura aditiva.....	16
Figura 2 - Fluxograma do método de produção por meio da manufatura aditiva.....	16
Figura 3 - Diagrama descritivo dos diferentes métodos de manufatura aditiva.....	18
Figura 4 - Processo de Estereolitografia (SLA).....	19
Figura 5 - Método de produção SGC.....	20
Figura 6 - Impressora FDM cartesiana de extrusão polimérica.....	22
Figura 7 - Impressora FDM Delta de extrusão polimérica.....	23
Figura 8 - Método de fabricação Ternojet.....	24
Figura 9 - Método de fabricação tipo LENS.....	25
Figura 10 - Método de fabricação SLS.....	26
Figura 11 - Método de fabricação LOM.....	27
Figura 12 - Montagem final do coletor de admissão fabricado por FDM.....	29
Figura 13 - Sistema completo de admissão com os sensores e revestimento instalados.....	29
Figura 14 - Conjunto de ligação entre três dentes produzido por meio da LENS.....	30
Figura 15 - Procedimento de simulação da cirurgia dividido em quatro etapas: (A) modelamento, (B) fabricação, (C) montagem e (D) realização do procedimento cirúrgico	30
Figura 16 - Estratégias de preenchimento comumente aplicadas: Diagonal e Hexagonal.....	31
Figura 17 - Demonstração do incremento da porcentagem de preenchimento hexagonal.....	32
Figura 18 - Demonstração gráfica das formas de deposição de material.....	33
Figura 19 - Orientação do preenchimento na manufatura aditiva.....	34
Figura 20 - Sequência teórica de deposição dos filamentos da primeira camada.....	34
Figura 21 - Ilustração da distância entre camadas depositadas.....	36
Figura 22 - Demonstração do preenchimento Hexagonal (PH) e diagonal (PD) de peças produzidas com 10 % de preenchimento interno.....	39
Figura 23 - Demonstração da porcentagem de preenchimento dos CP de 0 % a 30 % de preenchimento.....	40
Figura 24 - CP produzido com temperatura de extrusão do bocal superior ao recomendado para o filamento.....	42

Figura 25 - Comparação entre as camadas guias utilizadas para nivelamento da mesa da impressora, sendo mesa em (a) posição elevada, (b) correta e (c) abaixo da altura ideal.	44
Figura 26 - Dimensões de projeto do corpo de prova segundo ASTM D790-17: espessura (A = 3,20 mm), largura (B = 12,70 mm) e comprimento (C = 127,00 mm).....	45
Figura 27 - (A) corpos de prova recém impressos e identificados e (B) embalados.	46
Figura 28 - Curva tensão por deformação do primeiro corpo de prova no ensaio de flexão três pontos.	47
Figura 29 - Corpo de prova com 0 % de preenchimento.	50
Figura 30 - Corpo de prova com 10 % de preenchimento.	50
Figura 31 - Corpo de prova com 20 % de preenchimento.	50
Figura 32 - Corpo de prova com 30 % de preenchimento.	51
Figura 33 - Medias geométricas da espessura (A) e largura (B) do corpo de prova para preenchimento hexagonal (PH) e preenchimento diagonal (PD).	54
Figura 34 - Medias geométricas da espessura (A) e largura (B) do corpo de prova para orientação de construção (OC), espessura de contorno (EC) e Espessura de base e topo (EBT).	54
Figura 35 - Medias geométricas da espessura (A) e largura (B) do corpo de prova para temperatura de extrusão do bocal (TEB), temperatura da mesa (TM) e distância entre camadas (DCD).	55
Figura 36 - Módulo de elasticidade Chord do corpos de prova para preenchimento hexagonal (PH) e diagonal (PD).	59
Figura 37 - Módulo de elasticidade Chord dos corpos de prova para orientação de construção (OC), espessura de contorno (EC) e espessura de base e topo (EBT).	60
Figura 38 - Módulo de elasticidade Chord dos corpos de prova para temperatura de extrusão do bocal (TEB), temperatura da mesa (TM) e distância entre camadas (DCD).	61
Figura 39 - Tensão de flexão máxima dos corpos de prova para preenchimento (PH) e diagonal (PD).	62
Figura 40 - Tensão de flexão máxima dos corpos de prova para orientação de construção (OC), espessura de contorno (EC), e espessura de base e topo (EBT).	63
Figura 41 - Tensão de flexão máxima dos corpos de prova para temperatura de extrusão do bocal (TEB), temperatura da mesa (TM) e distância entre camadas (DCD).	64

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de deposição de material polimérico.	37
Tabela 2 - Tolerâncias geométricas das peças impressas por extrusão de PLA em função dos parâmetros do processo de preenchimento hexagonal (PH) e diagonal (PD). As marcações em preto identificam as tolerâncias colineares com o movimento vertical da mesa, as em cinza as medições realizadas no plano de deposição das camadas e as em azul quando as duas tolerâncias obtiveram a mesma categoria.	56
Tabela 3 - Tolerâncias geométricas das peças impressas por extrusão de PLA em função dos parâmetros do processo: Orientação de construção (OC), espessura de contorno (EC), espessura de base e topo (EBT), temperatura de extrusão do bocal (TEB), temperatura da mesa (TM), e distância entre camadas (DCD). As marcações em preto identificam as tolerâncias colineares com o movimento vertical da mesa, as em cinza as medições realizadas no plano de deposição das camadas e as em azul quando as duas tolerâncias obtiveram a mesma categoria.	56

LISTAS DE SÍMBOLOS

T _{med}	Temperatura Média
CP.....	Corpo de Prova
MA.....	Manufatura Aditiva
PH.....	Preenchimento Hexagonal
PD.....	Preenchimento Diagonal
OC.....	Orientação de Construção
EC.....	Espessura de Contorno [mm]
EBT.....	Espessura de Base e Topo [mm]
TEB.....	Temperatura de Extrusão do Bocal [°C]
TM.....	Temperatura da Mesa [°C]
DCD.....	Distância entre Camadas Depositadas [mm]
PC-ABS.....	PoliCarbonato Acrilonitrilo- Butadieno Estireno
ABS.....	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
PLA.....	Ácido Poliláctico
SLA.....	Estereolitografia
SGC.....	<i>Solid Ground Curing</i>
FDM.....	<i>Fused Deposition Modeling</i>
LENS.....	<i>LASER Engineered Net Shaping</i>
3D Printing.....	<i>Three-dimensional printing</i>
LOM.....	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
SFP.....	<i>Solid Foil Polymerization</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Objetivos.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Manufatura Aditiva.....	15
2.2. Fabricação de Peças por Manufatura Aditiva.....	16
2.3. Os Processos de Manufatura Aditiva.....	17
2.3.1 Estereolitografia (SLA).....	19
2.3.2 <i>Solid Ground Curing</i> (SGC).....	19
2.3.3 <i>POLYjet</i>	21
2.3.4 <i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM).....	21
2.3.5 <i>Termojet</i>	23
2.3.6 <i>LASER Engineered Net Shaping</i> (LENS).....	24
2.3.7 <i>Selective LASER Sintering</i> (SLS).....	25
2.3.8 <i>Three-dimensional printing</i> (3D Printing).....	27
2.3.9 <i>Laminated Object Manufacturing</i> (LOM).....	27
2.3.10 <i>Solid Foil Polymerization</i> (SFP).....	28
2.4. Aplicação da Manufatura Aditiva.....	28
2.6 Parâmetros de Fabricação por Deposição de Material Polimérico.....	31
2.6.1 Padrão de preenchimento.....	31
2.6.2 Porcentagem de preenchimento.....	32
2.6.3 Orientação de construção.....	32
2.6.4 Orientação de preenchimento.....	33
2.6.5 Espessura de contorno.....	34
2.6.6 Temperatura de extrusão do bocal.....	35
2.6.7 Temperatura da mesa.....	35
2.6.8 Distância entre camadas.....	35
2.6.9 Quantidade de peças fabricadas por ciclo.....	36

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	37
3.1. Escolha dos Parâmetros da Manufatura Aditiva.....	37
3.2.1 Forma de preenchimento.....	38
3.2.2 Porcentagem de preenchimento	39
3.2.3 Orientação de construção	40
3.2.4 Orientação de preenchimento.....	40
3.2.5 Espessura de contorno.....	40
3.2.6 Espessura de base e topo	41
3.2.7 Temperatura de extrusão do bocal	41
3.2.8 Temperatura da mesa	42
3.2.9 Distância entre camadas	42
3.2.10 Quantidade de peças produzidas sequencialmente	43
3.3 Fabricação.....	43
3.4 Caracterização Geométrica.....	44
3.5 Armazenamento.....	45
3.6 Testes de Flexão Três Pontos	46
3.7 Tratamento de Dados.....	48
3.7.1 Medição dimensional	48
3.7.2 Cálculo da tensão de flexão três pontos	48
3.7.3 Módulo de elasticidade <i>Chord</i>	51
3.7.4 Propagação de incertezas	52
4. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	53
4.1 Caracterização Geométrica - Exatidão	53
4.2 Caracterização Geométrica - Precisão.....	56
4.3 Módulo de Elasticidade <i>Chord</i>	58
4.5 Tensão Máxima de Flexão Três Pontos.....	61
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

O término da proteção industrial da tecnologia de extrusão de materiais poliméricos patenteada pela Stratasys como *Fused Deposition Modeling (FDM)*, em 2014, gerou rápido aumento na produção de máquinas e serviços com redução no preço das impressoras e matérias primas (COON *et al.*, 2016). As tardias investigações deste método de fabricação limitaram os estudos realizados nesta área e, conseqüentemente, não elucidaram a influência de todos os parâmetros de processo e suas associações na resistência mecânica do impresso. Muitos parâmetros ainda não foram analisados cientificamente, e muitos dos resultados já apresentados não podem ser extrapolados para diferentes materiais, conjuntos geométricos e métodos e técnicas de MA. No momento ainda existem muitas incertezas relativas ao comportamento estático, e principalmente dinâmico, de peças produzidas por FDM ou extrusão polimérica (SINGH *et al.*, 2016; BRIAN *et al.*, 2014).

Durante o processo, a matéria prima, tradicionalmente em forma de filamento, é fundida e extrudada seletivamente, e a peça é fabricada por meio da deposição de material camada a camada (STANBURY; IDACAVAGE, 2016). Dentre os diversos e crescentes tipos de termoplásticos, destacam-se o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o poliácido láctico (PLA) (STANSBURYA; IDACAVAGE, 2016; CHACÓN *et al.*, 2017; EYERS; OTTER, 2017). O PLA se destaca pelo menor ponto de fusão (T_{med} de 190 °C; $130\text{ °C} < T_{med} < 243\text{ °C}$, MATWEB, 2019) frente ao ABS (T_{med} de 222 °C; $180\text{ °C} < T_{med} < 274\text{ °C}$, MATWEB, 2019), além de ser biodegradável, reciclável e biocompatível (FRANCO *et al.*, 2016).

Em determinadas aplicações da tecnologia de MA, é possível variar a geometria e a porcentagem do padrão de preenchimento do objeto impresso. Entretanto, não há normas específicas para obtenção da resistência mecânica de peças fabricadas por MA com vazios internos controlados. A ASTM D790-17 – *Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials* é uma norma utilizada para determinação de propriedades de peças feitas por MA. Todavia, apesar de proporcionar orientações sobre as configurações dos aparatos e máquinas, número mínimo de testes e geometria aproximada dos corpos de prova (CP's), não apresenta qualquer comentário sobre o

critério (ordem ou quantidade) de produção das peças ou métodos de análise da tensão para CP's com interior não totalmente preenchido.

1.1. Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de propor um novo método para determinar as propriedades mecânicas, considerando a real geometria da seção transversal analisada no ensaio de flexão três pontos de peças fabricadas por MA com interior não homogêneo. A proposta leva em consideração o momento de inércia de área real dos corpos de prova para avaliar as propriedades mecânicas do impresso em função da modificação dos parâmetros de entrada do processo de extrusão do PLA, a saber: (a) forma de preenchimento hexagonal (PH) ou diagonal (PD), (b) porcentagem de preenchimento (P), (c) orientação de construção (OC), (d) espessura de contorno (EC), (e) espessura de base e topo (EBT), (f) temperatura de extrusão do bocal (TEB), (g) temperatura da mesa (TM) e (h) distância entre camadas (DCD).

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica desta pesquisa foi baseada em artigos de periódicos e anais de congressos pertinentes aos métodos de MA, aplicações do processo, propriedades mecânicas e químicas dos materiais poliméricos.

2.1. Manufatura Aditiva

De acordo com o comitê técnico ASTM, o termo manufatura aditiva (MA) pode ser definido como um processo de união de materiais para produção de peças a partir de dados do modelo tridimensional (3D), geralmente camada por camada, em oposição a manufatura subtrativa (ASTM F42 – 10). O processo também é conhecido como fabricação aditiva, processamento aditivo, fabricação digital aditiva, prototipagem rápida, fabricação rápida e fabricação por camadas. O termo MA descreve os processos de fabricação aditiva de forma ampla, incluindo a manufatura de protótipos e peças conceituais a peças funcionais com propriedades mecânicas necessárias para serviços industriais (GOU *et al.*, 2013).

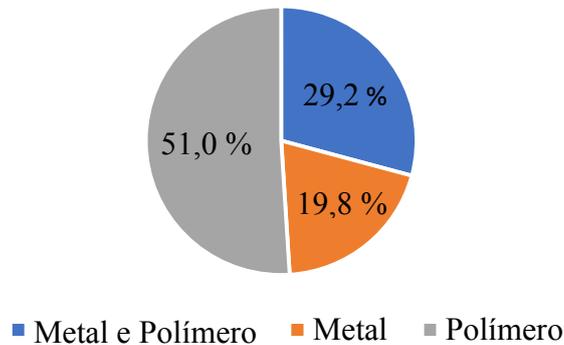
As principais características deste método de fabricação são: redução no consumo de material para produção, velocidade elevada de produção de protótipos e capacidade de fabricação de geometrias únicas, dificilmente alcançadas por métodos convencionais de usinagem (CHEAH *et al.*, 2005).

Diversos processos de MA começaram a ser estudados e desenvolvidos comercialmente no final da década de 1980, dentre eles os principais incluem estereolitografia (SLA), *Fused deposition Modeling* (FDM), sinterização seletiva a *LASER* (SLS), impressão tridimensional (3DP), *Laminated Objective Manufacturing* (LOM) (GROS *et al.*, 2014) e *LASER engineered net shaping* (LENS) (AMANO *et al.*, 2011).

O consumo global de máquinas de MA, materiais de impressão, peças, *software* e serviços relacionados totalizou mais de US \$ 13 bilhões 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 aproximadamente 29 bilhões de dólares em receita são esperados até 2020

(DIZON *et al.*, 2017). Segundo WONG *et al.*, 2017, a maioria das peças produzidas por MA são fabricadas com materiais poliméricos, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Aplicação industrial dos materiais usados na manufatura aditiva.

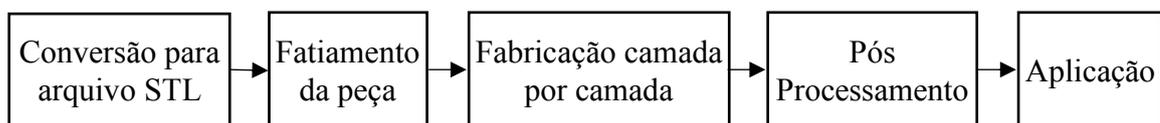


Fonte: WONG *et al.*, 2017 (Adaptado).

2.2. Fabricação de Peças por Manufatura Aditiva

O processo de fabricação por manufatura aditiva tem início na modelagem da peça em um *software* CAD. Após a modelagem é realizado a conversão do arquivo para o formato STL, o qual consiste na repartição da peça em camadas e construção do corpo camada por camada. A Figura 12 apresenta o fluxograma da fabricação típica das peças neste método. Devido à qualidade de impressão ou aplicação final da peça, o posterior processamento pode não ser necessário (CHEAH *et al.*, 2005).

Figura 2 - Fluxograma do método de produção por meio da manufatura aditiva.



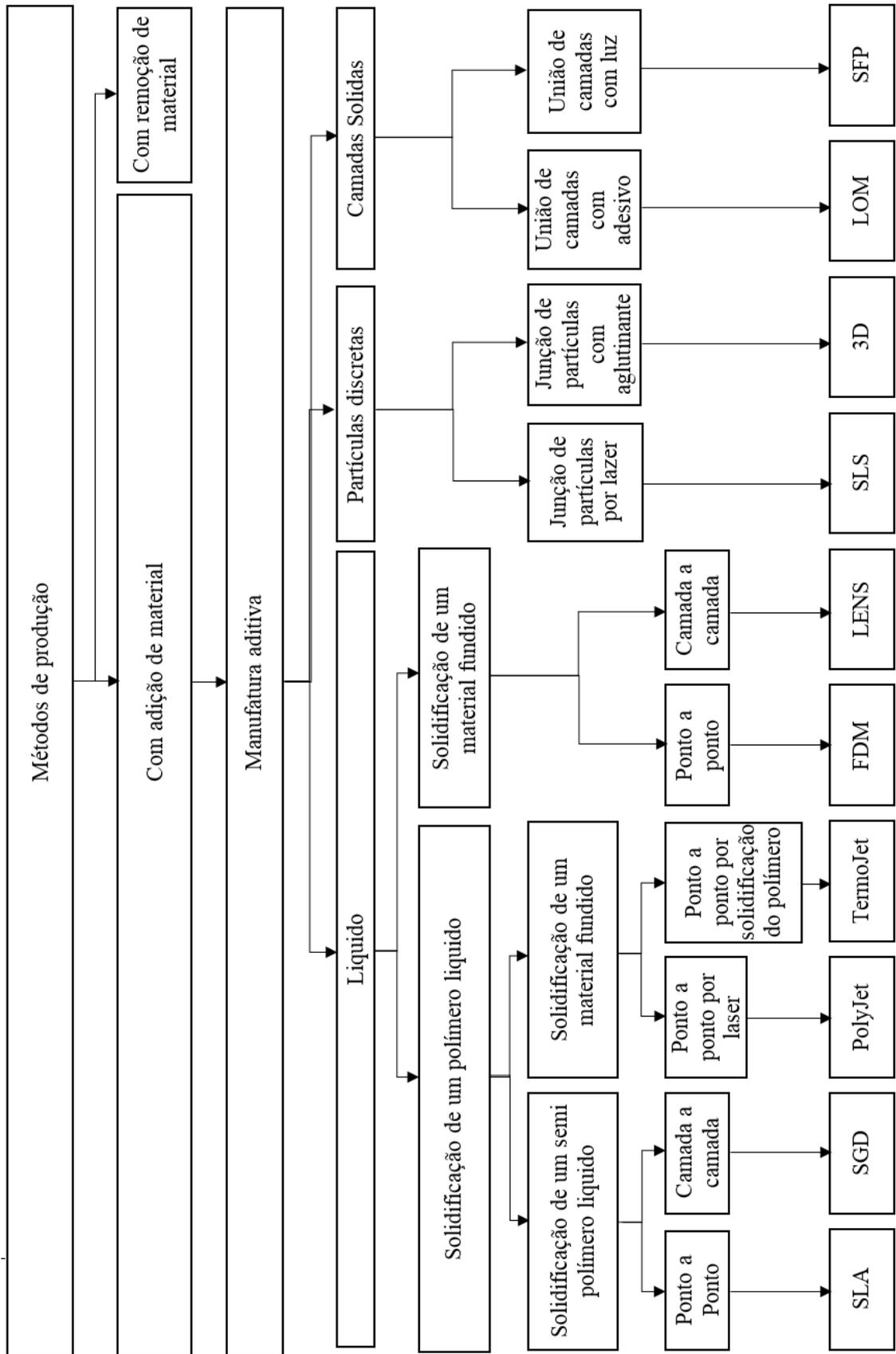
Fonte: CHEAH *et al.*, 2005 (Adaptado).

2.3. Os Processos de Manufatura Aditiva

Nos últimos anos, diversos processos de manufatura aditiva foram introduzidos no mercado por indústrias detentoras dessa tecnologia (GOLDSBERRY 2009). Entre essas empresas, pode-se citar a *Electro Optical Systems* (EOS) na Alemanha, *Arcam* na Suécia, *MCP Tooling Technologies* no Reino Unido, e *Stratasys*, *3D Systems*, *Optomec* e *Z Corporation* nos Estados Unidos da América (GOU *et al.*, 2013).

A norma ASTM F42 – 10 classifica os processos de MA em sete áreas, *binder jetting*, *directed energy deposition*, *material extrusion*, *material jetting*, *powder bed jetting*, *sheet lamination* e *vat photopolymerization*. Nesta pesquisa o sistema de classificação dos processos de MA foi desenvolvido pelo próprio autor, de tal forma, os processos foram divididos em dez categorias, e cada categoria foi representada por um tipo de máquina (e registrada por patente), sendo elas: SLA (Estereolitografia), SGD (*Solid Ground Curing*), POLYjet, TERMOJet, FDM (*Fused Deposition Modeling*), LENS (*LASER Engineered Net Shaping*), SLS (*Selective LASER Sintering*), 3D, LOM (*Laminated Object Manufacturing*) e SFP (*Solid Foil Polymerization*). O método de classificação foi realizado considerando o princípio físico e método de geração da camada produzida, sendo esta divisão apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama descritivo dos diferentes métodos de manufatura aditiva

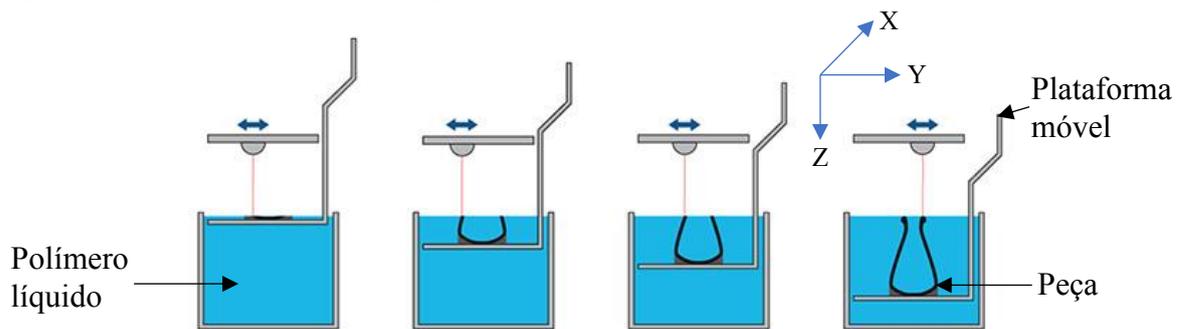


Fonte: Autor.

2.3.1 Estereolitografia (SLA)

Processo patenteado em 1988, a estereolitografia é considerada o método pioneiro da manufatura aditiva e comumente é utilizada como modelo de comparação (BOURELL *et al.*, 2017). Na estereolitografia é utilizado um *LASER* para polimerizar um polímero líquido no qual a peça está sendo banhada, de tal forma o polímero utilizado deve possuir a sensibilidade para rápida polimerização quando exposto a um comprimento de onda eletromagnética específico. Neste método, uma plataforma móvel é montada dentro do reservatório preenchido pelo polímero, como indicado pela Figura 4 esta plataforma situa se de tal forma que a parte superior da peça esteja próxima da superfície do líquido (aproximadamente 150 μm) (SILVA 2008).

Figura 4 - Processo de Estereolitografia (SLA).



Fonte: <https://i.materialise.com> (Adaptado).

Conforme mostrado pela Fig. 4, a produção camada por camada por meio do processo SLA acontece com o movimento nos eixos X e Y (plano horizontal) realizado pelo cabeçote em que o *LASER* está apoiado, enquanto o movimento em Z (vertical) é realizado pela plataforma (SILVA 2008).

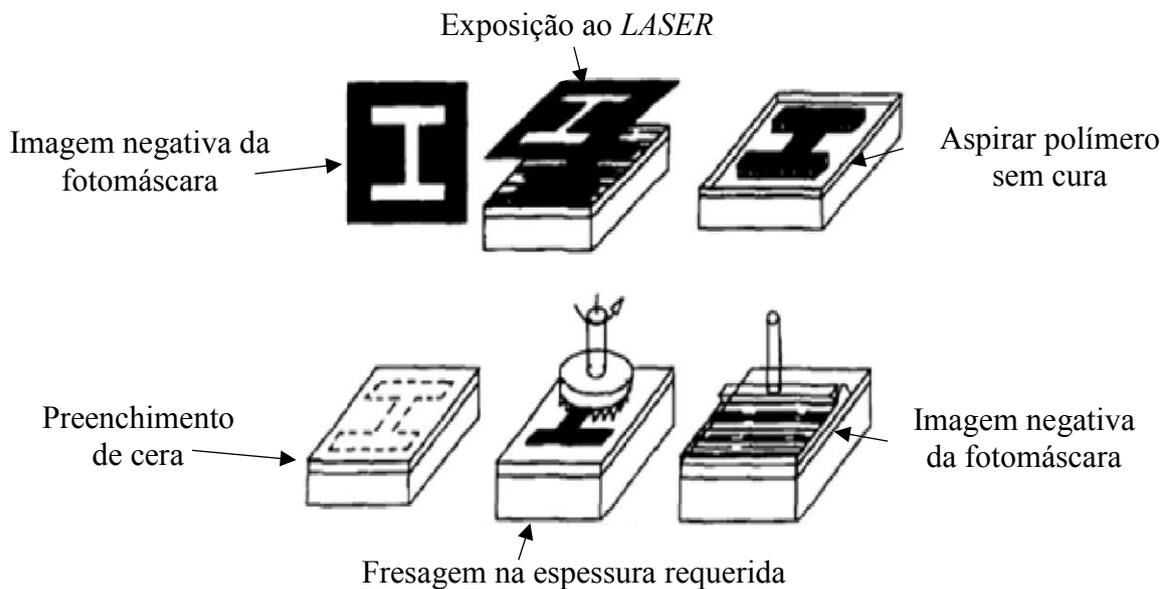
2.3.2 Solid Ground Curing (SGC)

No SGC, o método de produção de cada camada é semelhante à estereolitografia, em que os polímeros também são enrijecidos por meio de radiação ultravioleta. A grande diferença está na cura da camada em uma única vez. Inicialmente, a resina é depositada sobre

a plataforma suporte da peça, em seguida, uma foto-máscara com propriedades de reflexão de radiação ultravioleta é gerada na forma do contorno externo da superfície a ser criada.

A Figura 5 exibe a foto-máscara impressa em uma placa de vidro localizado em cima da plataforma de construção de tal forma que, a região interna da placa de vidro seja transparente e os raios ultravioletas sejam bloqueados pela foto-máscara posicionada no exterior. Após a instalação da imagem negativa um *LASER* fornece uma grande quantidade de radiação ultravioleta sobre toda a plataforma, porém apenas os perfis logo abaixo da parte transparente do vidro serão afetados (YAN *et al.*, 1996). Após a conclusão desta etapa, a máquina remove o excesso de resina líquida e cera é borrifada para servir de suporte à peça durante a sua construção. O processo é repetido até obter-se o objeto desejado, de modo que após a finalização da fabricação, a peça é mergulhada em solvente para remover a cera usada no suporte (KOTLINSKI *et al.*, 2014).

Figura 5 - Método de produção SGC.



Fonte: YAN *et al.*, 1996 (Adaptado).

2.3.3 POLYjet

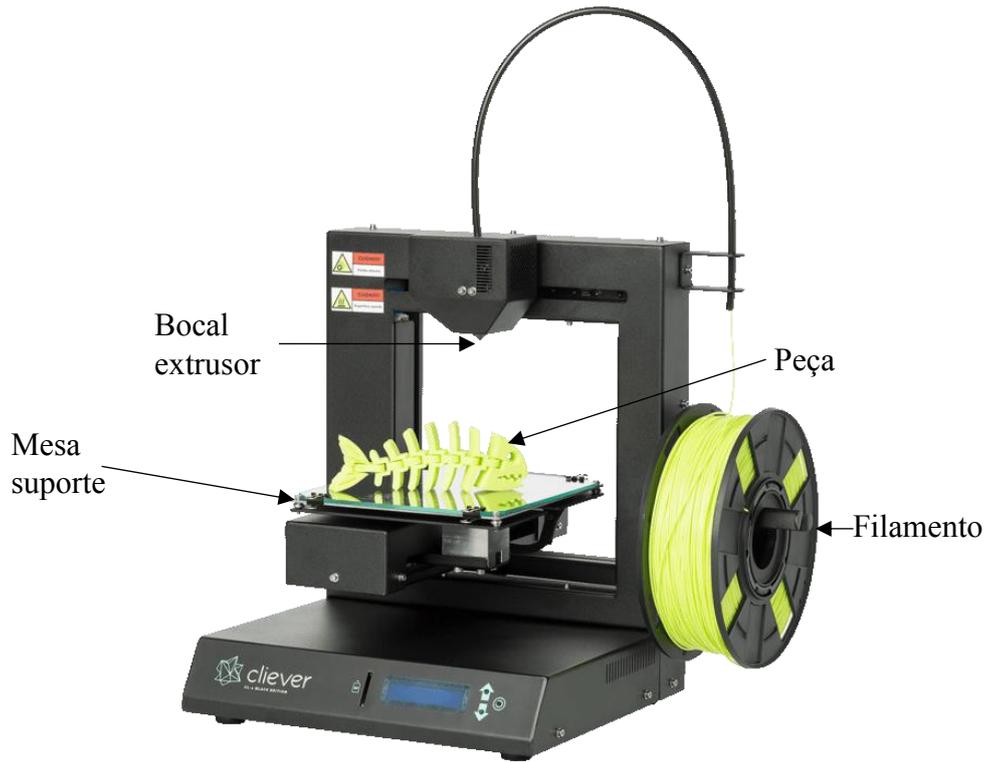
Processo em que a máquina expelle, por meio de um bocal, gotículas de um fotopolímero líquido, e cura o material com uma luz UV logo em seguida. A espessura da camada está limitada a relação de quantidade de material que é expelido do bocal com o avanço do bocal. Este método pode produzir peças de grande complexidade e com bom acabamento, porém existem grades limitações de materiais que podem ser utilizados, e as peças não apresentam boa resistência mecânica (DIZON *et al.*, 2018).

Existem dois tipos de materiais que são utilizados para fabricação. Um polímero utilizado para construção da peça, e um gel foto curável, utilizado como suporte. Após a finalização do processo o material do suporte é removido com um jato de água. É comum a utilização de resina epóxi fotossensível com uma pequena porcentagem de cera como material de produção da peça (SILVA, 2008).

2.3.4 Fused Deposition Modeling (FDM)

Neste processo a camada é criada a partir de um filamento contínuo de termoplástico fundido que é expelido através de um bocal aquecido por uma resistência elétrica. A maioria das máquinas apresenta sistema cartesiano de movimentação dos três eixos lineares. Tipicamente o bocal movimenta-se nos eixos X e Y, e movimento em Z é realizado pela mesa que suporta o impresso, como ilustrado pela Fig.6 (HE *et al.*, 2016). Outro método de aplicação dos movimentos do bocal é apresentado na Figura 7 por meio do deslocamento em delta.

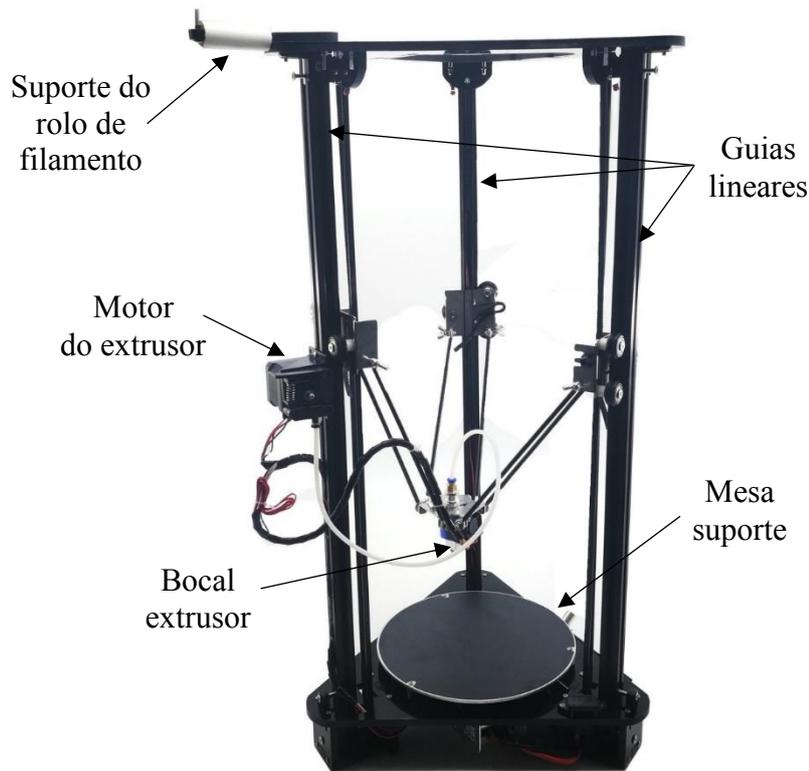
Figura 6 - Impressora FDM cartesiana de extrusão polimérica.



Fonte: <https://clever.com/> (Adaptado).

Durante a fabricação é comum a necessidade da utilização de uma mesa aquecida para reduzir as distorções térmicas provenientes de grandes diferenciais de temperatura. Em muitas máquinas é comum a aplicação de um segundo tipo material para criar suportes as geometrias, este material geralmente possui resistência mecânica reduzida para facilitação da remoção após a finalização da peça (KOTLINSKI *et al.*, 2014).

Figura 7 - Impressora FDM Delta de extrusão polimérica.

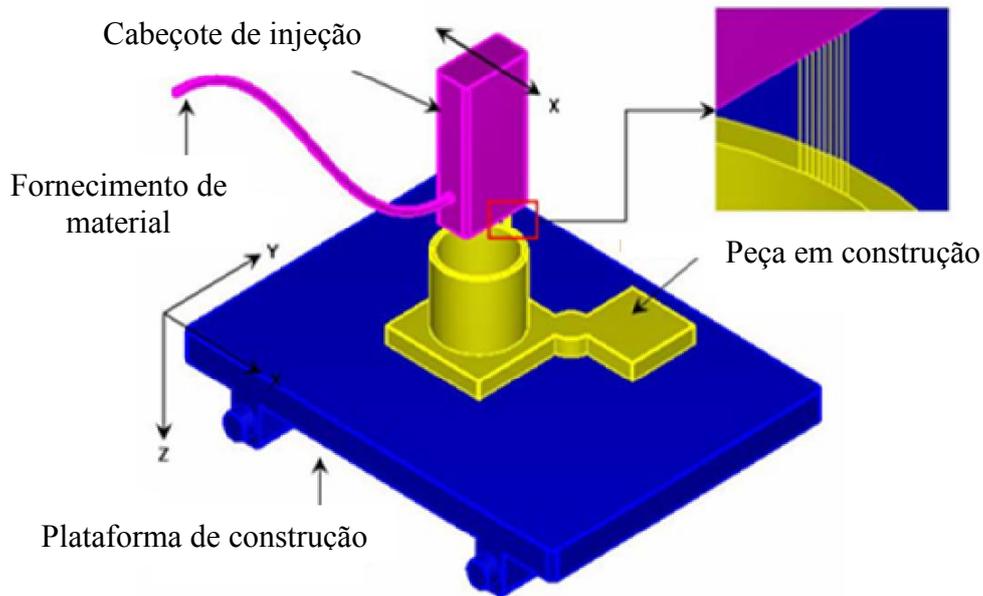


Fonte: <https://www.lojapuzzles.com.br/deltatrilho> (Adaptado).

2.3.5 Termojet

Neste processo a camada é formada de forma semelhante ao método Polyjet, porém não é utilizado qualquer tipo de equipamento com luz UV. O material é aquecido e depositado sobre a camada anterior em formas de gotas, que se solidificam logo em seguida (BIKAS *et al.*, 2014). Este processo pode ser acelerado com o uso de múltiplos orifícios de saída como pode ser apresentado na Figura 8 (SILVA, 2008).

Figura 8 - Método de fabricação Termojet



Fonte: SILVA, 2008 (Adaptado).

A disposição dos furos pode ser realizada tanto no eixo X quanto no Y, a quantidade extra de furos pode ser utilizada para cobrir uma maior área de deposição, ou aumentar a quantidade de material depositado por camada (SILVA, 2018).

Os principais materiais utilizados com este equipamento são ceras e termo polímeros. Devido à natureza do processo e dos materiais utilizados nesse método é necessário o uso de reaquecimento das peças para obtenção de maior qualidade dos produtos (BOURELL *et al.*, 2017).

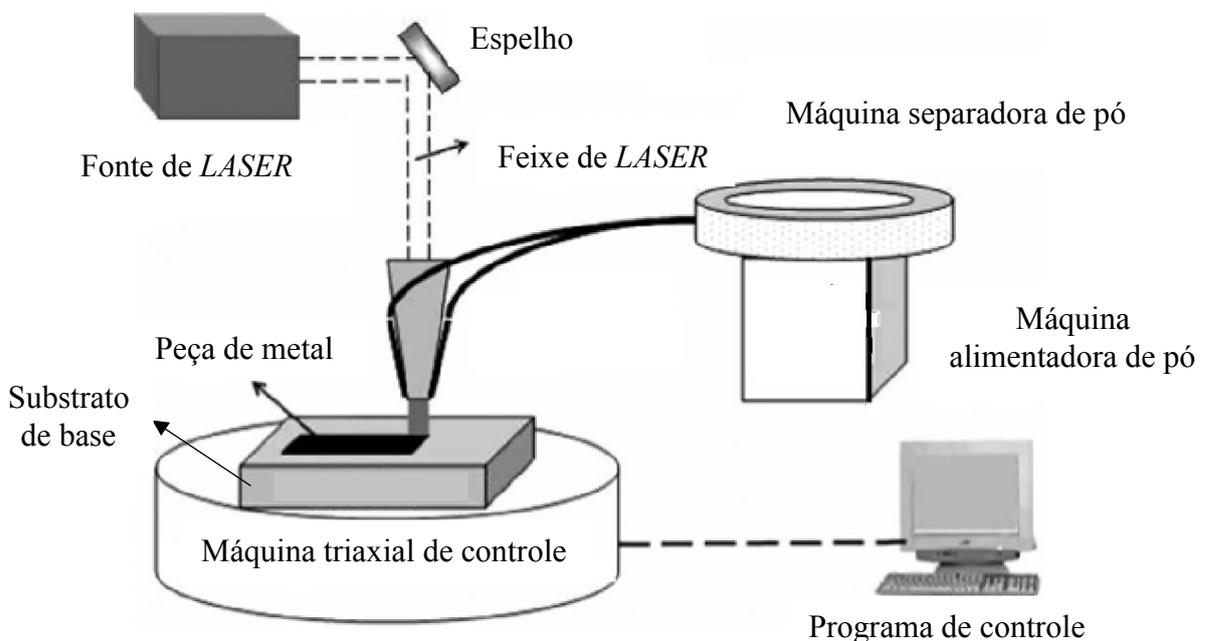
2.3.6 LASER Engineered Net Shaping (LENS)

Neste método, pó metálico é depositado sobre uma região e logo em seguida um LASER de alta potência é usado para fundir o pó. A Figura 9 representa esquematicamente o método de produção LENS. Tanto o bocal de deposição quanto o LASER possuem 2 graus de liberdade de movimentação, que se movem para formar o perfil bidimensional da camada a ser construída. Após a construção da camada a plataforma se move no eixo Z, para a criação de uma nova camada (BOURELL *et al.*, 2017). A deposição de pó é realizada por gravidade ou a partir de um gás inerte pressurizado. Caso seja utilizado o gás, ele deve ser fornecido constantemente mesmo em regiões em que não existe a necessidade de adição de pó metálico,

para ocorrência de propriedades metalúrgicas e adesão entre camadas constantes (BIKAS *et al.*, 2014;).

Podem ser utilizados pós de diferentes tipos de ligas metálicas como: aço inoxidável, Inconel, titânio, cobre e alumínio. Porém para diferentes tipos de ligas faz-se necessária uma potência gerada do raio *LASER* condizente com o material utilizado. Este método é capaz de produzir peças com boa microestrutura e propriedades metalúrgicas em muitos tipos de materiais e com velocidade satisfatória, porem possui preço muito elevado (BOURELL *et al.*, 2017; BIKAS *et al.*, 2014).

Figura 9 - Método de fabricação tipo LENS.



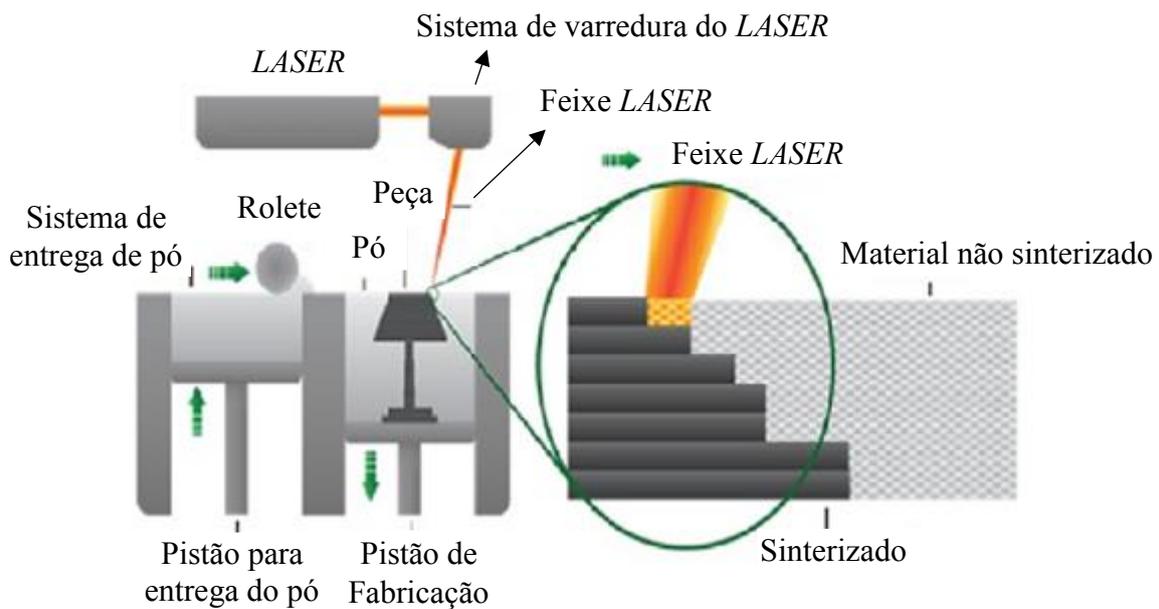
Fonte: <http://sustainableskies.org> (Adaptado).

2.3.7 Selective LASER Sintering (SLS)

A comercialização desta máquina começou em 1992, esta técnica de produção consiste na utilização de um *LASER* que sintetiza o material em pó. O material é depositado sobre a plataforma e logo em seguida um *LASER* de alta precisão é utilizado para fundir o material. Após a realização da sinterização de toda a camada a plataforma se movimenta para baixo e uma nova camada de pó é adicionado sobre a plataforma (DIZON *et al.*, 2017). O processo SLS é semelhante ao processo LENS, sendo que as únicas diferenças estão no método de

deposição do pó, que é realizado no início da fabricação da camada. A função de suporte é exercida pelo excesso de pó que é deixado após a produção de cada camada (BIKAS *et al.*, 2014). A Figura 10 ilustra o método de produção SLS.

Figura 10 - Método de fabricação SLS.



Fonte: <http://rapidprototypingservicescanada.com/> (Adaptado).

Teoricamente, qualquer tipo de material que possa ser transformado em pó pode ser utilizado neste processo, como por exemplo, cerâmica, elastômero, nylon, poliamida com microesferas de vidro e metais. Porém, para cada tipo de material requer uma velocidade de processamento diferente desde que a potência do LASER seja constante. Quando utilizado materiais metálicos é necessário o pós-processamento do material em forno à alta temperatura (BOURELL *et al.*, 2017; BIKAS *et al.*, 2014; SILVA, 2008).

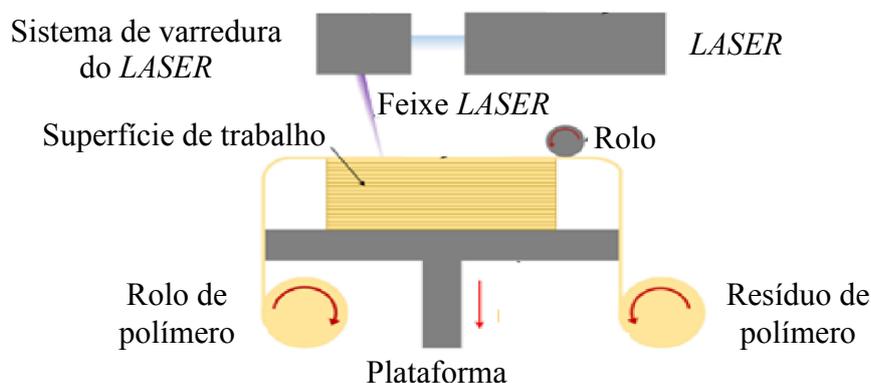
2.3.8 Three-dimensional printing (3D Printing)

Neste processo, uma camada de pó é depositada sobre a superfície da plataforma de suporte, de modo que após a realização desta etapa um material aglutinador ou ligante é colocado nas regiões para solidificação da peça. Ao final da etapa de deposição do ligante sobre toda a superfície desejada, a plataforma é movida verticalmente para baixo e uma nova camada de pó é depositada sobre a superfície. Este processo é repetido até que toda a peça seja fabricada. Após o processamento da peça é necessário a realização de tratamento térmico para otimizar o efeito do ligante que foi aplicado (SILVA, 2008; BOURELL et al., 2017).

2.3.9 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Neste método, a peça é construída por meio de adição de material laminado, os quais são subsequentemente cortados nas dimensões requeridas por um *LASER* de alta precisão. Como pode ser visualizado na Fig. 11, a adição e remoção do papel laminado são realizadas por dois rolos, um responsável por adicionar material e outro em recolher as partes que não serão utilizadas na peça. A espessura de cada camada é igual a espessura da lâmina de material depositado, cada lâmina adicionada possui superfície adesiva originada de uma cola que é ativada pelo calor. Após o material de sobra ser recolhido, a plataforma em que a peça está apoiada é rebaixada e se inicia um novo ciclo de processo de fabricação de camada (BOURELL et al., 2017; BIKAS et al., 2014; YAN et al., 1996).

Figura 11 - Método de fabricação LOM.



Fonte: HE et al., 2016 (Adaptado).

2.3.10 Solid Foil Polymerization (SFP)

A Polimerização de sólidos em camadas ou *Solid Foil Polymerization* apresenta uma dinâmica de funcionamento muito semelhante ao LOM, ou seja, a adição de material laminado é realizada por dois rolos. As duas principais diferenças entre esses dois métodos são o princípio físico da geração de camada e os tipos de materiais utilizados (DIZON et al., 2018). O princípio do método SFP consiste na polimerização do material sólido semipolarizado em forma de lâmina que é adicionado sobre cada camada da peça. Os materiais utilizados neste método são restritos a semipolímeros (BIKAS et al., 2014).

2.4. Aplicação da Manufatura Aditiva

O desenvolvimento das técnicas de MA progrediu significativamente nos últimos anos, aumentando expressivamente a aplicabilidade nas indústrias e utilização em uso doméstico (DIZON et al., 2018). Segundo Gou et al. (2013), a manufatura aditiva apresenta uma ótima capacidade de produção de peças com volume reduzido, geometrias complexas e a alta capacidade de otimização e personalização. Estas características se tornam decisivas na fabricação de peças no setor aeroespacial, automobilístico e biomédico, por exemplo.

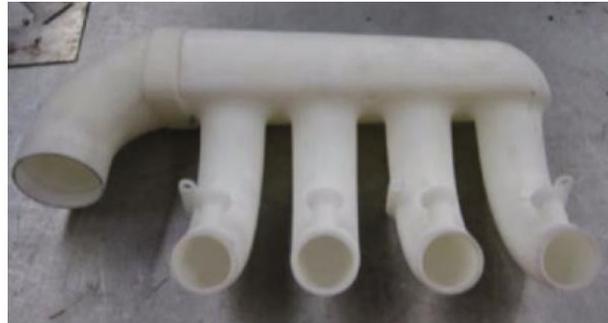
O setor aeroespacial é caracterizado pela necessidade de peças de alta complexidade e massa reduzida, tornando a manufatura aditiva um método de fabricação recomendado. O reparo de peças ou sistemas também pode ser realizado por meio da MA, sendo as principais vantagens o aumento de vida de equipamentos como compressores, turbina, lâminas e dispositivos de acoplamento (GOU et al., 2013).

O desenvolvimento de novos produtos é essencial para indústria automotiva, porém este processo pode consumir muito tempo e recursos financeiros da empresa. Nos últimos anos, a indústria automotiva optou por aplicar a manufatura aditiva para a fabricação de protótipos com o objetivo de redução dos gastos de tempo e recursos financeiros investidos. Os principais tipos de protótipos fabricados são os exaustores, os coletores de admissão, eixo cardam, componentes da transmissão e do sistema de freio (GOU et al., 2013).

Um coletor de admissão fabricado por uma máquina de FDM Stratasys Dimension SST é apresentado na Figura 132, o qual foi produzido em ABS. Na Figura 13 é apresentado

o mesmo equipamento já montado e pronto para utilização, em que já foram instalados o revestimento e sensores necessários para o funcionamento.

Figura 12 - Montagem final do coletor de admissão fabricado por FDM.



Fonte: ILARDO *et al.*, 2010.

Figura 13 - Sistema completo de admissão com os sensores e revestimento instalados.



Fonte: ILARDO *et al.*, 2010.

Na área da bioengenharia, a MA se destaca pela capacidade de fabricação de peças de inúmeros materiais e geometrias complexas. Estas características proporcionaram a capacidade de fabricação de estruturas para ossos e dentes a vasos sanguíneos e órgãos. A grande liberdade de projeto da MA também se sobressai neste campo devido a capacidade de individualizar o tratamento e produzir peças específicas para cada paciente (GROSS *et al.*, 2014). Muitos materiais podem ser utilizados para a fabricação de próteses e dentes, como é o caso da liga de titânio Ti6Al4V. Na Figura 14 é apresentada um dente desta liga, fabricado com LENS para substituir os dentes do paciente.

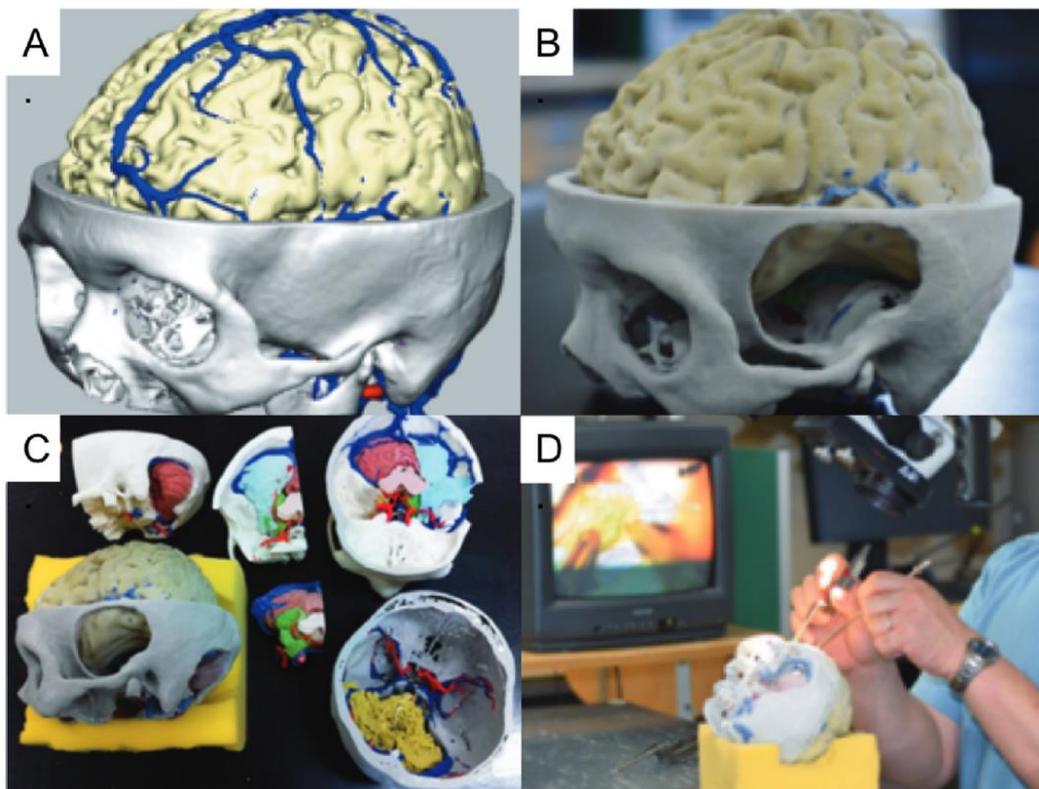
Figura 14 - Conjunto de ligação entre três dentes produzido por meio da LENS.



Fonte: GOU *et al.*, 2013.

Outra área beneficiada é a medicina, como pode ser visto na Figura 15. É possível simular uma cirurgia com peças tridimensionais de alta complexidade produzidas por meio da manufatura aditiva de modo a auxiliar os cirurgiões no planejamento cirúrgico, desta forma reduzindo possíveis imprevistos que podem ocorrer durante o procedimento.

Figura 15 - Procedimento de simulação da cirurgia dividido em quatro etapas: (A) modelamento, (B) fabricação, (C) montagem e (D) realização do procedimento cirúrgico.



Fonte: OISHI *et al.*, 2013 *apud* GROSS *et al.*, 2014.

A Figura 15 é dividida em quatro etapas do procedimento de simulação cirúrgica. A etapa **A** apresenta o modelo esquemático obtido do paciente, logo a seguir é apresentado a etapa **B** que é caracterizado como a fabricação das peças utilizando o modelo apresentado na etapa **A**. A etapa **C** apresenta a montagem de todos componentes utilizado na simulação da cirurgia e a última etapa, **D**, é realizado a simulação do procedimento cirúrgico proposto para o paciente (GROSS *et al.*, 2014).

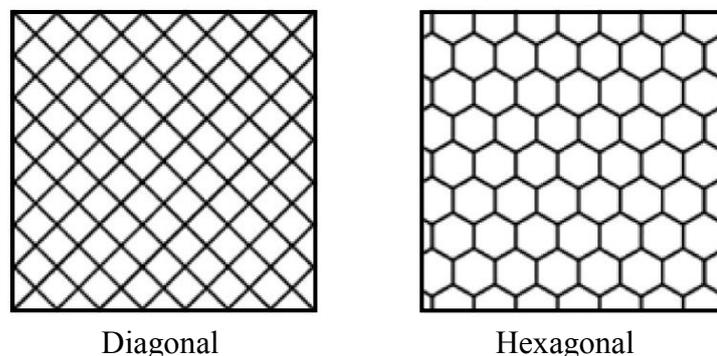
2.6 Parâmetros de Fabricação por Deposição de Material Polimérico

A quantidade de parâmetros de entrada de um processo de MA depende do tipo de máquina e *software* utilizados. Os principais parâmetros de processo são apresentados a seguir.

2.6.1 Padrão de preenchimento

A forma de preenchimento é um dos parâmetros com maior influência nas propriedades mecânicas, geralmente a escolha correta deste parâmetro pode gerar um aumento expressivo na resistência mecânica (KANTAROS *et al.*, 2016; YOON *et al.*, 2014). A Figura 16 apresenta duas estratégias de preenchimento comumente utilizadas.

Figura 16 - Estratégias de preenchimento comumente aplicadas: Diagonal e Hexagonal.

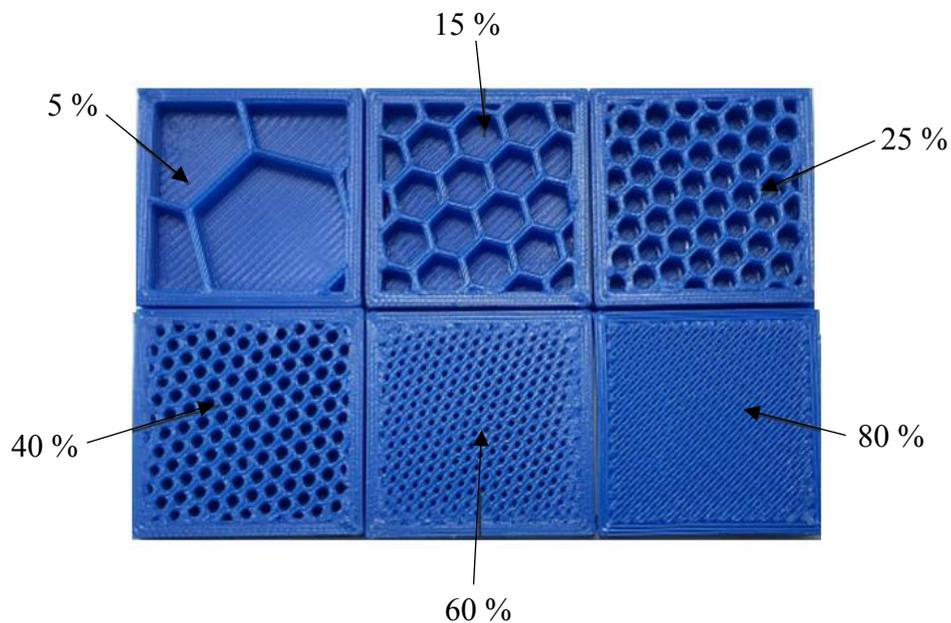


Fonte: ALAFAGHANI *et al.*, 2017.

2.6.2 Porcentagem de preenchimento

Em conjunto com o padrão de preenchimento a porcentagem de preenchimento é um dos parâmetros com maior influência nas propriedades mecânicas, a escolha correta deste parâmetro é um fator decisivo na massa final utilizada, resistência mecânica e tempo necessário para fabricação (LANZOTTI *et al.*, 2015). As fotografias de seis peças são apresentadas na Fig. 17, todas as peças foram fabricadas com padrão de preenchimento hexagonal.

Figura 17 - Demonstração do incremento da porcentagem de preenchimento hexagonal.

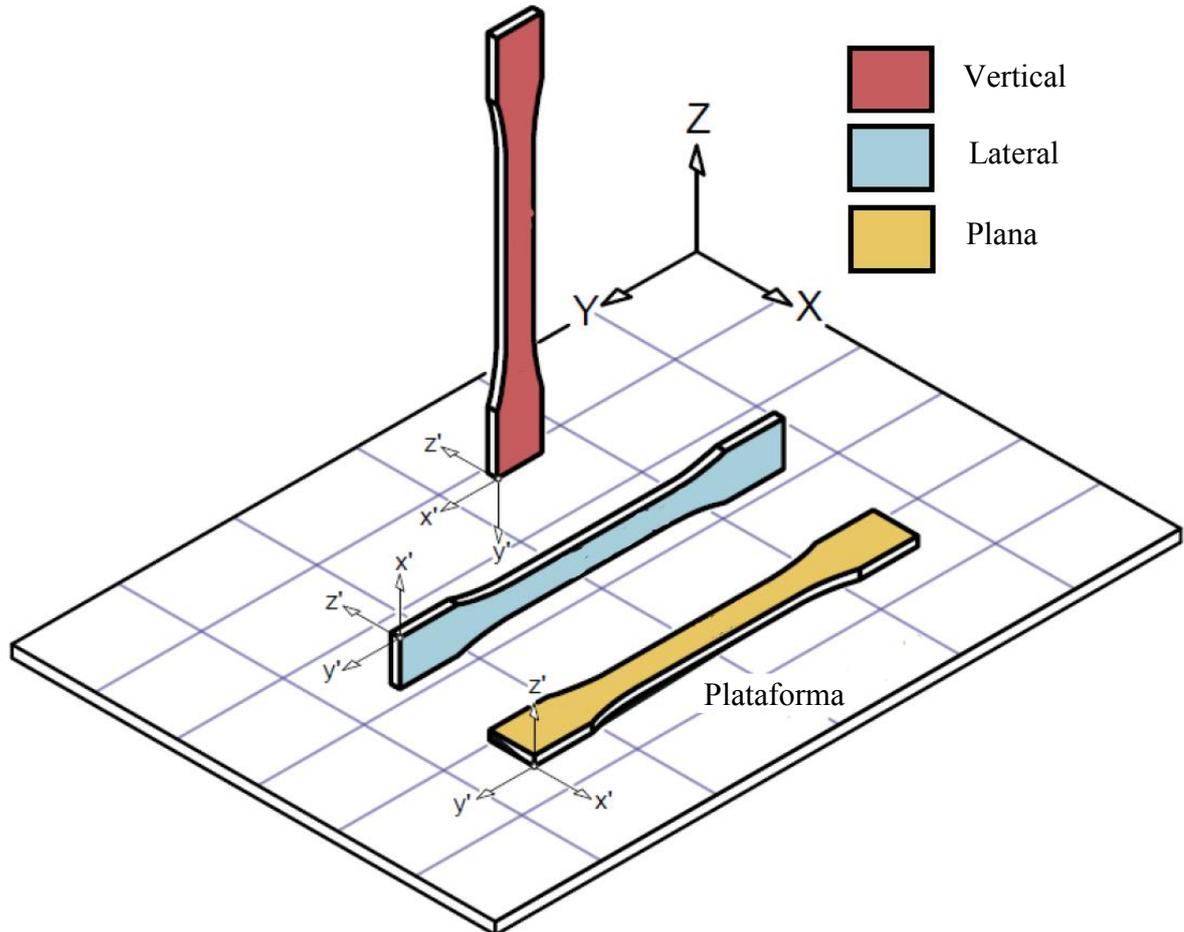


Fonte: <https://www.additive.blogknowledge/> (Adaptado).

2.6.3 Orientação de construção

A escolha correta deste parâmetro depende diretamente da forma de aplicação dos esforços sobre o corpo, estando relacionado com as características anisotrópicas do material (CROUCILLO *et al.*, 2017; CHACÓN *et al.*, 2017). Os 3 tipos possíveis de orientações são plana (*flat*), lateral (*on-edge*) e vertical (*upright*), as quais são exibidas na Figura 18. É necessário considerar possíveis variações de espessura de contorno, base e topo quando for modificado este parâmetro.

Figura 18 - Demonstração gráfica das formas de deposição de material.

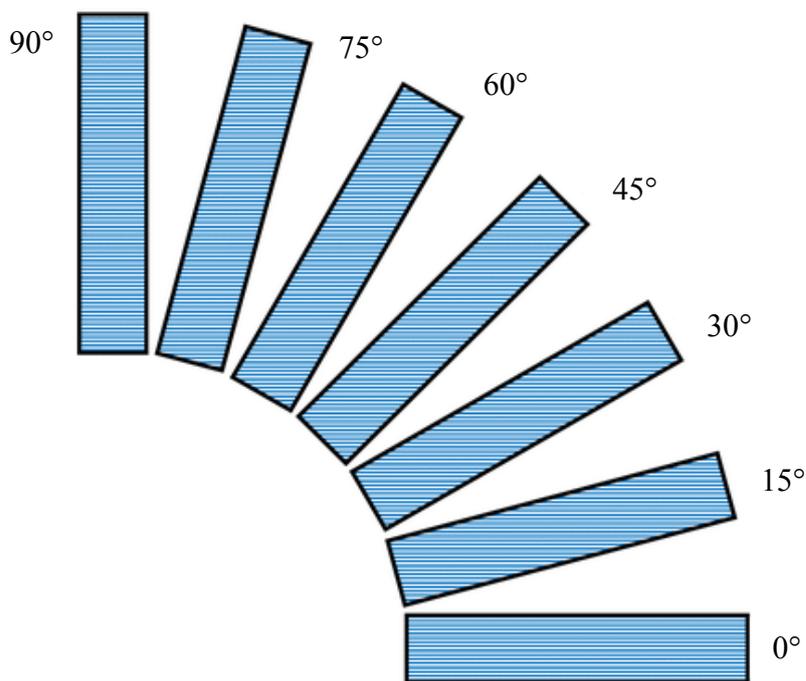


Fonte: CHACÓN *et al.*, 2017 (Adaptado).

2.6.4 Orientação de preenchimento

Este parâmetro possui influência semelhante à orientação de construção, de modo que a sua escolha deve ser realizada considerando as formas de aplicação dos esforços sobre a peça. A variação deste parâmetro pode provocar acréscimos significativos na resistência mecânica utilizando a mesma quantidade de material e tempo de produção (LETCHER *et al.*, 2014; GUESSASMA *et al.*, 2016). A Figura 19 apresenta sete possíveis orientações de preenchimento, a configuração deste parâmetro pode ser aplicada por meio do giro da peça ou dentro do programa de conversão STL.

Figura 19 - Orientação do preenchimento na manufatura aditiva.

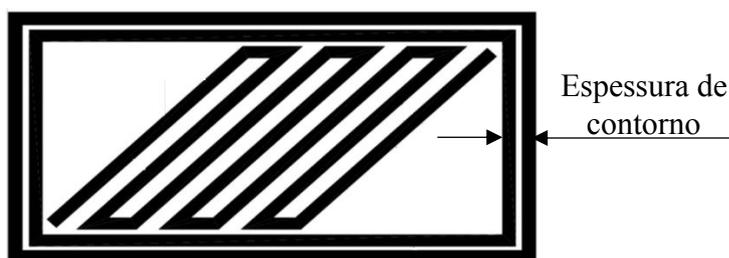


Fonte: MESSIMER *et al.*, 2018.

2.6.5 Espessura de contorno

Parâmetro correlacionado com o acabamento da peça, sua escolha afeta diretamente a transferência de calor durante a fabricação. Valores altos significam elevada taxa de deposição de material nos extremos da peça, valores reduzidos podem gerar erros na junção entre preenchimento interno e contorno externo (MOHAMED *et al.*, 2017). A Figura 20 apresenta um trajeto teórico de deposição do filamento.

Figura 20 - Sequência teórica de deposição dos filamentos da primeira camada.



Fonte: ALAFAGHANI *et al.*, 2017 (Adaptado).

2.6.6 Temperatura de extrusão do bocal

A temperatura do bocal está diretamente correlacionada com a temperatura de extrusão da peça e por consequência o estado do filamento depositado. A escolha deste parâmetro está correlacionada com o estado líquido/sólido (*Fused-molden*) de saída do filamento do bocal, que tem aspectos positivos como aumentar área de contato entre filamentos e camadas, porém também é responsável por aumentar a quantidade de deposição em locais indesejados e acelerar a decomposição do material (GAJDOS *et al.*, 2013).

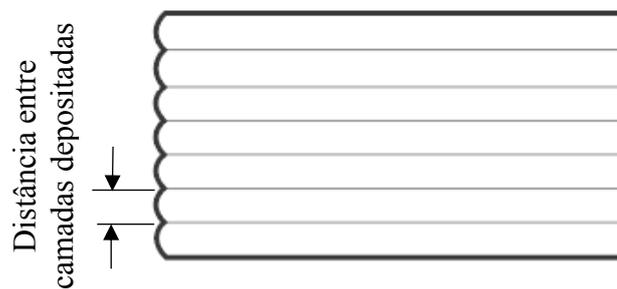
2.6.7 Temperatura da mesa

Peças produzidas com o filamento de ABS são afetadas significativamente pelos valores da temperatura da mesa, sendo o principal método de evitar a geração, propagação de trincas e distorção da peça. Peças produzidas com PLA são menos suscetíveis a variação térmica, sendo possível fabricar peças com a temperatura da mesa igual à temperatura ambiente (GAJDOS *et al.*, 2013).

2.6.8 Distância entre camadas

A distância entre camadas é um dos principais fatores determinantes no desvio de forma, quantidade de material expelido pelo bocal e o tempo necessário para produção da peça (LANZOTTI *et al.*, 2015). A Figura 21 apresenta um modelo criado para demonstrar a distância entre camadas.

Figura 21 - Ilustração da distância entre camadas depositadas.



Fonte: Autor.

2.6.9 Quantidade de peças fabricadas por ciclo

A quantidade de peças produzidas por ciclo altera o tempo de deposição entre cada camada depositada e conseqüentemente pode afetar o diferencial de temperatura entre a camada recém-depositada e o filamento sendo extrudado. A norma ASTM D790-17 utilizada nesta pesquisa recomenda o número mínimo de experimentos, mas não trata da ordem ou padrão de fabricação.

CAPÍTULO III

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O ensaio de flexão três pontos foi escolhido para análise das propriedades mecânicas dos corpos de provas devido a escassez de informações do método para descrever as propriedades de polímeros extrudados em manufatura aditiva.

A quantidade de corpos de prova foi escolhida seguindo as indicações da norma ASTM D790-17, a qual orienta a utilização de pelo menos cinco testes para análise de cada parâmetro de impressão do polímero. As cinco peças ou corpos de prova (CP) foram fabricados em dois ciclos. No primeiro foram impressas três peças e no segundo duas na mesma etapa. Cada peça foi marcada com um número de um a cinco, seguindo a ordem de fabricação.

3.1. Escolha dos Parâmetros da Manufatura Aditiva

A máquina utilizada para manufatura dos corpos de prova pode modificar os seguintes parâmetros: forma de preenchimento hexagonal (PH) ou diagonal (PD), porcentagem de preenchimento (P), orientação de construção (OC), espessura de contorno (EC), espessura de base e topo (EBT), temperatura de extrusão do bocal (TEB), temperatura da mesa (TM) e distância entre camadas (DCD).

Com exceção dos parâmetros de porcentagem de preenchimento (modificado em sete níveis), espessura de contorno (modificado em quatro níveis) e quantidades de peças produzidas (modificado em dois níveis), todos os parâmetros foram modificados em três níveis. Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos parâmetros e valores considerados durante o estudo.

Tabela 1 - Parâmetros de extrusão do PLA azul Cliever[®].

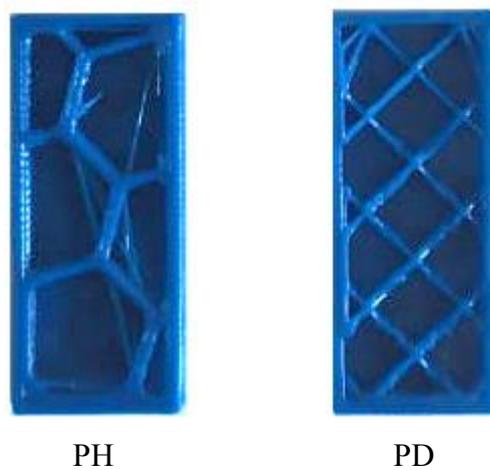
Parâmetros variáveis	Forma de preenchimento	Hexagonal (H); Diagonal (D)
	Porcentagem de preenchimento (P)	0 %; 10 %; 20 %; 30 %; 40 %; 60 %; 90 %
	Orientação de construção (OC)	Plano (0X), lateral (0Z) e vertical (0Y)
	Espessura de contorno (EC)	1; 2; 3; 5 Camadas
	Espessuras de base e topo (EBT)	1; 2; 3 camadas de base e topo
	Temperatura de extrusão do bocal (TEB)	185 °C; 190 °C; 195 °C
	Temperatura da mesa (TM) (Primeira camada e demais, respectivamente)	30 °C e 40 °C; (3040) 40 °C e 50 °C; (4050) 50 °C e 60 °C (5060)
	Distância entre camadas (DCD)	0,15 mm; 0,19 mm; 0,25 mm
	Quantidades de peças produzidas por ciclo	3; 2
Parâmetros fixos	Distância entre os corpos de provas na mesa	3,0 mm
	Diâmetro do bocal	0,35 mm
	Orientação de preenchimento	45°

Fonte: Autor.

3.2.1 Forma de preenchimento

Duas estratégias ou formas de preenchimento foram analisadas, os padrões de preenchimento hexagonal (PH) e diagonal (PD). A Figura 22 apresenta as duas estratégias de preenchimento utilizadas nesta pesquisa. O padrão de preenchimento hexagonal foi escolhido para as peças que não foram utilizadas para analisar a modificação da estratégia e porcentagem de preenchimento. Esta escolha foi realizada devido à recomendação da equipe de técnicos do laboratório de projetos (LPM).

Figura 22 - Demonstração do preenchimento Hexagonal (PH) e diagonal (PD) de peças produzidas com 10 % de preenchimento interno.



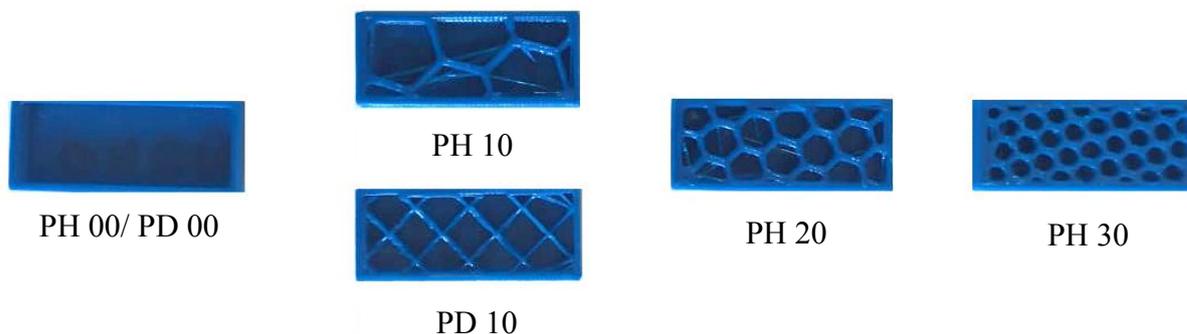
Fonte: Autor.

3.2.2 Porcentagem de preenchimento

As porcentagens de preenchimento analisadas foram: 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 60 % e 90 % (Prefixo PH ou PD, Sufixo: 00, 10, 20, 30, 40, 60 e 90, respectivamente). Esta escolha foi realizada para identificação da caracterização da resistência mecânica com o aumento da quantidade de material depositado, esta modificação foi realizada para dois padrões de preenchimento, hexagonal (H) e diagonal (D). A porcentagem de preenchimento igual a zero por cento (sem preenchimento interno) gera apenas um corpo de prova com a base, topo e contorno preenchidos, uma peça com geometria semelhante a este corpo de prova pode ser observada na Figura 23.

Foi utilizado apenas um conjunto para analisar os corpos de prova produzidos com zero por cento de preenchimento. As peças que não foram utilizadas para analisar a modificação de preenchimento foram produzidas com uma porcentagem constante de 30 %. Esta escolha foi baseada nos conhecimentos técnicos dos membros do Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM-UFU).

Figura 23 - Demonstração da porcentagem de preenchimento dos CP de 0 % a 30 % de preenchimento.



Fonte: Autor.

3.2.3 Orientação de construção

Três tipos de orientações foram analisados neste estudo, lateral (*On edge*, OC 0Z), plano (*Flat*, OC 0X) e vertical (*Upright*, OC0Y). A orientação de construção plana foi escolhida como constante para modificação dos demais parâmetros analisados. Esta orientação foi escolhida para reduzir o efeito anisotrópico das peças fabricadas. Utilizar a peça em outras posições acarretaria em diminuição brusca da resistência mecânica (*upright*) ou no aumento da massa e efeito anisotrópico nas amostras (*on edge*).

3.2.4 Orientação de preenchimento

Foi escolhido utilizar a orientação de preenchimento igual à 45° para reduzir os efeitos de anisotropia horizontal em todas as amostras. Este parâmetro foi configurado por meio da modificação da angulação da peça no posicionamento sobre a mesa da máquina durante a configuração dos parâmetros de impressão (etapa de planejamento).

3.2.5 Espessura de contorno

A modificação da espessura de contorno foi alterada em quatro níveis, uma (EC 01), duas (EC 02), três (EC 03), e cinco (EC 05) camadas. Nos corpos de prova produzidos para análise de outros parâmetros foi utilizada a menor espessura possível. Foi escolhido duas

camadas de contorno devido à inviabilidade da escolha de uma camada, esta última iria fornecer pouca proteção contra possíveis erros ocorridos durante a impressão, como deformação da primeira e última camadas depositadas.

3.2.6 Espessura de base e topo

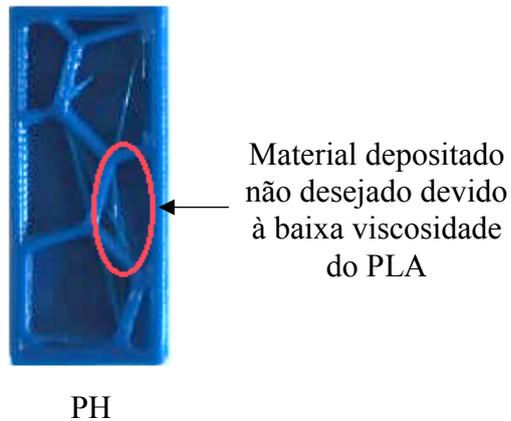
Este parâmetro de fabricação foi modificado em três níveis, sendo uma (EBT 01), duas (EBT 02) ou três (EBT 03) camadas superficiais e de base. A espessura de base e topo afetam a massa de forma semelhante à espessura de contorno, porém este parâmetro também afeta o acabamento superficial da última camada, sendo comum a primeira camada de topo produzida apresentar acabamento inferior. Este defeito pode ser reduzido com uma espessura de camada maior que duas camadas de deposição.

Os testes de flexão são significativamente dependentes da massa depositada nos extremos do corpo de prova, de tal forma a espessura de base e topo afetam o comportamento mecânico de forma drástica e com pouca alteração da massa utilizada. Com o objetivo aumentar o efeito dos demais parâmetros foi escolhido manter duas camadas de topo e base para os corpos de provas que não foram utilizados para avaliar o efeito deste parâmetro, apenas uma camada poderia reduzir drasticamente a qualidade superficial dos corpos de prova.

3.2.7 Temperatura de extrusão do bocal

A temperatura de extrusão do bocal foi modificada em três níveis, 185 °C (TEB 185), 190 °C (TEB 190) e 195 °C (TEB 195). Durante os pré-testes foi observado que fabricar utilizando temperaturas maiores de 185 °C geram deposições indesejadas dentro das peças, devido ao aumento da viscosidade do polímero em altas temperaturas. A Figura 24 apresenta uma peça com temperatura de extrusão do bocal superior ao recomendado, dentro da elipse vermelha é possível perceber a existência de material depositado dentro da geometria hexagonal. Deste modo, para evitar a ocorrência dessa situação, a temperatura de 185 °C foi utilizada nas peças que foram fabricadas para avaliar os demais parâmetros.

Figura 24 - CP produzido com temperatura de extrusão do bocal superior ao recomendado para o filamento.



Fonte: Autor.

3.2.8 Temperatura da mesa

A temperatura foi modificada em três níveis, 30 °C/40 °C (TM 3040), 40 °C/50 °C (TM 4050) e 50 °C/60 °C (TM 5060), sendo o primeiro valor a temperatura inicial da primeira camada e a segunda as demais camadas depositadas. Durante o planejamento experimental foi estabelecido utilizar uma temperatura padrão recomendada pelo Fabricante Cliever[®] nas peças que não modificasse a temperatura da mesa. Seguindo estas recomendações foram utilizadas duas temperaturas para os corpos de prova que não seriam utilizados para avaliar a temperatura da mesa, uma para a primeira camada depositada (40 °C) e outra para todas as camadas depositadas (50 °C) em seguida.

3.2.9 Distância entre camadas

Este parâmetro foi avaliado em três níveis: 0,15 mm (DCD 15); 0,19 mm (DCD 19) e 0,25 mm (DCD 25) de distância entre camadas depositadas. A distância de 0,19 mm foi selecionada como parâmetro constante durante a fabricação do resto dos corpos de prova, segundo recomendação da equipe de técnicos do LPM.

3.2.10 Quantidade de peças produzidas sequencialmente

Foram produzidos cinco corpos de prova para cada nível de análise em duas etapas, primeiro um conjunto de três unidades e logo em seguida um conjunto de duas unidades. Todas as peças foram identificadas assim que retiradas da máquina e, então, guardadas juntas.

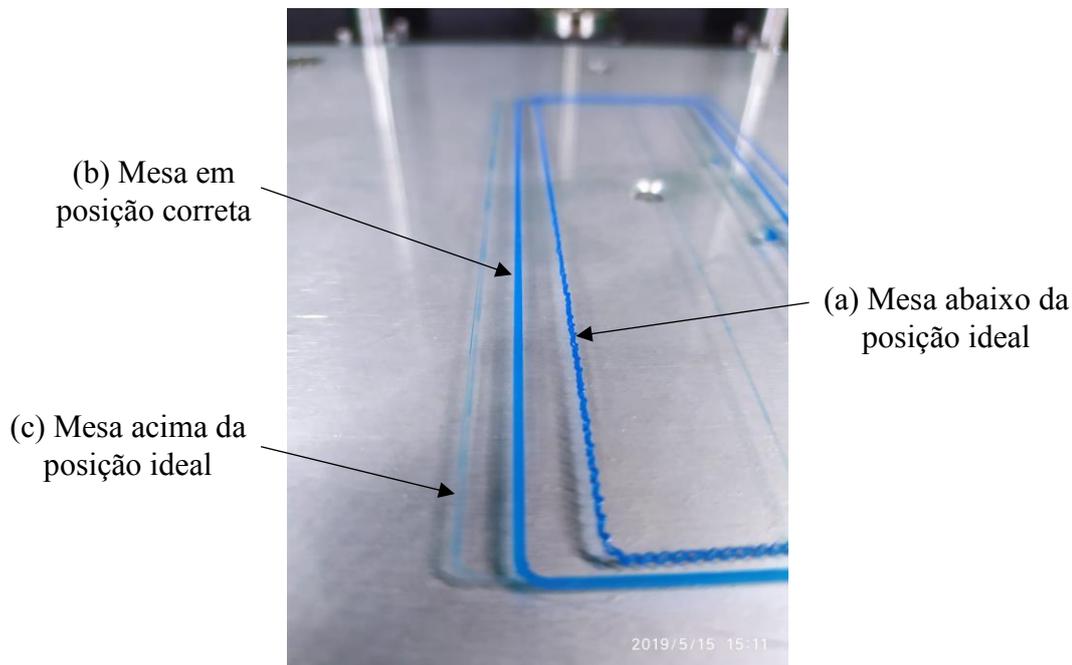
3.3 Fabricação

Os desenhos dos corpos de prova foram produzidos utilizando o *software* SolidWorks[®] e exportados como um arquivo no formato STL para o *software* Cliever Estúdio[®]. O arquivo com parâmetros de fabricação foi exportado no formato CL para a impressora por meio de um cartão de memória SD. A máquina e os materiais foram adquiridos diretamente da Empresa Cliever[®].

Antes do início da fabricação de cada corpo de prova foi realizado o pré-aquecimento do bocal, mesa e referenciamento e nivelamento da mesa responsável pelo deslocamento vertical da impressão, todos estes procedimentos foram realizados após a climatização da sala utilizada em 21 °C. Durante a fabricação das peças foi utilizado um *spray* adesivo Cliever[®] para facilitar a adesão da peça à mesa suporte. A análise sobre a conformidade da aderência e distância da primeira camada foi realizada durante a deposição da camada guia, como pode ser visualizado na Figura 25. O teste foi realizado por meio da análise da facilidade de descolamento daquele filamento recém-depositado ou pela existência de uma aparente falta de deposição. Esta falta de deposição ocorre quando a distância inicial da mesa e bocal é menor que a recomendada (espessura da camada) gerando um traço atípico, que visualmente aparenta a falta de deposição.

Na Figura 25 é possível visualizar os três métodos de nivelamento possível, sendo eles mesa em (a) posição elevada, (b) correta e (c) abaixo da altura ideal, respectivamente. O ajuste da mesa foi realizado por meio de três parafusos em sua base. Para o processo de calibração, eleva-se a mesa até a altura da primeira camada, logo em seguida o bocal deve ser aproximado de cada um dos parafusos para realização da calibração. A calibragem de cada um dos 3 pontos deve ser realizada com o bocal próximo ao parafuso para maximizar o efeito do ponto ajustado e minimizar a interferência dos demais.

Figura 25 - Comparação entre as camadas-guia utilizadas para nivelamento da mesa da impressora, sendo mesa em (a) posição elevada, (b) correta e (c) abaixo da altura ideal.



Fonte: Autor

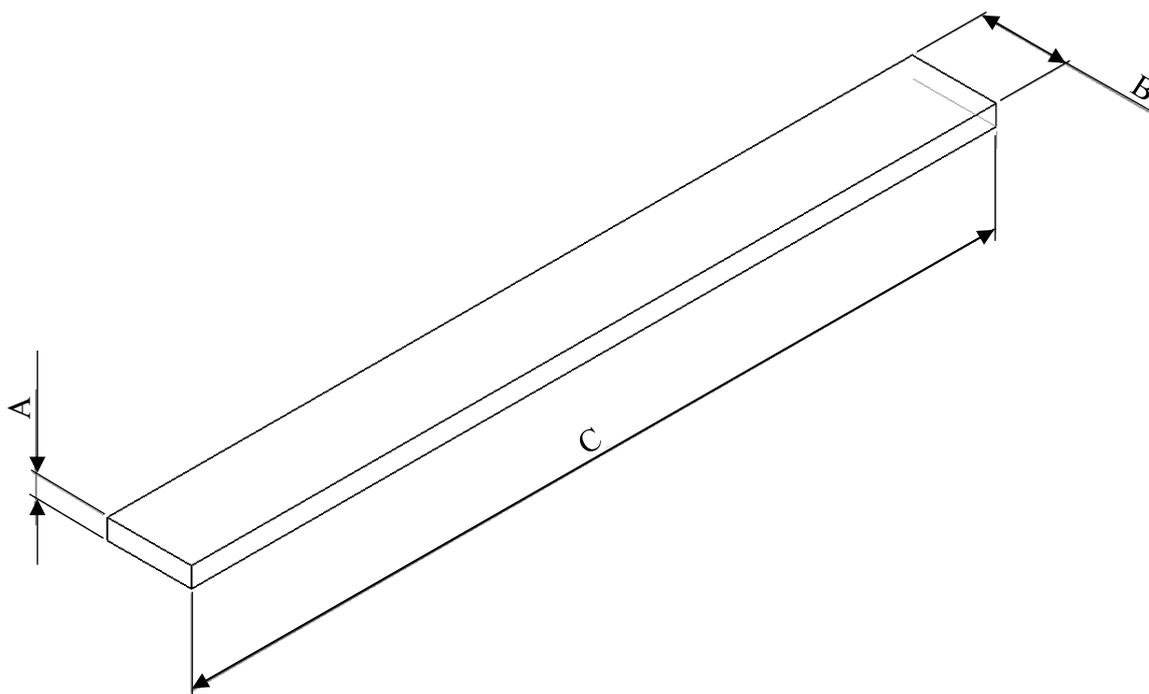
Ao final da produção, as peças foram retiradas com o auxílio de uma espátula e alocadas em pequenos sacos plásticos os quais foram utilizados para a redução da influência do ambiente adverso e não controlado. Tais procedimentos foram realizados com luvas nitrílicas para reduzir a absorção de água nas peças devido à manipulação. As peças foram guardadas em uma pasta de cor escura em um armário (completamente vedado contra raios solares) da sala do LEPU não climatizada. Os corpos de prova foram ocasionalmente retirados da pasta para realização de medições dimensionais e testes de flexão.

3.4 Caracterização Geométrica

As dimensões das peças produzidas foram adquiridas por meio de um paquímetro analógico do fabricante Mitutoyo[®], com resolução igual a 0,02 mm e um paquímetro digital, também do fabricante Mitutoyo[®], com resolução igual a 0,01 mm. Com o paquímetro analógico foram coletadas treze medidas para cada corpo de prova, sendo elas cinco medidas da espessura (A), cinco medidas da largura (B) e três do comprimento (C), de modo que o

desenho das cotas pode ser visualizado na Figura 26. O paquímetro digital foi utilizado para coletar vinte medidas, dez medidas da espessura (A) e dez da largura (B).

Figura 26 - Dimensões de projeto do corpo de prova segundo ASTM D790-17: espessura (A = 3,20 mm), largura (B = 12,70 mm) e comprimento (C = 127,00 mm).



Fonte: Autor.

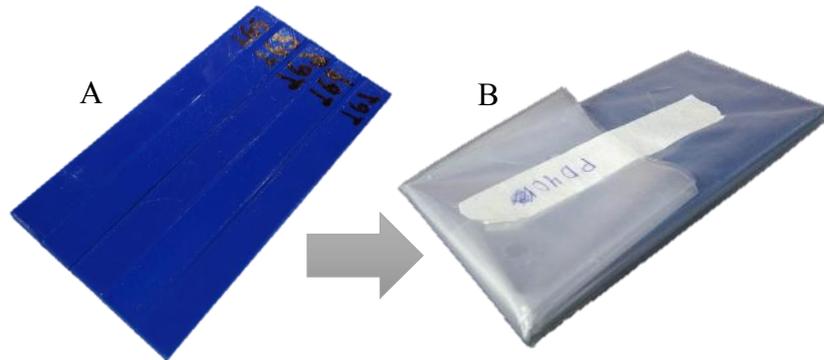
As dimensões de largura e espessura foram retiradas de forma distribuída pelo corpo, tentando reduzir ao máximo as possíveis variações originadas de pequenos defeitos que poderiam indicar uma dimensão não representativa do todo. As medidas com o paquímetro com 0,01 mm de resolução foram realizadas nos extremos da peça.

3.5 Armazenamento

Os corpos de prova foram organizados em duas pastas, uma preta semitransparente e outra azul semitransparente, sendo também utilizadas capas plásticas para armazenamento das peças em conjunto de cinco CPs, como mostra a Figura 27-A e Figura 27-B. A pasta azul foi utilizada para armazenar os corpos de prova já testados, enquanto a pasta preta foi utilizada para manter os corpos que ainda estavam sendo analisados. Os CPs foram retirados dos

experimentos apenas para realização das medidas de dimensões físicas, massa e teste de flexão ao final. Todos esses procedimentos, com exceção do teste de flexão, foram realizados com a utilização de luvas nitrílicas.

Figura 27 - (A) corpos de prova recém-impresos e identificados e (B) embalados.



Fonte: Autor.

3.6 Testes de Flexão Três Pontos

Os testes de flexão foram realizados pela máquina MTS Landmark 647[®] seguindo as orientações de velocidade e distância entre suportes (Eq. 1 e Eq. 2) disponibilizadas na norma ASTM D790-17. Estas Equações 1 e 2 foram utilizadas para configuração da distância entre suportes na mesa e velocidade de avanço do cilindro de teste, respectivamente.

$$L_{\text{Mínimo}}=16d \quad (\text{Equação 1})$$

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

R: Velocidade de avanço [mm/min].

L: Distância entre suportes [mm].

D: Espessura dos corpos de prova [mm].

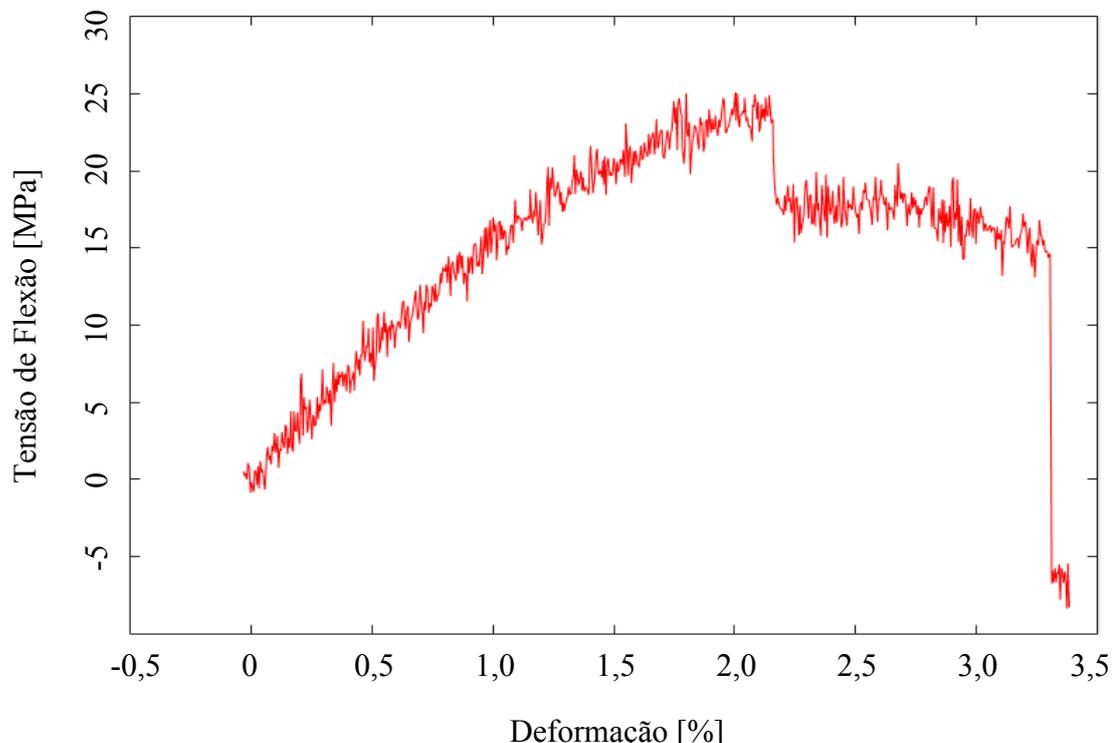
Z: Taxa de esforços das fibras exterior ($Z = 0,01 \text{ mm/mm/min}$).

Utilizando as Equações 1 e 2 foi possível selecionar os seguintes parâmetros na máquina: distância entre suportes: 51,20 mm e velocidade de avanço de 1,36 mm/min.

Durante os ensaios de flexão não foram utilizadas luvas protetoras. Antes de colocar os corpos de prova na máquina de testes foi realizada a marcação dos locais em que deveriam estar fixos os suportes da máquina para facilitar a montagem final dos corpos de prova.

Alguns corpos de provas apresentaram falha parcial após ultrapassar a resistência máxima. Na Figura 28 é possível perceber uma queda brusca da resistência mecânica, esta particularidade ocorreu em todos os corpos de prova com 0 % de preenchimento e de forma esporádica em alguns outros corpos de prova nos quais outros parâmetros de impressão estavam sendo avaliados quanto à influência nas propriedades mecânicas. Esta queda foi derivada da falha da parte inferior do corpo de prova que estava sobre elevada carga de tração, a resistência posterior a esta falha parcial era originada de algumas camadas da parte superior do corpo de prova. As camadas superiores ofereciam resistência mecânica reduzida e alta capacidade de deformação. O ensaio foi interrompido nessas situações para evitar danos à máquina de ensaios mecânicos.

Figura 28 - Curva tensão por deformação do primeiro corpo de prova no ensaio de flexão três pontos.



Fonte: Autor.

Não foi possível correlacionar a queda abrupta da tensão de flexão com os parâmetros de fabricação. Os valores da resistência à flexão posteriores ao valor máximo (patamar a direita) não apresentaram correlação com os parâmetros de manufatura.

3.7 Tratamento de Dados

A análise dos dados foi realizada utilizando os *softwares* Excel[®] e MATLAB[®]. O Excel[®] foi utilizado para o tratamento dos dados das medidas dimensionais, resultados dos testes mecânicos e para montar os gráficos de propriedades mecânicas. O MATLAB[®] foi utilizado para as curvas tensão por deformação por apresentarem uma quantidade de pontos/dados.

3.7.1 Medição dimensional

O tratamento de dados das medidas dimensionais segue o mesmo padrão que as medidas de massa. Os cálculos de média aritmética e desvio padrão foram realizados usando as respectivas funções dedicadas do Excel[®]. Estes dados foram utilizados para definição do momento de inércia real e aparente.

3.7.2 Cálculo da tensão de flexão três pontos

Os cálculos das tensões de flexão foram realizados utilizando três momentos de inércia. O primeiro momento de inércia foi nomeado de inércia aparente, por utilizar apenas dimensões visíveis pelo exterior do corpo de prova (considerando a seção maciça). O segundo momento de inércia foi denominado momento de inércia real, em função do padrão de preenchimento (vazios internos intencionais) para o cálculo do momento de inércia. O terceiro foi denominado momento de inércia de projeto, que foi adquirido considerando apenas os valores geométricos de projeto (dimensões externas definidas na norma ASTM D790-17).

A Equação 4 representa o cálculo para determinação da tensão de flexão aparente e de projeto dos corpos de prova, ao passo que a Eq. 5, determinada por meio da Eq. 6, foi utilizada para calcular a tensão de flexão real. Os valores de momento fletor atuante (M),

distância entre suportes e carga máxima (P) permaneceram constantes para as três formas de cálculo da tensão atuante sobre o corpo de prova. Os momentos de inércia e distâncias da linha neutra (y) foram as únicas diferenças aplicadas nos cálculos.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (\text{Equação 4})$$

$$\sigma_f = \frac{6,375Pd}{I} \quad (\text{Equação 5})$$

$$\sigma_f = \frac{My}{I} \quad (\text{Equação 6})$$

O momento de inércia de projeto foi determinado utilizando as dimensões impostas no arquivo STL, sendo estas: 127,00 mm de comprimento, 3,20 mm de espessura e 12,70 mm. Os outros dois momentos de inércias foram gerados considerando as medidas dimensionais coletadas. O momento de inércia aparente apresentado na Eq. 4 foi calculado utilizando a média das medidas dimensionais dos ciclos de três e dois de cada nível analisado. O momento total de cada nível foi encontrado por meio da média ponderada da média aritmética de cada um dos ciclos analisados.

O momento de inércia real foi determinado por meio do *software* SolidWorks[®]. Duas considerações foram definidas para tal: a primeira considerou a falha do material ocorrendo nas mesmas regiões em que o momento fletor for máximo, a segunda no fato desta região ser perpendicular ao plano composto pela largura e espessura do corpo de prova.

O desenho dos corpos de prova envolveu 4 etapas:

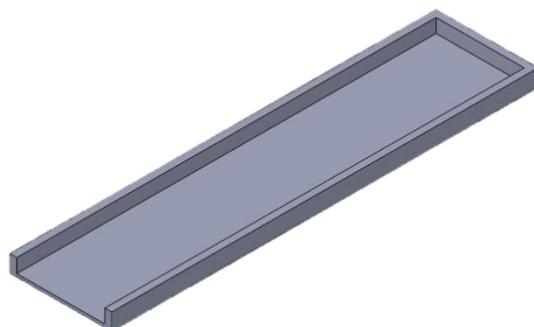
- Desenho das geometrias hexagonais ou diagonais presentes dentro dos corpos;
- Desenho da base de cada corpo de prova;
- Desenho do topo de cada corpo de prova;
- Desenho do contorno do corpo de prova.

O desenho das peças com 0 %, 10 %, 20 %, e 30 % de preenchimento são apresentados na Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32 respectivamente. Todos os desenhos dos corpos de prova no SolidWorks[®] foram realizados considerando as medidas reais de cada peça.

Os corpos de prova com o padrão de preenchimento diagonal foram projetados em um ciclo de duas camadas, sendo que em cada um o filamento foi depositado em um sentido. Para

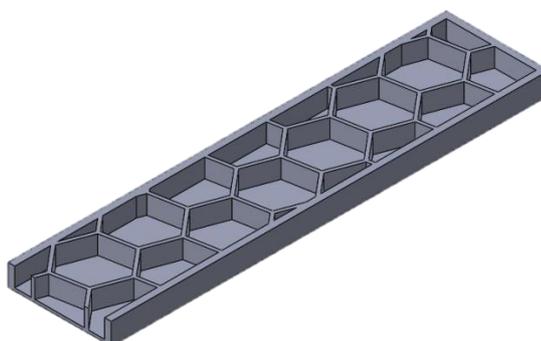
diminuição da complexidade do projeto foi considerado que todos os trajetos de deposição interna de cada peça eram exatamente iguais.

Figura 29 - Corpo de prova com 0 % de preenchimento.



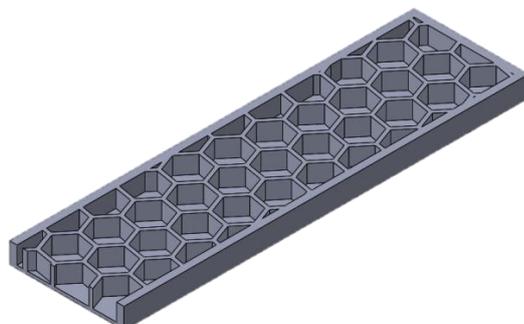
Fonte: Autor.

Figura 30 - Corpo de prova com 10 % de preenchimento.



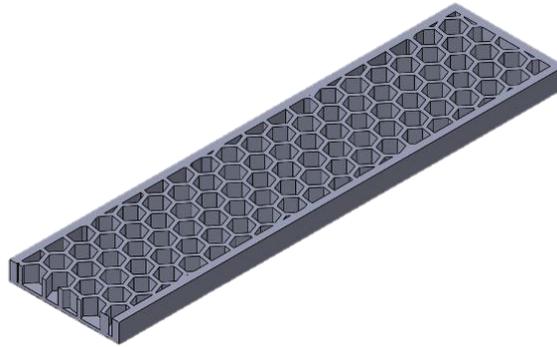
Fonte: Autor.

Figura 31 - Corpo de prova com 20 % de preenchimento.



Fonte: Autor.

Figura 32 - Corpo de prova com 30 % de preenchimento.



Fonte: Autor.

3.7.3 Módulo de elasticidade *Chord*

O módulo de elasticidade foi calculado considerando a norma ASTM D790 -17 e ISO 178: 2001(E). A norma ASTM D790 – 17 foi consultada para seleção da equação de obtenção de deformação (Eq. 7) e do momento de inércia (Eq. 8) pelo método *Chord Modulos*. A norma ISO 178: 2001(E) foi consultada para determinar o valor inicial e final da deformação atuante nos corpos de prova, sendo estes iguais a 0,0005 % e 0,0025 %, respectivamente. O desvio foi determinado por meio da lei de propagação de incertezas dos dados envolvidos no processo.

$$\varepsilon_f = 6Dd/L^2 \quad \text{(Equação 7)}$$

Sendo:

D: Deflexão máxima no centro do corpo [mm].

d: Espessura do corpo de prova [mm].

L: Distância entre os suportes [mm].

$$E_f = \frac{(\sigma_{f2} - \sigma_{f1})}{(\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1})} \quad \text{(Equação 8)}$$

Sendo:

σ_1 : Tensão de flexão na deformação de 0,0005 %.

σ_2 : Tensão de flexão na deformação de 0,0025 %.

ε_1 : Primeira deformação após 0,0005 %.

ε_2 : Primeira deformação após 0,0025 %.

Os cálculos das deformações utilizando a Eq. 8 foram realizados no MATLAB[®], enquanto os cálculos da Eq. 7 foram realizados no Excel[®]. Os valores da deformação ε_1 e ε_2 foram selecionados como o primeiro valor após 0,0005 % e 0,0025 %, respectivamente.

3.7.4 Propagação de incertezas

O desvio apresentado em cada resultado exposto durante o trabalho foi calculado utilizando a teoria das incertezas. A incerteza associada à variabilidade das leituras relacionada aos dados coletados foi determinada por meio da Eq. 9, em que D_p representa o desvio padrão experimental e n o número de amostras.

$$\varphi = \frac{D_p}{\sqrt{n}} \quad \text{(Equação 9)}$$

Os resultados obtidos de forma indireta tiveram a incerteza calculada por meio das Eq. 9, Eq. 10 e Eq. 11.

$$R = f(a, b, c \dots \dots) \quad \text{(Equação 10)}$$

$$\varphi_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial a}\right)^2 (\partial a)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial b}\right)^2 (\partial b)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial c}\right)^2 (\partial c)^2 \dots \dots \dots} \quad \text{(Equação 11)}$$

Sendo:

φ : Incerteza da medição.

D_p : Desvio da medição.

R: Função utilizada para obtenção do resultado.

a, b, c ...: variáveis utilizadas.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

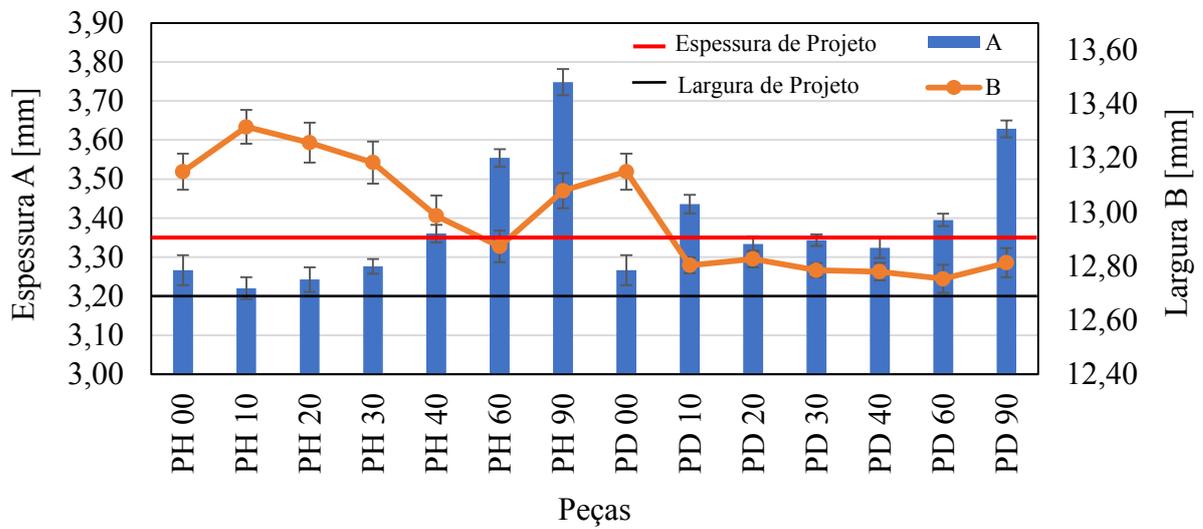
Os resultados apresentados a seguir foram analisados e propostos utilizando os conceitos apresentados na revisão bibliográfica, conhecimento dos princípios químicos e físicos dos materiais utilizados e experiências dos membros do laboratório.

4.1 Caracterização Geométrica - Exatidão

A determinação da espessura e largura dos corpos de prova foi necessária para definição do momento de inércia e, conseqüentemente, da tensão dos corpos de provas. A espessura foi o parâmetro de maior importância devido ao seu expoente cúbico nas Equações 4, 5 e 6.

Durante o experimento foi possível perceber que o aumento da porcentagem de preenchimento gerou o incremento dos valores medidos de espessura e uma redução na largura, como pode ser visualizado na Figura 33. Os corpos mais afetados por este comportamento foram aqueles com preenchimento hexagonal. Os corpos com preenchimento diagonal permaneceram com medidas constantes entre 20 % e 60 %, isto provavelmente está correlacionado com a forma de distribuição do material depositado.

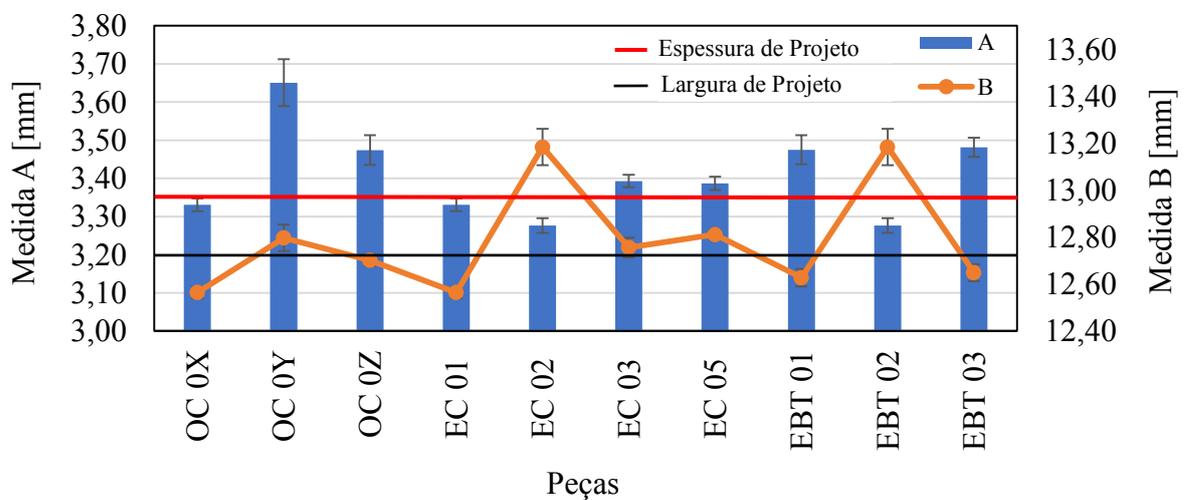
Figura 33 - Médias geométricas da espessura (A) e largura (B) do corpo de prova para preenchimento hexagonal (PH) e preenchimento diagonal (PD).



Fonte: Autor.

A orientação de construção (OC) afetou significativamente os corpos de prova, sendo que a melhor tolerância foi encontrada no conjunto com orientação plana (OC 0X), isto está provavelmente pode ser correlacionado com a modificação dos planos de deposição das camadas, que possuem erros de exatidão distintos. Estes resultados podem ser observados na Figura 34.

Figura 34 - Médias geométricas da espessura (A) e largura (B) do corpo de prova para orientação de construção (OC), espessura de contorno (EC) e Espessura de base e topo (EBT).

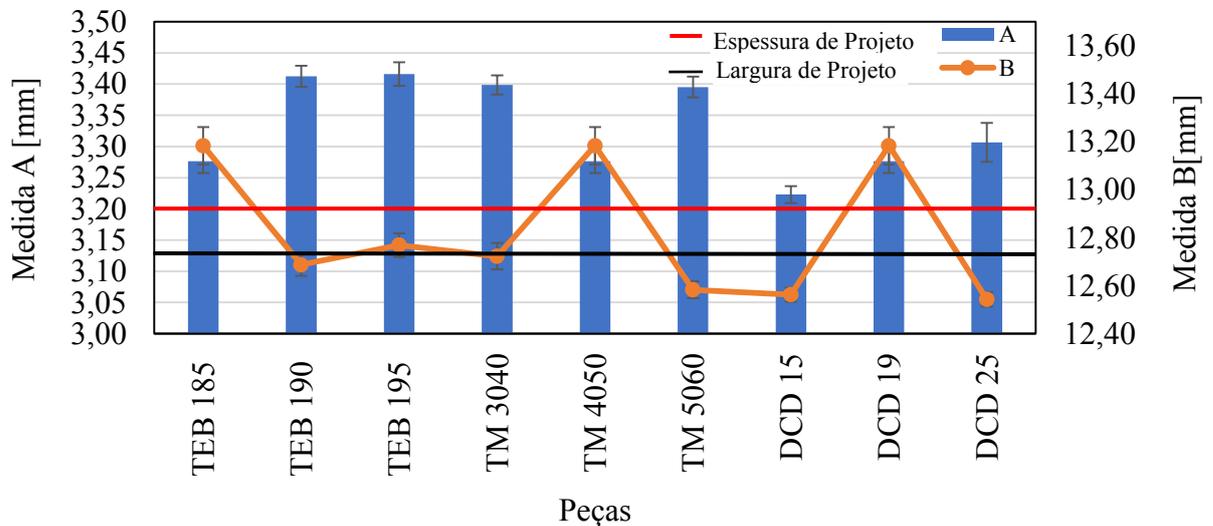


Fonte: Autor.

O aumento da temperatura de extrusão do bocal (TEB) gerou o incremento das dimensões de espessura e diminuição na largura. O primeiro pode estar correlacionado com o aumento de material depositado, devido à baixa viscosidade do polímero a temperaturas mais elevadas que permitiu a saída de material mesmo quando o motor que traciona o filamento não estava operando. Já o segundo possivelmente está relacionado com a melhor junção dos filamentos, e conseqüente maior compactação do material depositado.

Os parâmetros de espessura de contorno (EC), espessura de base e topo (EBT), temperatura da mesa (TM) e distância entre camadas (DCD) não apresentaram efeitos significativos nas dimensões dos corpos de provas, isto pode ter ocorrido devido ao baixo nível de modificação dos parâmetros ou influências de outros parâmetros desconhecidos, a Figura 35 apresenta os resultados na espessura (A) e largura (B) segundo a modificação dos parâmetros EC, EBT, TM e DCD.

Figura 35 - Médias geométricas da espessura (A) e largura (B) do corpo de prova para temperatura de extrusão do bocal (TEB), temperatura da mesa (TM) e distância entre camadas (DCD).



Fonte: Autor

4.2 Caracterização Geométrica - Precisão

Os resultados de tolerância foram obtidos pela subtração dos maiores valores de média e incerteza associada com os menores valores de média e incerteza associada das cinquenta medidas consideradas de cada conjunto de corpos de prova produzidos. Na Tabela 2 e Tabela 3 são apresentados os valores de tolerâncias classificadas utilizando a norma ISO 286 – 1 2010. As marcações em preto foram utilizadas para identificar as tolerâncias colineares com o movimento vertical da mesa, as em cinza para representar as medições realizadas no plano de deposição das camadas e as em azul para a ocasião na qual as duas tolerâncias obtiveram a mesma categoria. As peças OC 0Y (lateral) e OC 0Z (vertical) foram avaliadas diferentemente, as medições pretas foram realizadas para espessura (projetado para 3,2 mm), enquanto as medições cinzas foram utilizadas para a largura (projetado para 12,7 mm) do corpo de prova.

Tabela 2 - Tolerâncias geométricas das peças impressas por extrusão de PLA em função dos parâmetros do processo de preenchimento hexagonal (PH) e diagonal (PD). As marcações em preto identificam as tolerâncias colineares com o movimento vertical da mesa, as em cinza as medições realizadas no plano de deposição das camadas e as em azul quando as duas tolerâncias obtiveram a mesma categoria.

	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15
PH 00				■	■	
PH 10		■			■	
PH 20			■		■	
PH 30		■				■
PH 40			■		■	
PH 60			■		■	
PH 90				■	■	
PD 00				■	■	
PD 10			■			
PD 20			■			
PD 30		■	■			
PD 40				■		
PD 60		■			■	
PD 90			■		■	

Fonte: Autor.

Tabela 3 - Tolerâncias geométricas das peças impressas por extrusão de PLA em função dos parâmetros do processo: Orientação de construção (OC), espessura de contorno (EC), espessura de base e topo (EBT), temperatura de extrusão do bocal (TEB), temperatura da mesa (TM), e distância entre camadas (DCD). As marcações em preto identificam as

tolerâncias colineares com o movimento vertical da mesa, as em cinza as medições realizadas no plano de deposição das camadas e as em azul quando as duas tolerâncias obtiveram a mesma categoria.

	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15
OC 0X			■			
OC 0Y				■	■	
OC 0Z		■			■	
EC 01			■			■
EC 02		■		■		
EC 03			■			
EC 05			■			
EBT 01				■		■
EBT 02		■				■
EBT 03				■		■
TEB 185		■				■
TEB 190				■		
TEB 195	■			■		
TM 3040		■			■	
TM 4050		■				■
TM 5060			■	■		
DCD 15	■			■		
DCD 19		■				■
DCD 25				■		

Fonte: Autor.

As marcações pretas apresentaram valores, em média, reduzidos. O ocorrido pode ser correlacionado com o procedimento de deposição do material. Devido à dinâmica de deposição dos filamentos existe a possibilidade de escoamento do filamento nas orientações contidas no plano de deposição, este escoamento não ocorre perpendicularmente devido a restrição física da mesa e bocal da máquina.

As peças com preenchimento diagonal (PD) apresentaram valores de tolerâncias reduzidos nos planos de fabricação das camadas, estes valores aumentaram com o acréscimo da porcentagem de preenchimento. A redução inicial das tolerâncias pode estar relacionada à melhor distribuição de massa do corpo de prova, porém com o aumento da massa depositada há baixa distinção entre o preenchimento diagonal (PD) e hexagonal (PH), gerando tolerâncias igualmente elevadas no final.

O aumento espessura de contorno (EC) não afetou as tolerâncias colineares ao movimento do bocal, porém teve um efeito positivo nas tolerâncias no plano de deposição.

Tal fato pode ser justificado pelo aumento de camadas exteriores, o qual influenciou no equilíbrio da distribuição de massa e temperatura ao longo das camadas exteriores.

A temperatura da mesa (TM) não apresentou um efeito definido sobre as tolerâncias dimensionais. A maior temperatura analisada apresentou a maior tolerância no sentido de deposição das camadas, enquanto a menor tolerância no plano de deposição da camada foi encontrada nesta mesma temperatura. O aumento das tolerâncias perpendiculares ao plano das camadas está provavelmente correlacionado com a incapacidade da máquina/processo empregado de considerar o coeficiente de expansão térmica e temperaturas de extrusão para se autorregular com novos valores de distâncias entre camadas.

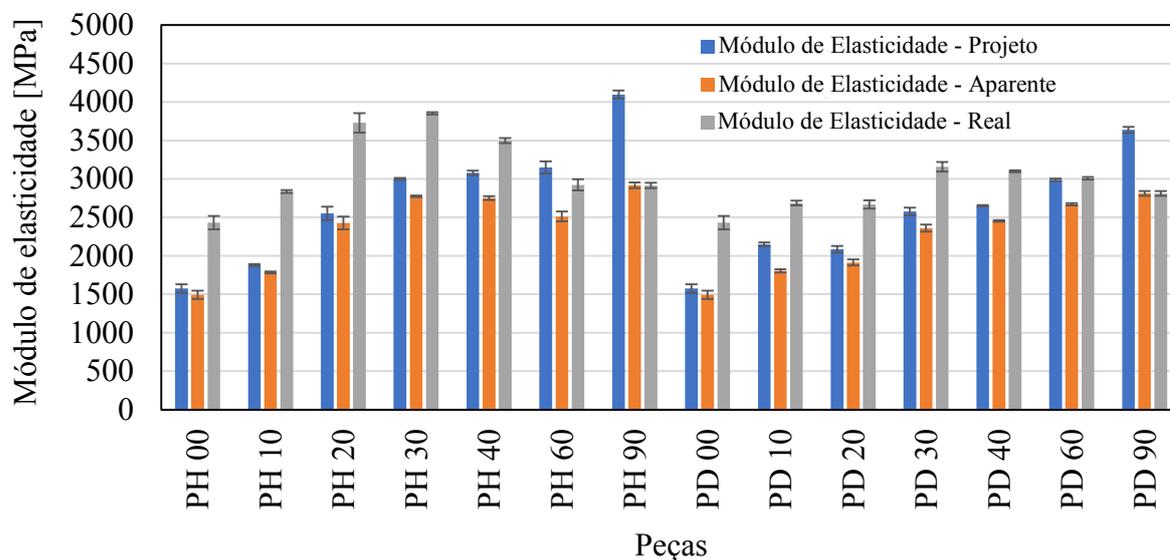
A redução na distância entre camadas (DCD) provocou o decréscimo das tolerâncias perpendiculares ao plano de deposição, porém tal efeito não pôde ser visualizado nas tolerâncias calculadas no plano de deposição. A geometria ovalizada dos filamentos depositados pode gerar pequenos vazios entre as camadas, os quais podem ser reduzidos com o aumento da quantidade de seccionamentos da peça. Portanto a redução das tolerâncias com o decréscimo da distância entre camadas pode ser correlacionada com a diminuição dos vazios internos contidos dentro da peça.

Os conjuntos que apresentaram as menores tolerâncias foram aqueles com maior temperatura de extrusão e menor distância entre camadas. Os dois parâmetros foram modificados sem provocar alteração expressiva no tempo necessário para impressão. As únicas possíveis adversidades à aplicação destes parâmetros podem ser eventuais aumentos de gastos com energia elétrica e a manutenção da impressora 3D.

4.3 Módulo de Elasticidade *Chord*

O padrão de preenchimento hexagonal (PH) apresentou um comportamento distinto em cada método de análise realizado. A Figura 36 apresenta os resultados dos corpos de prova utilizados para analisar o preenchimento hexagonal (PH) e diagonal (PD). O método de análise utilizando o módulo de elasticidade de projeto gerou um aumento constante e proporcional à porcentagem de preenchimento, enquanto o método utilizando o módulo aparente apresentou resultados que se estabilizaram após 30 % de preenchimento. O método utilizando a geometria real da peça apresentou uma região de máximo, 20 % e 30% de preenchimento.

Figura 36 - Módulo de elasticidade *Chord* do corpos de prova para preenchimento hexagonal (PH) e diagonal (PD).

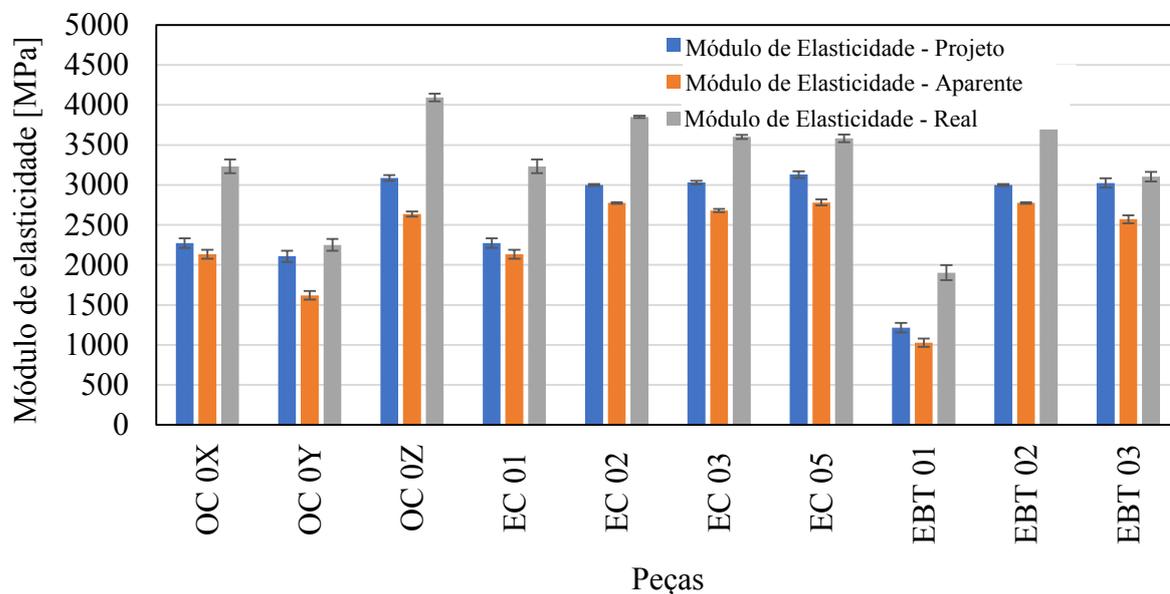


Fonte: Autor.

O comportamento dos resultados analisados pela geometria de projeto está correlacionado com o aumento da seção transversal dos corpos de prova, que obtiveram um incremento linear da carga máxima suportada. O momento de inércia de projeto não considerou as geometrias externas reais e consequentemente não foi incrementado em conjunto com o aumento da seção transversal. O método de análise utilizando a geometria aparente mostra que o incremento do momento de inércia se torna praticamente igual ao acréscimo da carga máxima a partir de 30 % de preenchimento. O método utilizando a geometria real dos corpos de prova mostra que o maior módulo de elasticidade foi encontrado com 30% de preenchimento diagonal ou hexagonal. Esta porcentagem de preenchimento não foi responsável pela maior carga suportada, porém o momento de inércia reduzido e possivelmente uma melhor distribuição das tensões fizeram estes corpos de prova se destacar por suas propriedades mecânicas.

Na Figura 37 são apresentados os valores de módulo de elasticidade das peças fabricadas para analisar a orientação de construção (OC), espessura de contorno (EC) e espessura de base e topo (EBT).

Figura 37 - Módulo de elasticidade *Chord* dos corpos de prova para orientação de construção (OC), espessura de contorno (EC) e espessura de base e topo (EBT).



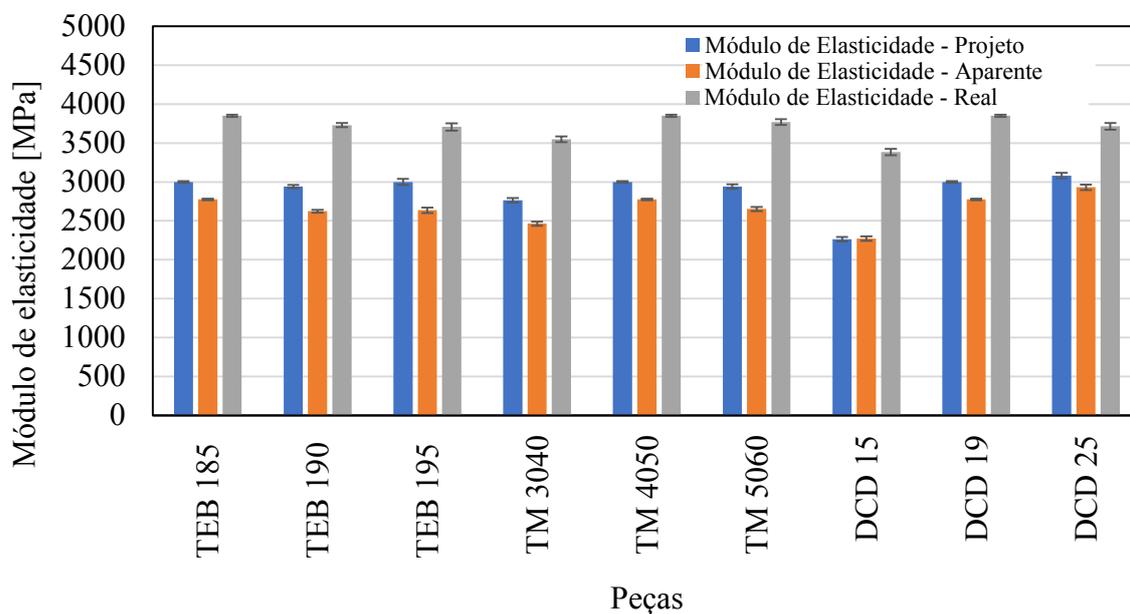
Fonte: Autor.

Os resultados indicaram uma significativa modificação do módulo de elasticidade com a variação da orientação de construção. A orientação tipo Y apresentou o menor valor, resultado da direção de deposição das camadas que aumentou o número de interfaces camada/camada.

O aumento da espessura de base e topo (EBT) apresentou uma pequena influência positiva no módulo de elasticidade, sendo a espessura de duas camadas (0,38 mm) a combinação que resultou no valor mais elevado. Os valores reduzidos dos corpos de prova com uma camada podem ter sido ocasionados pela superfície irregular das peças, característica comum para peças produzidas com uma camada de topo ou base.

Os resultados do módulo de elasticidade das peças produzidas para analisar a influência da temperatura de extrusão do bocal (TEB), temperatura da mesa (TM) e distância entre camadas (DCD) são mostrados na Figura 38.

Figura 38 - Módulo de elasticidade *Chord* dos corpos de prova para temperatura de extrusão do bocal (TEB), temperatura da mesa (TM) e distância entre camadas (DCD).



Fonte: Autor.

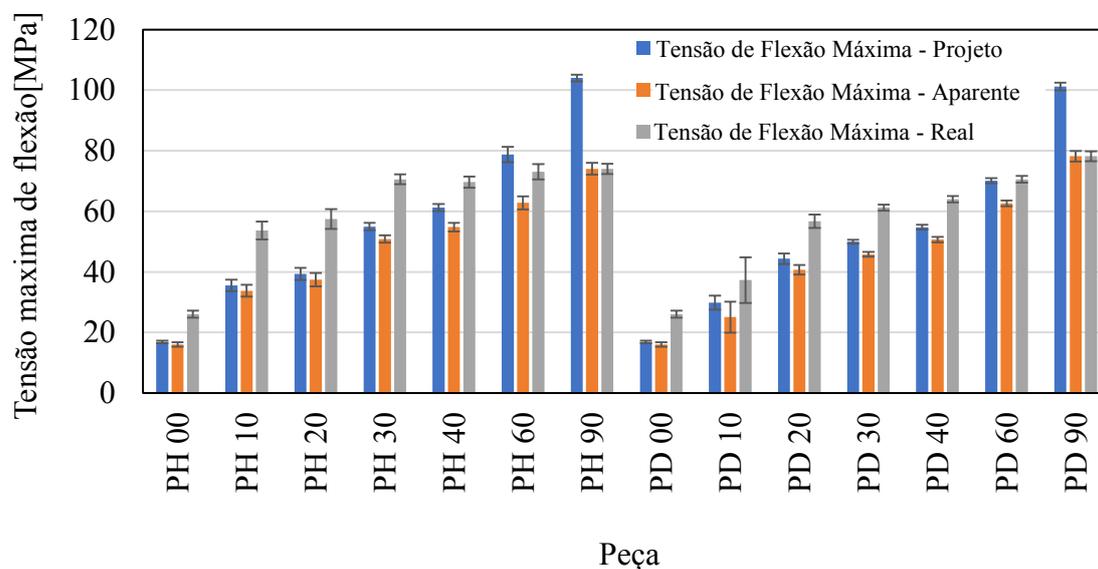
Todos os parâmetros analisados e apresentados na Figura 38 não geraram uma variação significativa no módulo de elasticidade das peças. Tal fato pode ter duas possíveis causas: estes parâmetros não influenciam o módulo de elasticidade das peças ou o nível de modificação não foi abrangente o suficiente.

4.5 Tensão Máxima de Flexão Três Pontos

A Figura 39 apresenta os dados da tensão de flexão máxima dos corpos de provas utilizados para analisar a porcentagem e padrão de preenchimento.

A alteração da porcentagem de preenchimento diagonal foi proporcional à tensão de flexão máxima dos corpos de provas. Este comportamento pode ser visualizado nos resultados obtidos pelos três métodos de análise dos corpos de prova, Tensão de Flexão Máxima – Projeto, Aparente e Real.

Figura 39 - Tensão de flexão máxima dos corpos de prova para preenchimento (PH) e diagonal (PD).



Fonte: Autor.

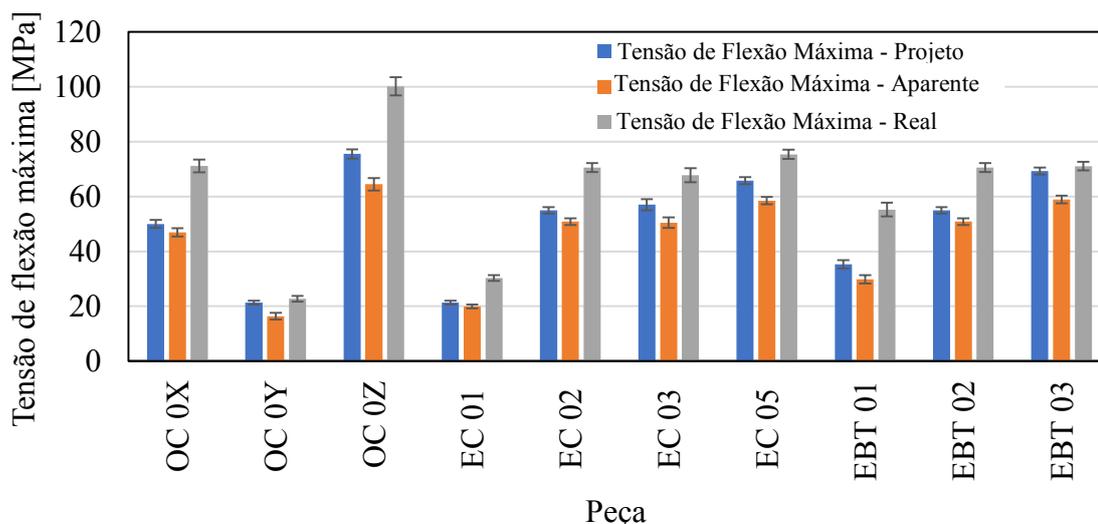
O incremento da porcentagem de preenchimento gerou um aumento na carga máxima e dimensões externas dos corpos de prova. O método de análise utilizando a inércia de projeto não considera as dimensões externas dos corpos de prova e consequentemente a tensão de flexão máxima aumenta de forma proporcional apenas a carga de ruptura. O método de análise utilizando o momento de inércia aparente considera as dimensões externas do corpo, logo, apesar do aumento da porcentagem de preenchimento causar o incremento carga máxima também ocorre o aumento do momento de inércia dos corpos de provas, estes dois fatores se ponderam e contém o aumento da tensão de flexão máxima.

O método de análise utilizando a geometria real considerou as medidas externas e também os vazios internos, determinando a “real” tensão atuante nos corpos de prova. Utilizando este método foi possível perceber que a tensão real se estabiliza aproximadamente após 30 % de preenchimento, ocorrência provavelmente relacionada com a melhor distribuição de tensão mecânica na geometria nesta porcentagem de preenchimento.

A Figura 40 apresenta os dados da tensão máxima de flexão dos corpos de provas utilizados para analisar a orientação de construção (OC), espessura de contorno (EC) e espessura base e topo (ETB). Os resultados indicam uma significativa modificação da resistência mecânica à flexão com a variação da orientação de construção. A orientação tipo Y

(Vertical) apresentou a menor tensão, este resultado está diretamente correlacionado com a direção de deposição das camadas originando um aumento no número de interfaces camadas/camadas. A diferença entre os outros dois tipos de orientação foi decorrente da quantidade de material usado em cada corpo de prova.

Figura 40 - Tensão de flexão máxima dos corpos de prova para orientação de construção (OC), espessura de contorno (EC), e espessura de base e topo (EBT).

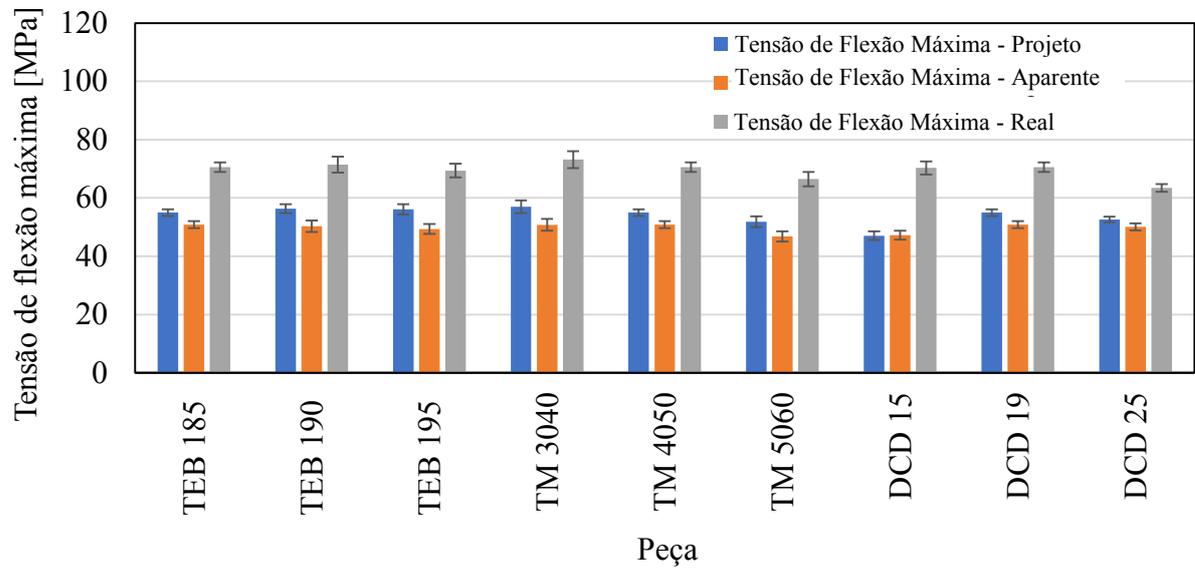


Fonte: Autor.

Os resultados da EC 01 (Um filamento de contorno) e EBT 01 (Uma camada de topo e base) foram menores provavelmente devido à superfície irregular destes corpos de provas, visto que, geralmente, corpos de prova que possuem apenas um filamento entre a parte interna e o exterior podem se deformar mecanicamente durante a fabricação.

Na Figura 41 é possível visualizar os resultados da tensão de flexão das peças produzidas para analisar a influência da temperatura de extrusão do bocal (TEB), temperatura da mesa (TM) e distância entre camadas (DCD). Nota-se que todos os parâmetros analisados não geraram uma modificação significativa na tensão máxima das peças. Tal fato pode ter ocorrido pela pequena influência dos parâmetros ou baixo nível de modificação dos mesmos.

Figura 41 - Tensão de flexão máxima dos corpos de prova para temperatura de extrusão do bocal (TEB), temperatura da mesa (TM) e distância entre camadas (DCD).



Fonte: Autor.

CAPÍTULO V

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, todas as equações utilizadas para definição da tensão de flexão são derivadas da teoria da Lei de Hook. Esta teoria é aplicável para materiais com módulo de elasticidade praticamente constante e conseqüentemente a aplicação dos métodos de análise derivados seguem a mesma restrição. O procedimento proposto pela norma ASTM D790 apresentou resultados com modificações significativas no módulo de elasticidade, estas modificações foram originadas do tratamento incorreto da seção transversal dos corpos de prova.

As divergências dos módulos de elasticidade geradas pelo método proposto neste trabalho foram inferiores ao sugerido pela norma, esta redução da alteração da elasticidade é originada da melhor aproximação da seção transversal analisada e real. As diferenças do módulo de elasticidade ainda podem ser reduzidas caso seja considerado os poros e outros defeitos não controlados e não caracterizados dentro dos corpos de provas.

A otimização das propriedades mecânicas dos corpos de prova fabricados por manufatura aditiva por extrusão polimérica envolve inúmeros parâmetros de controle do processo. Os parâmetros otimizados durante esta pesquisa foram: porcentagem de preenchimento (P), padrão de preenchimento (H e D) e temperatura de extrusão (EBT). Os demais parâmetros avaliados não apresentaram uma modificação significativa, o que não implica que não afetaram as propriedades mecânicas da peça, apenas que não afetaram para os níveis modificação e ensaios aplicados. Os resultados pertinentes aos parâmetros otimizados são apresentados a seguir.

- Porcentagem de preenchimento (30 %): a máxima carga de flexão foi alcançada pelos corpos com 90 % de preenchimento, porém a maior tensão foi suportada pelos corpos de prova com 30 % de preenchimento hexagonal. O módulo de elasticidade das peças com esta porcentagem de preenchimento foi significativamente superior aos demais.

- Padrão de preenchimento (Hexagonal): as peças com 30 % de preenchimento hexagonal (PH) apresentaram uma tensão máxima de flexão e módulo de elasticidade superiores a porcentagem correspondente de preenchimento com o padrão diagonal (PD). Caso a aplicação da peça exija melhores tolerâncias dimensionais é recomendado utilizar as peças com preenchimento diagonal (PD).
- Temperatura de extrusão (185 °C): esta temperatura foi capaz de fornecer a maior resistência mecânica para as peças de PLA, redução no consumo de energia e possivelmente no desgaste do bocal. A temperatura de 195 °C pode ser considerada caso seja necessário acoplar a peça a outros equipamentos que exijam tolerâncias dimensionais reduzidas.

CAPÍTULO VI

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAFAGHANI, A., QATTAWI, A., ABLAT, M. A., Design Consideration for Additive Manufacturing: Fused Deposition Modelling. *Open journal of Applied Sciences*, v. 7, pg. 291–318, 2017.

AMANO, R. S., *LASER engineered net shaping process for SAE 4140 low alloy steel. Materials Science and Engineering*, v. 528, pg. 6680– 6693, 2011.

LANZOTTI, A., GRASSO, M., STAIANO, M.; MARTORELLI, M., *The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer, Rapid Prototyping Journal*, v. 21, pg. 604–617, 2015.

ASTM F2792-10. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. ASTM International*, West Conshohocken, PA, [https://doi.org/ 10.1520/F2792-10](https://doi.org/10.1520/F2792-10), 2010.

ASTM D790-17., *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Material. ASTM International*, West Conshohocken, PA, <https://doi.org/10.1520/D0790-17>, 2017.

BIKAS, H., STAVROPOULOS, P., CHRYSSOLOURIS, G., *Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, v. 83, pg. 389–405, 2016.

BRIAN, N. T., ROBERT, S. AND SCOOT, A. G., *A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. Rapid Prototyping Journal*, v. 20, pg. 192–204, 2014.

BOURELL, D., KRUTH, J.P., LEU, M., LEVY, G., ROSEN, D., BEESE, A.M., CLARE, A., *Materials for additive manufacturing. Manufacturing Technology*, v. 66, pg. 659–681, 2017.

CHACÓN, J.M.; CAMINERO, M. A.; GARCIA-PLAZA, E.; LÓPEZ, P. J. N., *Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process*

parameters on mechanical properties and their optimal selection. **Materials and Design**, v. 124, pp. 143–157, 2017.

CHEAH, C. M., CHUA, C. K., LEE, C. W., FENG, C., TOTONG, K., *Rapid prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting*. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, v. 25, pg. 308–320, 2005.

COON, C., PRETZEL, B. AND LOMAX, T., *Preserving rapid prototypes: a review*. **Heritage science**, v. 4, pg. 4–40, 2016.

CROUCILLO, A. P. R., ARRUDA, J. D., FRANCO, L. J. V., LEITE, J. F., CARVALHO, M. R., Avaliação das características mecânicas do PLA, impressa em 3D, para aplicação em próteses em animais de pequeno e médio porte, **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, v. 15, pg. 221–225, 2017.

DIZON, J. R. C., ESPERA, A. H., CHEN, Q., ADVINCULA, R. C., *Mechanical characterization of 3D-printed polymers*. **Additive manufacturing**, v. 20, pg. 44–67, 2017.

FRANCO, F.I., AURAS, R., BURGESS, G., HOLMES, D., FANG, X., RUBINO, M. AND SOTO-VALDEZ, H., 2016. *Concurrent solvent induced crystallization and hydrolytic degradation of PLA by water-ethanol solutions*. **Polymer**, v. 99, pg. 315–323, 2016.

GAJDOS, I., SLOTA, J., *Influence of printing conditions on structure in FDM prototypes*. **Tehnički vjesnik**, v. 20, pg.231-236, 2013.

GOLDSBERRY, C., *Rapid change in additive manufacturing landscape*, 2019. Disponível em:<http://www.plasticstoday.com/articles/rapid-change-additive-manufacturing-landscape>. Acesso em: 16/06/2019.

GOU, N., LEU, M. C., **Additive manufacturing: technology, applications and research needs**. **Front. Mech. Eng.** 2013, v. 8, pg. 215–243, 2013.

GROSS, B. C., ERKAL, J. L., LOCKWOOD, S. Y., CHEN, C., SPENCE, D. M., *Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences*. **Anal. Chem.**, v. 86, pg. 3240–3253, 2014.

GUESSASMA, S., BELHABIB, S., NOURI, H., HASSANA, O. B., *Anisotropic damage inferred to 3D printed polymers using fused deposition modelling and subject to severe compression*, **European Polymer Journal**, v. 85, pg. 324–340, 2016.

HE, Y., WU, Y., FU, J.Z., GAO, Q., QUI, J.J., *Developments of 3D Printing Microfluidics and Applications in Chemistry and Biology: A Review Electroanalysis*, v. 28, pg. 1–22, 2016.

ILARDO, R., WILLIAMS, C. B., *Design and manufacture of a formula SAE intake system using fused deposition modeling and fiber reinforced composite materials*". **Rapid Prototyping Journal**, v. 16, pg. 174–179, 2010.

ISO. ISO 178: 2001 *Plastics – determination of flexural properties* **ISO International**. <https://doi.org/83.060/ISO 178>, 2001.

JAROSLAW KOTLINSKI, (2014) *"Mechanical properties of commercial rapid prototyping materials*, **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, pg. 499–510, 2014.

KANTAROS, A., CHATZIDAI, N., KARALEKAS, D., *3D printing-assisted design of scaffold structures*. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, v. 82, pg. 559–571, 2015.

LETCHER, T., WAYTASHEK, M., *Material property testing of 3D-Printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer*. DOI: 10.1115/IMECE2014-39379, 2014.

MOHAMED, O.A., MASOOD, S.H., BHOWMIK, J.L., SOMERS, A.E. (2017). *Investigation on the tribological behavior and wear mechanism of parts processed by fused deposition additive manufacturing process*. **Journal of Manufacturing Processes**. v.29. pg.149, 2017.

OISHI, M., FUKUDA, M., YAJIMA, N., YOSHIDA, K., TAKAHASHI, M., HIRAISHI, T., TAKAO, T., SAITO, A., FUJII, Y. J., *Interactive presurgical simulation applying advanced 3D imaging and modeling techniques for skull base and deep tumors*. **NEUROSURG**, v. 119, pg. 94–105, 2013.

MESSIMER, S. L., PEREIRA, T. R., PATTERSON, A. E., LUBNA, M., DROZDA, F. O., *Full-Density Fused Deposition Modeling Dimensional Error as a Function of Raster Angle and Build Orientation: Large Dataset for Eleven Materials*, DOI: 10.20944/preprints201812.0148, v. 1, 2018.

SILVA, G.C., Prototipagem rápida e ferramental rápido aplicados às peças utilizadas em ensaios estáticos de embalagens para acondicionamento e transporte de peças automotivas. Biblioteca digital USP, 2008.

SINGH, R., SINGH, J., SINGH S., *Investigation for dimensional accuracy of AMC prepared by FDM assisted investment casting using nylon-6 waste based reinforced filament”*. *Measurement. Journal of Manufacturing Processes*. v. 78, pg. 253–259, 2015.

STANSBURY, F., IDACAVAGE M., *3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities*. *Dental materials*, v. 32, pg. 54–64, 2016.

WU, W., GENG. P., LI, G., ZHAO, D., ZHANG, H., ZHAO, J., *Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS*. *Material*. v.8, pg.5834-5846, 2015.

YAN, X., GU, P., *A review of rapid prototyping technologies and systems*. *Elsevier*, v. 28, pg. 307-318, 1996.

Yoon, Y. J., Moon, S.K. & Hwang, J. J., *3D printing as an efficient way for comparative study of biomimetic structures — trabecular bone and honeycomb* *Mech Sci Technol.*, v. 28, pg. 4635, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-1031-4>.