

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMATIVA

RUBENS HENRIQUE DA SILVA SOUZA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE TENACIDADE EM PEÇAS
OBTIDAS POR DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO - FDM

Joinville

2019

RUBENS HENRIQUE DA SILVA SOUZA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE TENACIDADE EM PEÇAS
OBTIDAS POR DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO - FDM

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Carlos Maurício Sacchelli.

Joinville

2019

RUBENS HENRIQUE DA SILVA SOUZA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE TENACIDADE EM PEÇAS
OBTIDAS POR DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO - FDM

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Maurício Sacchelli , Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Wagner Maurício Pachekoski, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Sueli Fischer Beckert, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde, pela proteção e por iluminar meu caminho durante essa jornada.

Aos meus pais pela educação, pelo amor incondicional e apoio em todos os momentos de minha vida.

Ao professor orientador Dr. Carlos Maurício Sacchelli, primeiramente pela paciência e disposição em me ajudar e por passar parte do seu conhecimento e experiência.

A todos os professores que me ajudaram e me ensinaram o valor do conhecimento.

Ao Laboratório de Inovação e Desenvolvimento de Produtos (LiD) , que ao longo do curso concedeu a oportunidade de participar como bolsista voluntário, bolsista de extensão, bolsista de iniciação científica e estagiário. Em especial, ao coordenador do laboratório que é o meu orientador do presente trabalho e ao membro Willian Freire Harshe que contribuiu para o bom andamento dessa pesquisa.

Gostaria também, de agradecer ao Laboratório de Microfluídica (LAMICRO), ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LaCMA) e ao Laboratório de Metrologia e Qualidade Industrial (METeQ), por prestarem suporte através de equipamentos e principalmente através do conhecimento.

À empresa Perfilpolimer pela parceria em conceder o filamento PLA para o presente trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina agradeço por fornecer um ensino de qualidade, gratuito e que abriga uma diversidade cultural que nos enriquece.

RESUMO

A crescente utilização do processo de manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, permite a construção de modelos físicos através adição de camadas de material sobre camadas, sendo a tecnologia de Deposição de Material Fundido (FDM), a técnica mais utilizada e com menor custo. Esse tipo de equipamento possibilita a fabricação de objetos mediante a fusão da matéria-prima, que por sua vez se encontra na forma de filamentos bobinados em carretéis. O Poli (Ácido Láctico) (PLA) é um dos materiais de maior uso, devido à sua facilidade de impressão. Porém, ainda existem algumas incógnitas quanto a influência dos parâmetros de fabricação em relação a resistência mecânica do modelo impresso. Desta maneira, este trabalho tem como objetivo, analisar os resultados de resistência ao impacto para diferentes combinações de parâmetros, com PLA de um mesmo lote em três configurações: natural, branco e preto. Os corpos de provas manufaturados tem a combinação de parâmetros definidos com um valor mínimo e um valor máximo, seguindo um planejamento de experimentos. O ensaio de impacto, do tipo Izod, seguiu a norma ASTM D256-10 e para a análise dos resultados foi utilizado o delineamento de experimentos. Com isso, chegou-se nas possíveis combinações de parâmetros para obter a maior resistência mecânica ao impacto, concluindo que o grau de influência de cada parâmetro impacta diferentemente para cada cor.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. PLA. FDM. resistência ao impacto.

ABSTRACT

The increasing use of the additive manufacturing process, popularly known as 3D printing, allows the construction of physical models by adding material layers over layers, being the technology of Fusion Deposition modeling (FDM) the most used technique and the cheapest one. This type of equipment makes possible to manufacture objects by melting the raw material, which is supplied in the form of coiled filaments. Therefore, Poly (Lactic Acid) (PLA) is one of the most widely used material, due to its easy of printing. However, there are still some uncertainties as the influence of manufacturing parameters in relation to the mechanical strength of the printed model. This paper presents the analysis of impact resistance results, for different PLA parameter combinations, using material of the same batch in three configurations: natural, white and black. The manufactured specimens have the combination of defined parameters with a minimum and a maximum value, following a design of experiments. The Izod impact test followed the ASTM D256-10 standard and, for the results analysis, a experiment design was used. As a result, different parameter combinations have been defined to achieve a greater mechanical impact resistance, concluding that the degree of influence of each parameter impacts differently for each color.

Keywords: Additive Manufacturing. PLA. FDM. impact resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de manufatura subtrativa e aditiva.....	12
Figura 2: Classificação da Manufatura Aditiva.....	17
Figura 3: Equipamento SLM.....	18
Figura 4: Equipamento EBM.	19
Figura 5: Equipamento SLS.	20
Figura 6: Equipamento SLA.....	21
Figura 7: Equipamento MJM.	21
Figura 8: Equipamento DLP.....	22
Figura 9: Equipamento LOM	23
Figura 10: Equipamento Diw	24
Figura 11: Equipamento FDM ou FFF.....	25
Figura 12: Etapas do Processo FDM ou FFF.	26
Figura 13: Estrutura molecular do PLA	27
Figura 14: Linhas de perímetro.	28
Figura 15: Linhas de preenchimento a) 30%, b) 50% e c) 100%.....	29
Figura 16: Posição de impressão	30
Figura 17: Altura da camada	31
Figura 18: Linhas de orientação do preenchimento.	32
Figura 19: Camada superior	33
Figura 20: Camada inferior	34
Figura 21: Preenchimento interno tipo grade	35
Figura 22: Preenchimento interno tipo retilíneo.....	35
Figura 23: Preenchimento externo do tipo concêntrico.....	36
Figura 24: Preenchimento externo do tipo retilíneo.....	36
Figura 25: Efeito do Outline overlap.....	37
Figura 26: Impressora 3DCloner DH	38
Figura 27: Dimensões dos corpos de prova segundo a norma ASTM D 256-10.....	39
Figura 28: Equipamento para teste de impacto.	40
Figura 29: Equipamento de Índice de fluidez.	41
Figura 30: Microscópio estéreo.....	42
Figura 31: Ruptura dos CP's: a) natural, b) branco e c) preto.....	66
Figura 32: Linhas dos perímetros dos CP's: a) natural, b) branco e c) preto.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros fixos.	39
Tabela 2: Variáveis da DOE fracionada.	44
Tabela 3: Variáveis da DOE Completa.	52
Tabela 4: Parâmetros fixos na DOE completa.	52
Tabela 5: Grau de influência de cada parâmetros para diferentes cores.	63
Tabela 6: Melhores resultados para cada cor.	63
Tabela 7: Menores resultados para cada cor	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Manufatura Aditiva na indústria aeroespacial	13
Gráfico 2: Índice de fluidez do PLA.	43
Gráfico 3: Gráfico de Pareto para DOE fracionada - Natural.	45
Gráfico 4: Gráfico de efeitos principais para o preenchimento interno.	46
Gráfico 5: Gráficos dos efeitos principais para DOE fracionada.	47
Gráfico 6: Gráfico de interação para médias ajustadas da orientação do preenchimento x preenchimento interno.	48
Gráfico 7: Gráfico de interação para médias ajustadas da posição x altura da camada.	49
Gráfico 8: Gráfico de interação para médias ajustadas da posição x orientação do preenchimento.	50
Gráfico 9: Gráfico de interação para médias ajustadas da posição x perímetro.....	51
Gráfico 10: Gráfico de Pareto para DOE Completa Branco.	53
Gráfico 11: Gráficos dos efeitos principais do Branco.	54
Gráfico 12: Gráfico de interação para médias ajustadas do Branco.....	55
Gráfico 13: Gráfico de Pareto para DOE Completa Preto.	56
Gráfico 14: Gráficos dos efeitos principais do Preto.	57
Gráfico 15: Gráficos de interações para as médias ajustadas do Preto	59
Gráfico 16: Gráfico de Pareto para o DOE Completo Natural.....	60
Gráfico 17: Gráficos dos efeitos principais do Natural.	61
Gráfico 18: Gráficos de interações para as médias ajustadas do Natural.....	62
Gráfico 19: Maiores resultados de impacto para cada cor.	64
Gráfico 20: Menores resultados de impacto para cada cor.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM – American Society for Testing and Materials
CAD – Computer Aided Design
CP – Corpo de Prova
DIW - Direct Ink Writing
DLP - Digital Light Processing
DOE - Design of Experiments
EBM - Electron Beam Melting
FDM – Fused Deposition Modeling
FFF - Fused Filament Fabrication
LENS – Laser Engineered Net Shaping
LiD – Laboratório de Inovação e Desenvolvimento de Produtos
LOM - Laminated Object Manufacturing
MA – Manufatura Aditiva
MJM - Multi-Jet Modeling
PLA – Póli (Ácido láctico)
PP - Polipropileno
RepRap - Replicating Rapid
SLA - Stereolithography
SLM - Selective Laser Melting
SLS - Selective Laser Sintering
STL - Standard Triangle Language ou Standard Tessellation Language
UV - Ultravioleta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS.....	15
2 MANUFATURA ADITIVA.....	16
2.1 PRINCIPAIS PROCESSOS DE MA	17
2.1.1 Processo baseado em Pó.....	17
2.1.1.1 Fusão Seletiva a Laser (SLM)	18
2.1.1.2 Fusão de Feixe de Elétrons (EBM)	18
2.1.1.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)	19
2.1.2 Processo baseado em Líquido.....	20
2.1.2.1 Estereolitografia (SLA)	20
2.1.2.2 Multi-Jet Modeling MJM	21
2.1.2.3 Processo de Luz Direta DLP	22
2.1.3 Processos sólidos	23
2.1.3.1 Manufatura Laminar de Objetos LOM.....	23
2.1.3.2 Direct Ink Writing DIW	24
2.1.3.3 Modelagem por Deposição Fundida FDM ou Fabricação de Filamento Fundido FFF	24
2.2 PROCESSO DE MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA- FDM	26
2.2.2 Etapas da manufatura.....	26
2.2.3 PLA	27
2.2.4 Parâmetros de fabricação	28
2.2.4.1 Perímetro	28
2.2.4.2 Preenchimento interno.....	28
2.2.4.3 Posição.....	29
2.2.4.4 Altura da Camada	31
2.2.4.5 Orientação do preenchimento	32
2.2.4.6 Temperatura.....	33
2.2.4.7 Camadas superiores	33
2.2.4.8 Camadas inferiores	34
2.2.4.9 Padrão do preenchimento interno	34
2.2.4.10 Padrão do preenchimento externo	36
2.2.4.11 Outline overlap	37
3 METODOLOGIA.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43

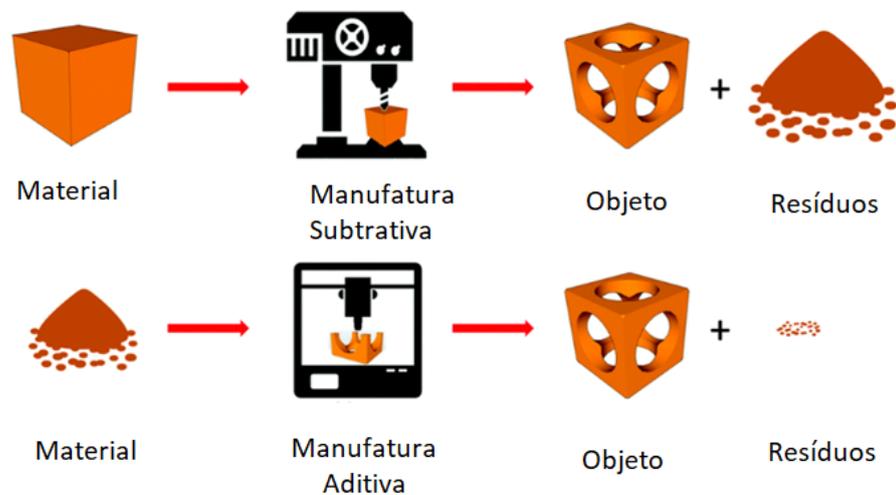
4.4.1 Resultados dos índices de fluidez	43
4.4.2 Resultado DOE fracionado	43
4.4.3 Resultado DOE Completa.....	51
4.4.3.1 Resultado do DOE Completa Branco	52
4.4.3.2 Resultado DOE Completa Preto	56
4.4.3.3 Resultado DOE Completa Natural	60
4.4.4 Resultados para as três cores.....	63
4.4.5 Resultados Microscópio estéreo	65
5 CONCLUSÕES.....	67
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
REFERÊNCIAS	70
APÊNDICE A – PARÂMETROS E RESULTADOS DO DOE COMPLETO BRANCO, PRETO E NATURAL	75

1 INTRODUÇÃO

Constantemente, as empresas de manufatura buscam novas tecnologias, visando aumentar a competitividade no mercado e a eficiência no processo produtivo. Segundo Lim et al. (2004), a produtividade é alcançada quando um produto é comercializado rapidamente e com baixo custo. Pensando nessas duas condições, a Manufatura Aditiva - MA que pode ser definida como um processo de adição de material, possibilita a produção de protótipos/produtos em questão de horas. Portanto essa é uma vantagem para as empresas devido a redução no tempo de lançamento de um produto sobre os concorrentes (LIM et al., 2004).

A MA é uma tecnologia que tem o objetivo de não utilizar a retirada de material durante o processo produtivo (KRUTH; LEU; NAKAGAWA, 1998), permitindo a redução na quantidade de resíduos durante o processo de fabricação quando comparado com os processos subtrativos. Na Figura 1, observa-se duas possibilidades para a construção de um modelo, o subtrativo e aditivo. O subtrativo, inicia o processo através de um bloco e durante algumas etapas ocorre a remoção até chegar no modelo final. Já o processo aditivo, inicia-se com a deposição de matéria prima até a conclusão do modelo proposto. Segundo Carneiro, Silva e Gomes (2015), essa é uma técnica que consiste na construção pela sobreposição de camadas consecutivas de material. Sendo assim, os dois processos resultam em quantidades diferentes de resíduos para o mesmo modelo proposto.

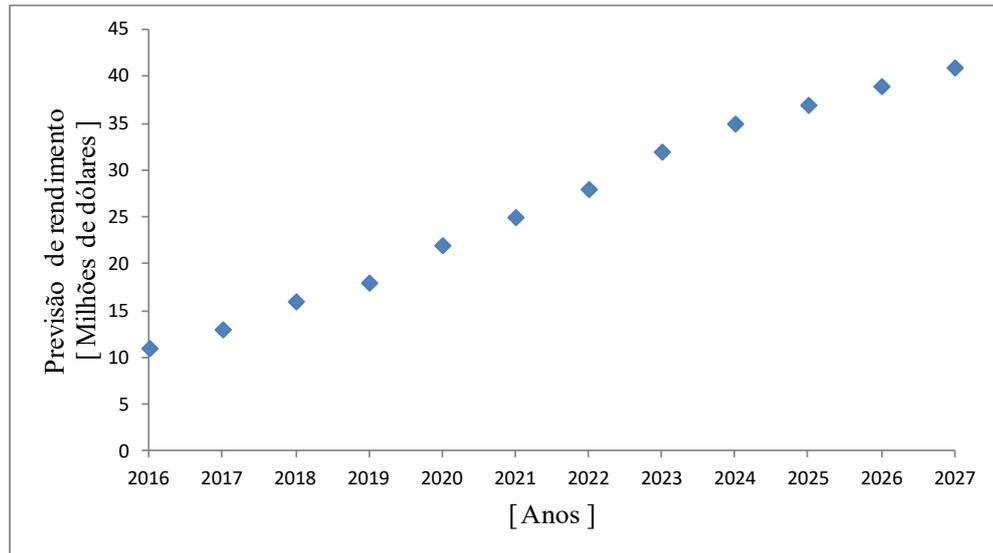
Figura 1: Processo de manufatura subtrativa e aditiva.



Fonte: Adaptado de BCT (2019).

De acordo com Manda, Kampurath e Msrk (2018), a MA tem uma previsão de crescimento no mercado aeroespacial de 27,42% entre o período de 2017 a 2022 e continuar avançando nos próximos anos, como mostra o Gráfico 1.

Gráfico 1: Manufatura Aditiva na indústria aeroespacial



Fonte: Adaptado de Manda, Kampurath e Msrk (2018).

Segundo Alkaios (2019), as vantagens do processo de MA são: as prototipagens de baixo custo com retorno rápido, custo inicial baixo, grande variedade de materiais, geometria complexas sem custo adicional e peças personalizadas.

Existem vários processos na MA e sendo a Deposição de Material Fundido (Fusion Modeling Materials) – FDM umas das tecnologias mais populares, muito devido ao baixo custo da matéria prima e dos equipamentos do processo produtivo envolvido. (CARNEIRO; SILVA; GOMES, 2015).

O processo citado anteriormente é baseado em matéria prima sólida, podendo estar na forma de filamento, lâmina ou outra qualquer. Em alguns dos processos, a fusão do material ocorre antes da deposição, outros, somente recortam uma lâmina do material adicionado (VOLPATO et al., 2007). No geral, durante o processo produtivo uma resina termoplástica é aquecida e extrusada a partir de um bico injetor que se move em um plano X-Y. Posteriormente, quando uma camada é constituída, a base se move no eixo Z e uma nova camada é depositada. A repetição desse processo resulta em um produto final tridimensional.

Devido a construção por camadas nesse processo, fica visível na superfície do modelo as linhas de impressão. Segundo Souza e Sacchelli (2014), é importante analisar a posição da impressão, pois o sentido das linhas alteram as características mecânicas.

Com o aumento da acessibilidade das máquinas de MA pelo processo FDM, houve o estímulo da comunidade científica em buscar a caracterização e estimar o impacto mecânico dessas tecnologias para diferentes materiais e processos (CUAN-URQUIZO et al., 2019).

Vários materiais poliméricos estão disponíveis no mercado, como o ABS, Nylon, policarbonato, poliácido láctico (PLA) e outros. O PLA se mostrou como um dos favoritos dado o seu baixo ponto de fusão, requerendo menos energia para o seu processamento, além de ser mais seguro que o ABS, por não ser tóxico (HUNT et al., 2015).

Através de estudos, alguns autores identificaram variações na resistência mecânica quando ocorria algumas alterações nos parâmetros do processo. Souza e Sacchelli (2014) identificaram que a posição de impressão impactava na resistência mecânica. Já Tymrak, Kreiger e Pearce (2014), variaram o preenchimento em $0^{\circ}/90^{\circ}$ e $45^{\circ}/-45^{\circ}$, altura da camada em 0,2, 0,3 e 0,4mm e observou divergência no processo quando realizou ensaio mecânico de tração.

Segundo Casagrande (2018), Mohamed, Masood e Bhowmik (2015) é possível observar que o preenchimento interno, altura de camada, número de perímetro, orientação da camada, posição de impressão e a pigmentação no filamento são fatores importantes no processo da manufatura aditiva.

Desta maneira é importante realizar um estudo que avalie a influência dos parâmetros do processo na resistência mecânica ao impacto.

Desta maneira, pretende-se neste trabalho investigar os parâmetros que influenciam a tenacidade no processo FDM, com o auxílio de um planejamento de experimentos.

1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência dos parâmetros de processo nas propriedades mecânica de impacto em peças obtidas por Deposição de Material Fundido.

Sendo os objetivos específicos:

- Identificar por meio da revisão da literatura os principais parâmetros que impactam nas propriedades mecânicas do processo FDM;
- Avaliar a viabilidade de processamento;
- Avaliar se os pigmentos utilizados para coloração influenciam a resistência mecânica no material PLA, por meio de um Planejamento de Experimentos;
- Avaliar a influência dos parâmetros nas propriedades mecânicas através da medida de resistência ao impacto;

2 MANUFATURA ADITIVA

A American Society for Testing and Materials (ASTM) estabeleceu a nomenclatura Manufatura Aditiva (MA) para agrupar todas as tecnologias de máquinas com o princípio de adição de material existentes e futuras. Também teve como objetivo padronizar o termo entre usuários, produtores, pesquisadores, educadores e mídia, a partir da norma F2792-12a (ASTM, 2013).

Para Volpato et al. (2007), os processos de fabricação mecânicos normalmente são separados em grupos: os derivados da fusão, remoção de material, conformação e adição de material.

O processo de adição de camadas planas, possui um grande diferencial em relação aos demais processos existentes, que é a sua capacidade de automação e a não necessidade da utilização de moldes e ferramentas. (MANDA; KAMPURATH; MSRK, 2018).

Segundo Santana, Alves e Netto (2017), a Manufatura Aditiva é um processo de prototipagem rápida de fabricação de forma livre, que permite ao usuário a fabricação da peça real apenas com um modelo Computer Aided Design (CAD). Esse desenho tridimensional, através de um software específico, é dividido em diversas camadas, e a peça é construída camada a camada sem a necessidade de outras ferramentas específicas.

Segundo Eiliat e Urbanic (2018), MA é um processo que envolve a extrusão de material colocado lado a lado para criar camadas empilhadas, formando um determinado componente e para Abdulhameed et al. (2019), MA pode ser descrita como uma técnica de mistura de materiais por meio de fusão, ligação ou solidificação de resinas líquidas ou pós, sendo construído a partir de um modelo CAD 3D no modo de camada sobre camada.

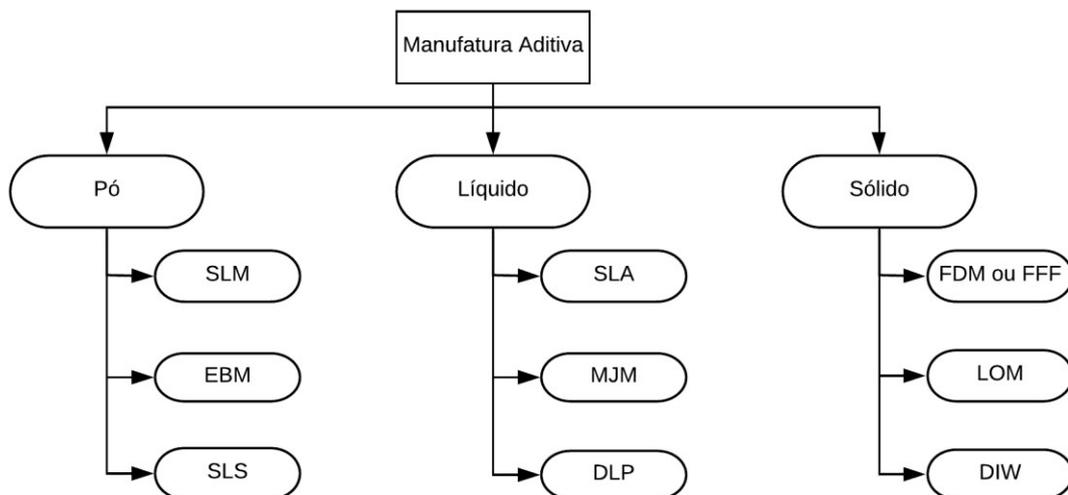
Devido a diversidade dos tipos de processos utilizados nessa tecnologia, alguns autores classificaram as técnicas segundo o estado inicial da matéria prima, base na dimensão da máquina, dimensão do bico, espaço de trabalho, equipamento específico, princípio do processo (VOLPATO et al., 2007; ABDULHAMEED et al., 2019; WILLIAMS; MISTREE; ROSEN, 2008; BLAND, 1997; PHAM; GAULT, 1998; GOH et al., 2018; RAMAKRISHNA; SINGH, 2017).

2.1 PRINCIPAIS PROCESSOS DE MA

Nesta secção serão apresentados os principais processos de MA, classificados segundo o estado inicial da matéria prima, tendo por objetivo mostrar que mesmo para diferentes processos e matérias, ambos utilizam o mesmo princípio produtivo.

Segundo Volpato et al. (2007) e Abdulhameed et al. (2019), essa classificação pode ser dividida em três grupos: os materiais líquidos, em pó e sólidos. Cada grupo é dividido em subtópicos que representam os princípios produtivos, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2: Classificação da Manufatura Aditiva.



Fonte: Adaptado de Abdulhameed et al. (2019).

2.1.1 Processo baseado em Pó

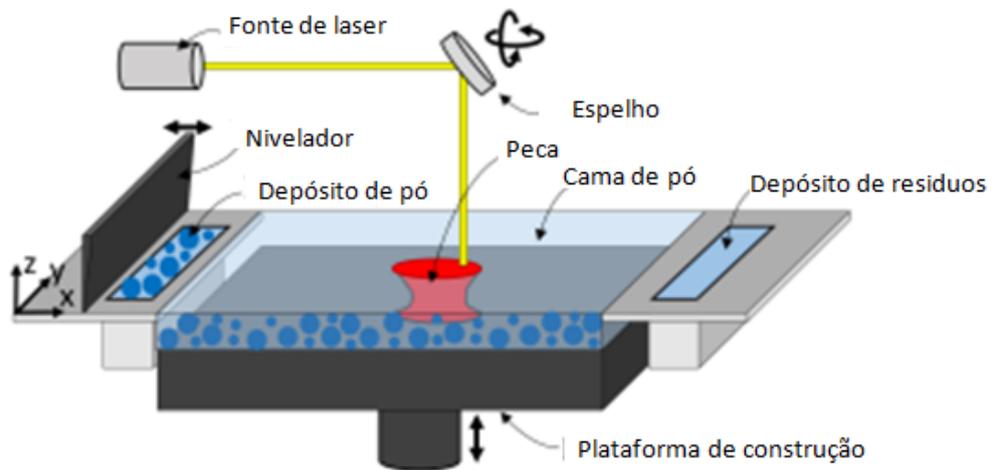
De acordo com Volpato et al. (2007) e Abdulhameed et al. (2019), neste grupo o estado inicial da matéria-prima está na forma de pó, antes do processamento. Entre algumas das tecnologias existentes, Fusão Seletiva a Laser (SLM), Fusão de feixe de elétrons (EMB) e Sinterização Seletiva a Laser (SLS).

2.1.1.1 Fusão Seletiva a Laser (SLM)

Neste processo, as camadas são constituídas através da fusão dos pós metálicos utilizando um laser com alta energia, concedendo peças com densidades de até 99,9% sem a utilização de ligantes intermediários ou pós-processamento (ABDULHAMEED et al., 2019).

Segundo Knol (2016), o laser funde as camadas formando seções transversais. Posteriormente, a plataforma responsável por movimentar o eixo Z desloca para baixo determinando a altura da camada de pó. Essa repetição ocorre até concluir a peça. A Figura 3 mostra esquematicamente essa técnica.

Figura 3: Equipamento SLM.

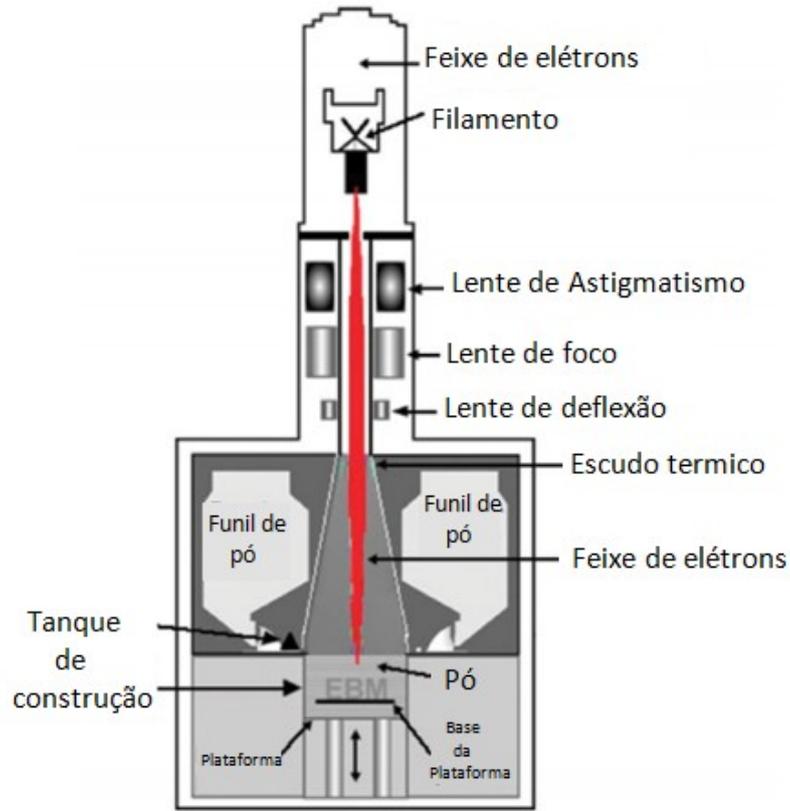


Fonte: Adaptado de Knol (2016).

2.1.1.2 Fusão de Feixe de Elétrons (EBM)

A Figura 4 mostra o processo Electron Beam Melting, conhecido como Fusão de Feixe de Elétrons EBM. A técnica inicia quando a atmosfera de trabalho, em vácuo, garante um ambiente livre de oxigênio, permitindo uma boa precisão no feixe do canhão de elétrons. A matéria prima fica dentro de um compartimento localizado em um nível mais alto, descendo sobre a mesa por intermédio da gravidade. Neste momento, o feixe de elétrons é focalizado com o auxílio de um sistema de lentes que faz múltiplas passagens sobre a superfície para aquecer o pó. Na sequência, o feixe passa novamente para fundir o pó. (MURR et al., 2010).

Figura 4: Equipamento EBM.



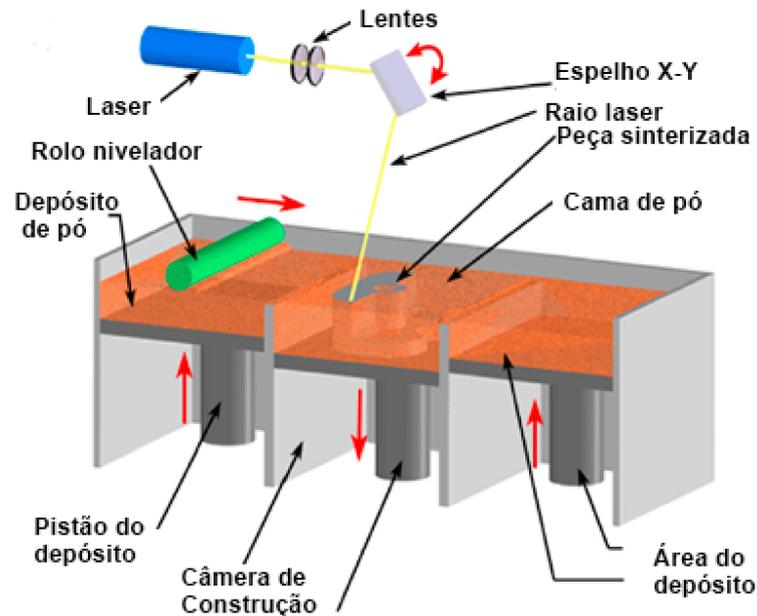
Fonte : Adaptado Trevisan et al. (2017).

2.1.1.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

Desenvolvida e patenteada pela Universidade do Texas, EUA, a sinterização seletiva a laser ou Selective Laser Sintering (SLS), é comercializada através da empresa DTM Corporation, segundo (VOLPATO et al., 2007).

Volpato et al. (2007) relata que o processo SLS utiliza um feixe de laser para sinterizar a matéria prima. O início do processo ocorre quando o material é nivelado com auxílio de um rolo. Isso decorre dentro de uma câmara fechada com a temperatura e atmosfera controladas. Posteriormente um sistema de feixe de laser se move sobre a superfície do material disperso, estabelecendo a sinterização do material. Posteriormente a plataforma desce no eixo Z e um incremento de material sobre a camada é auxiliado com rolo. Por fim, o processo se repete até concluir a peça e o pó não sinterizado é removido, podendo ser utilizado novamente. A Figura 5 mostra esquematicamente a máquina e seu funcionamento.

Figura 5: Equipamento SLS.



Fonte: Adaptado de Chang e Long (2011).

2.1.2 Processo baseado em Líquido

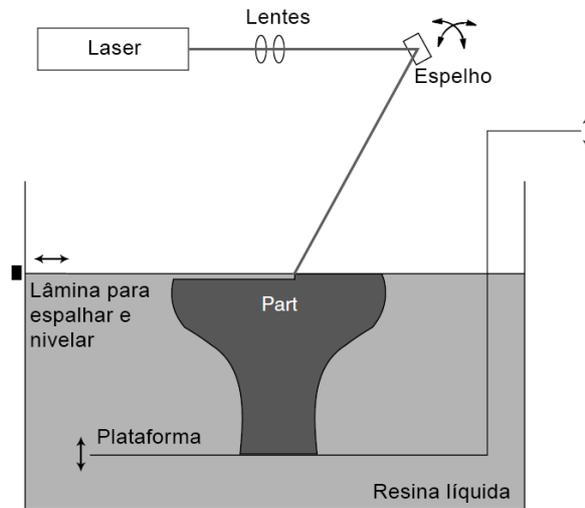
Nesta classe, a matéria prima para concepção do produto está na forma líquida. (VOLPATO et al., 2007 e ABDULHAMEED et al., 2019). A seguir serão abordados os principais processos que envolvem materiais nesse estado físico.

2.1.2.1 Estereolitografia (SLA)

Segundo Nickels (2016), a Estereolitografia ou Stereolithography Apparatus (SLA), foi patenteada em 1986, através da empresa 3D Systems. Esse processo iniciou a revolução na área da manufatura aditiva.

A técnica inicia quando o software controla um raio laser ultravioleta, focando sobre a superfície com o auxílio de espelhos. A resina líquida, que fica dentro de uma cuba, é solidificada quando o laser faz a varredura da camada. Após isso, a plataforma se desloca e inicia uma nova camada. Isso ocorre até o fim da peça (BURNS, 1991). A Figura 6 mostra esquematicamente o equipamento.

Figura 6: Equipamento SLA.

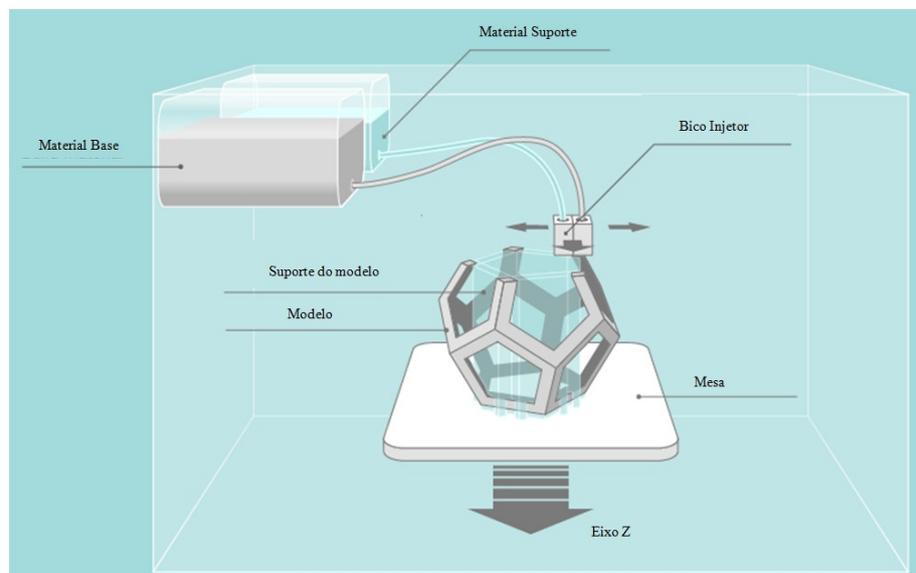


Fonte: Adaptado de Liou (2007).

2.1.2.2 Multi-Jet Modeling MJM

Segundo Abdulhameed et al. (2019), a técnica MJM emprega vários bicos injetores para fornecer um polímero ou cera curável por incidência ultravioleta. Quando o material é depositado, a lâmpada de UV realiza a cura, formando uma camada. Posteriormente, a mesa faz o movimento no eixo Z e o processo se repete até finalizar a peça, como mostra a Figura 7.

Figura 7: Equipamento MJM.



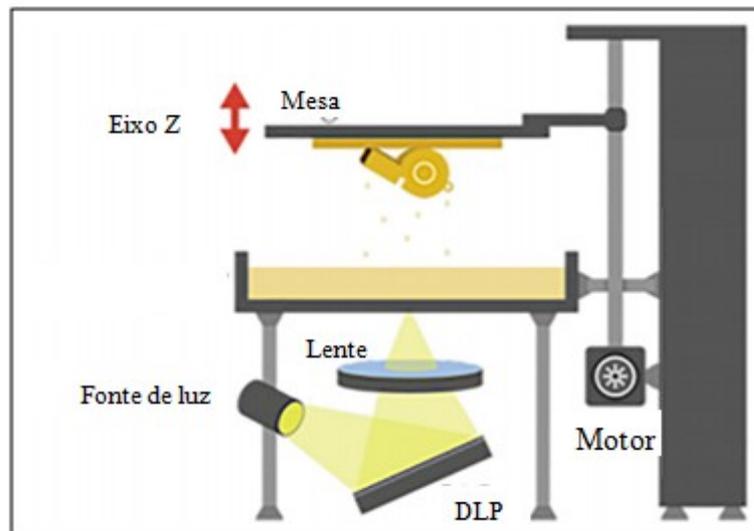
Fonte: Adaptado de Rabbit form (2014).

2.1.2.3 Processo de Luz Direta DLP

O Processo de Luz Direta ou Digital Light Processing DLP, surgiu em 1987 através da Texas Instruments e utiliza o sistema de fotopolímeros para realiza a cura do material (ABDULHAMEED et al., 2019).

Essa tecnologia tem o princípio semelhante da SLA, a diferença está na fonte de luz incidente na cura do material. Segundo Revilla-león e Özcan (2018), a imagem é criada por uma lâmpada de arco ou pequenos espelhos microscópicos colocados em um chip semiconductor. Cada espelho é a imagem representada por um ou mais pixels. Então, uma cuba com material líquido é exposto a luz do projetor, permitindo a cura de uma camada do modelo 3D proposto. Posteriormente, a mesa desloca para cima e o processo de cura é realizado novamente. Isso se repete até completar o número de camadas necessárias para concluir o objeto. A Figura 8 mostra esquematicamente a técnica citada anteriormente.

Figura 8: Equipamento DLP



Fonte: Adaptado de 3D Printing techniques (2019).

2.1.3 Processos sólidos

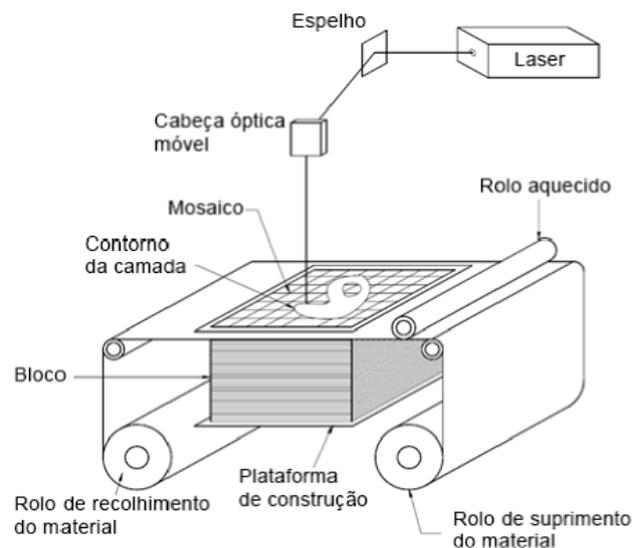
As técnicas baseadas em sólidos utilizam materiais com a capacidade de serem fundidos quando depositados, desta forma, esses insumos normalmente se encontram com aspecto de filamentos, folhas, rolos ou nenhuma forma específica (CASAGRANDE, 2018).

2.1.3.1 Manufatura Laminar de Objetos LOM

O processo de Manufatura Laminar de Objetos ou Laminated Object Manufacturing LOM utiliza a combinação da técnica aditiva e subtrativa. Durante o funcionamento, um laser é utilizado para cortar cada camada. Essas, são unidas através de adesivo, pressão e calor, de forma que tenha boa interação com as das lâminas. Desta forma (GOH et al., 2018).

Volpato et al. (2007) relata que a cada corte de camada um rolo aquecido passa para ajudar na interação entre as camadas, observado na Figura 9. Após isso a plataforma se desloca para baixo e uma nova camada de folha de material é disposta sobre a peça. O modelo termina quando essa técnica se repete até o número de camada necessárias para conclusão do objeto.

Figura 9: Equipamento LOM

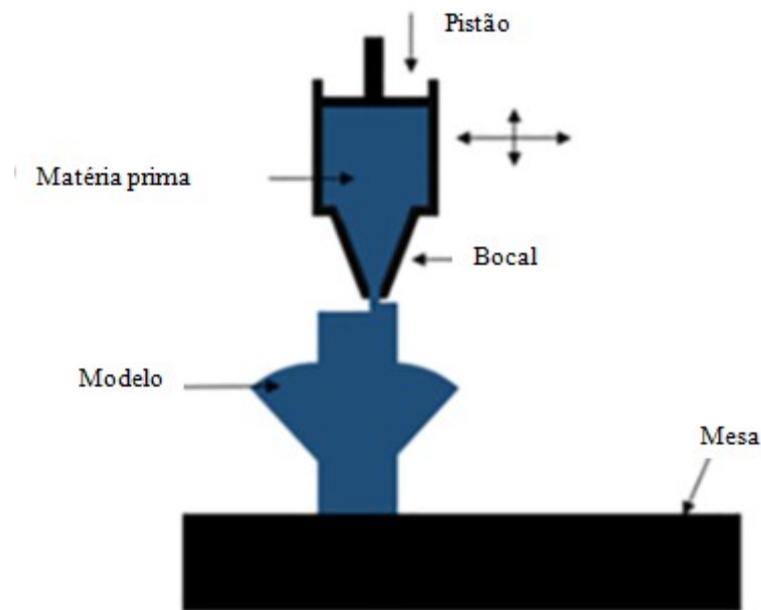


Fonte Casagrande (2018).

2.1.3.2 Direct Ink Writing DIW

O DIW surgiu pela primeira vez na década de 1990, através da Sandia National Laboratories. Nessa tecnologia, uma pasta plástica misturada com partícula de cerâmica é expelida por meio de um bocal para fabricar o modelo. O movimento do bocal é controlado através de um software usando informações do modelo CAD (ABDULHAMEED et al., 2019). O princípio de funcionamento é similar ao FDM, mas depende de um material pseudo plástico que é introduzido que deposita o material com o auxílio de um pistão, como mostra a Figura 10.

Figura 10: Equipamento Diw



Fonte: Adaptado de Abdulhameed et al. (2019).

2.1.3.3 Modelagem por Deposição Fundida FDM ou Fabricação de Filamento Fundido FFF

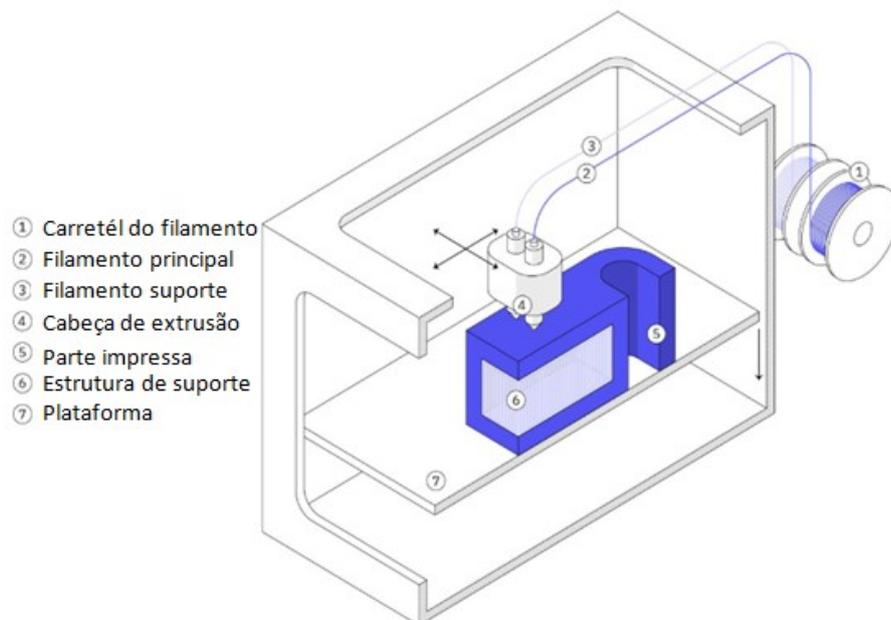
O processo de FDM, foi criado por Scott Crump. Essa, é uma técnica computadorizada que produz camada sobre camada, baseado na solidificação instantânea do material fundido a partir de um filamento (BURNS, 1991).

O termo Fused Filament Fabrication (FFF) e o FDM são sinônimos para esse processo. Devido ao registro comercial da sigla FDM, pela empresa Stratasys Inc, os

membros de uma comunidade chamada Replicating Rapid (RepRap) que tem por finalidade a construção desses equipamentos com um baixo custo, utilizaram o termo FFF para os membros não terem restrições judicial (JONES et al., 2009).

Segundo Volpato et al., (2007), a matéria prima, na forma de filamentos, é tracionado, através de um par de polias e empurrada por um canal aquecido. Nesse momento, o material atinge o estado pastoso e passa através de um bico extrusor. O cabeçote extrusor realiza a deposição e o movimento no plano até formar uma camada do modelo 3D definido. Após a camada estar completa, a mesa se move no eixo Z e o processo se repete. A Figura 11 demonstra esquematicamente o processo descrito.

Figura 11: Equipamento FDM ou FFF.



Fonte: adaptado de Alkaios, (2019).

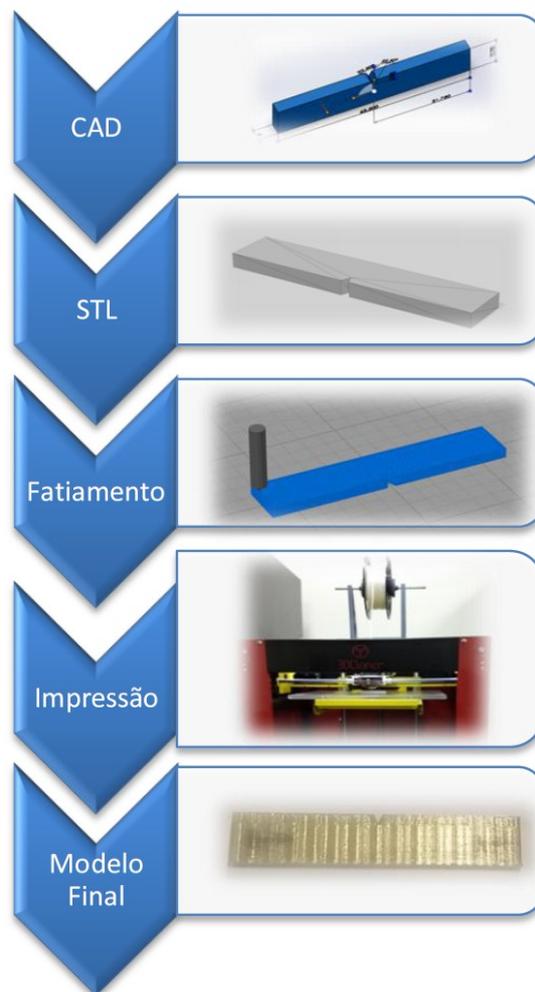
2.2 PROCESSO DE MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA- FDM

O processo FDM será o foco deste trabalho, com isso, será realizada uma descrição das etapas do processo, materiais para fabricação e os parâmetros do processo.

2.2.2 Etapas da manufatura

No processo FDM existem algumas etapas até a obtenção da forma física do modelo. A Figura 12 divide o processo nas seguintes etapas: construção do modelo 3D CAD, transformar o arquivo em STL para o processamento no software, fatiar o modelo no software para enviar ao equipamento, imprimir o do modelo com o material escolhido e obter a forma física final.

Figura 12: Etapas do Processo FDM ou FFF.



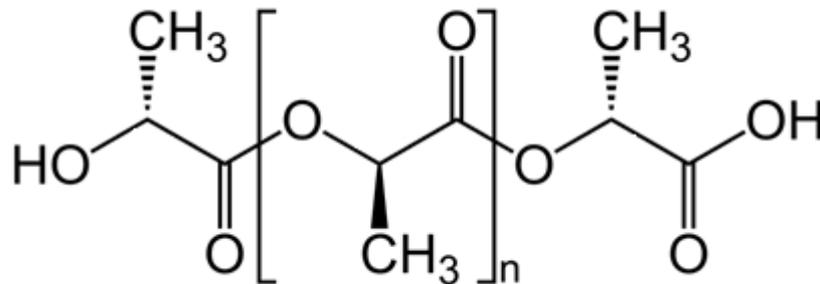
Fonte: Autor (2019).

2.2.3 PLA

Segundo Molina et al. (2018), o poliácido láctico (PLA), é um polímero biodegradável e produzido a partir de recursos renováveis como: amido do milho, beterraba, trigo e cana-de-açúcar.

Este polímero tem uma densidade de 1,24 g/cm³ e sua estrutura molecular é demonstrada na Figura 13.

Figura 13: Estrutura molecular do PLA



Fonte: Adaptado de Molina et al. (2018).

Esses materiais podem ser processados na sua forma natural ou com adição de pigmento, resultando em filamentos coloridos.

Segundo Rabello (2007), o termo pigmento é utilizado para descrever os aditivos que compõem as cores nos polímeros.

No presente trabalho será utilizado filamentos de PLA do mesmo lote, porém, na cor natural, branco e preto (ambos com pigmentos).

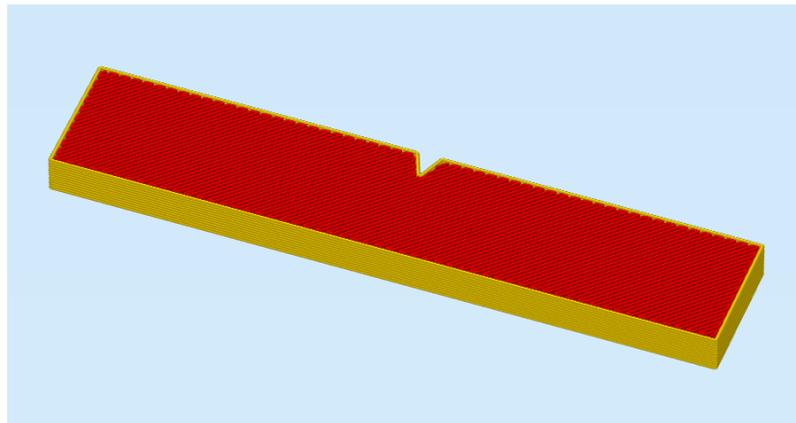
2.2.4 Parâmetros de fabricação

Para realizar o pós-processamento de um modelo, existe a possibilidade de variar alguns parâmetros no processo. Neste tópico serão apresentados os parâmetros utilizados neste trabalho e na sequência discutido suas influências nas propriedades mecânicas, segundo a literatura pesquisada.

2.2.4.1 Perímetro

Identifica a quantidade de contornos ao redor da peça ou o número de deposição no formato do modelo, como é indicado na Figura 14, sendo as linhas em amarelo.

Figura 14: Linhas de perímetro.



Fonte: Autor (2019).

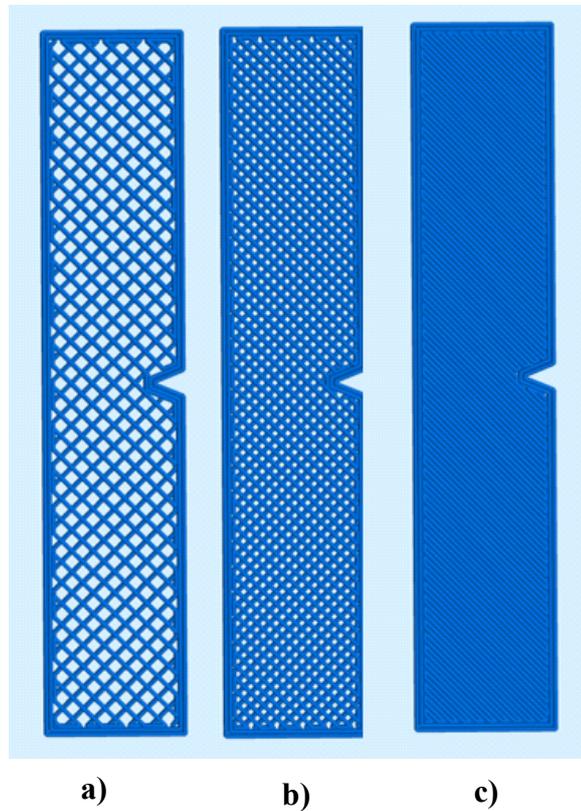
Segundo a literatura, Tymrak, Kreiger e Pearce (2014), foi observado durante os resultados que os perímetros causam influências na resistência a tração, devido a orientação ser a mesma do eixo dos ensaios realizados.

2.2.4.2 Preenchimento interno

A porcentagem do preenchimento de um modelo tridimensional, é a quantidade de material impresso que a peça terá no interior, podendo variar de 0% até 100%. Quando é definido 0%, a peça terá apenas o perímetro e para cada porcentagem o software define o

padrão de impressão. A Figura 15 demonstra três opções de preenchimentos: 30%, 50% e 100%.

Figura 15: Linhas de preenchimento a) 30%, b) 50% e c) 100%.



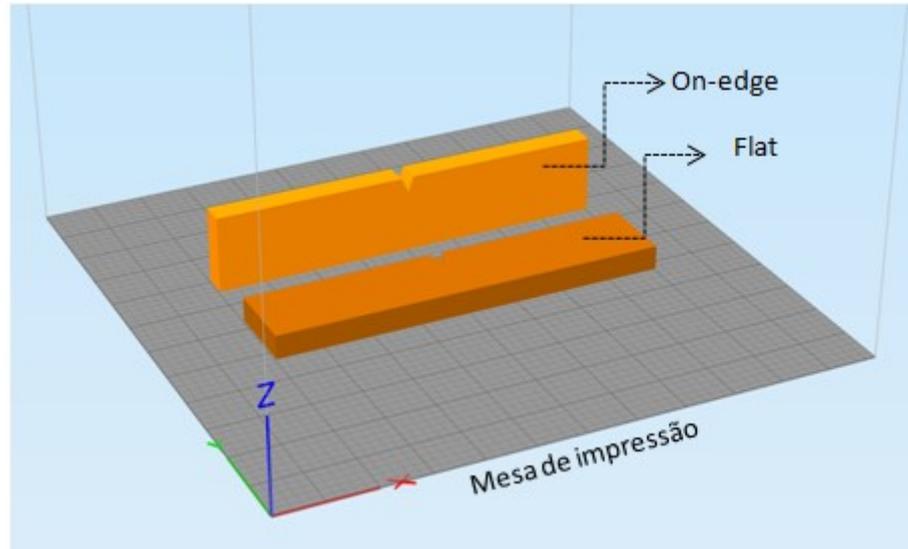
Fonte: Autor (2019).

Segundo Gomez-Gras et al. (2018), no estudo de fadiga, os melhores resultados foram para as maiores porcentagens. Nesse estudo variou-se o preenchimento interno em 25%, 50% e 70%, para o PLA.

2.2.4.3 Posição

Indica a disposição da peça na mesa de construção em relação aos eixos X, Y e Z. A posição Flat é quando a maior área da peça está no plano XY. Já a posição on-edge tem a maior área no plano ZX e seu comprimento na direção do eixo X, como mostra a Figura 16.

Figura 16: Posição de impressão



Fonte: Autor (2019).

Na literatura, são apresentados alguns estudos com intuito de descobrir qual a melhor orientação para se imprimir uma peça, como é o caso do artigo publicado por Caminero et al. (2018), que identificou a maior resistência ao impacto nas peças construídas na orientação flat. Isso, para as peças em nylon sem reforço. No entanto, quando é colocado reforço a posição on-edge apresenta melhores resultados.

Em outro estudo de Caminero et al. (2019), verificou-se variações na resistência ao impacto para diferentes posições do PLA, sendo a posição Flat com maior resistência.

Segundo Chacón et al. (2017), no estudo de resistência a tração para o PLA, foi possível observar a influência na resistência quando combinou alguns parâmetros como: altura de camada, posição e taxa de alimentação.

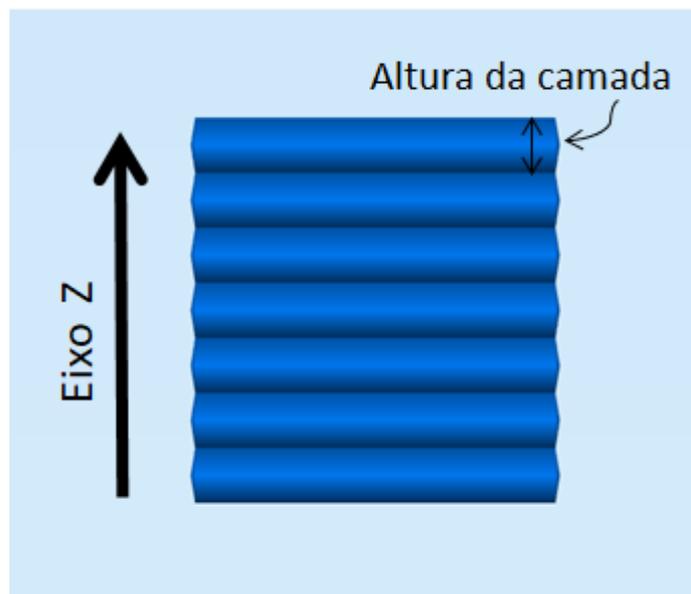
Segundo Laureto e Pearce (2018), existe diferença na resistência a tração para a posição de impressão em Flat e vertical no PLA, sendo que a posição Flat indica os melhores resultados.

No estudo de Keles, Blevins e Bowman (2017), a variação da posição resultou em resistências diferentes para o ensaio de tração no ABS, sendo a posição on-edge com melhores resultados.

2.2.4.4 Altura da Camada

É uma medida da altura de cada camada em relação ao eixo Z, como mostra a Figura 17. Essas medidas dependem do fabricante de cada equipamento. Segundo 3D Cloner (2019), a máxima é 0,4 mm e a mínima altura é 0,05 mm.

Figura 17: Altura da camada



Fonte: Autor (2019).

Segundo Kuznetsov et al. (2018), no estudo de resistência a flexão, variou-se a altura de camada de 0,06 mm até 0,4 mm para um bico com 0,4 mm de diâmetro e os testes apresentaram melhores resultados na resistência a flexão quando ocorria o aumento da altura da camada.

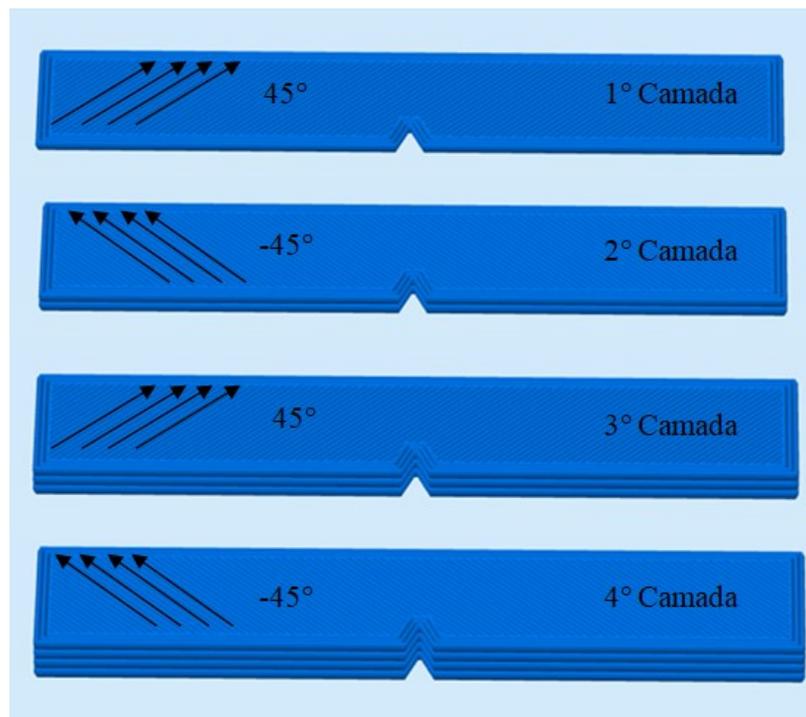
Segundo Gomez-Gras et al. (2018), no estudo de fadiga, variou a altura de camada em 0,1mm, 0,2mm e 0,3mm para o PLA, sendo os melhores resultados para alturas de camadas mais altas.

Caminero et al. (2018), verificou no seu estudo que a resistência ao impacto dependia da combinação da altura da camada com a posição de impressão. Nos ensaios mecânicos, encontrou maiores resultados quando a altura de camada era de 0,2 mm na posição flat. Já na posição on-edge encontrou para 0,1 mm de altura de camada.

2.2.4.5 Orientação do preenchimento

A orientação do preenchimento é o ângulo em que as linhas serão feitas para formar uma camada. A Figura 18 mostra a combinação dos ângulos de $45^\circ/-45^\circ$ para uma peça que possui quatro camadas.

Figura 18: Linhas de orientação do preenchimento.



Fonte: Autor (2019).

Segundo Carneiro, Silva e Gomes (2015), os diferentes tipos de orientação causam influências na resistência a tração para o PP, no processo FDM. Nesse estudo, foi usado as orientação em $\pm 45^\circ$, 0° , 90° , 45° e $0^\circ/90^\circ$ com um preenchimento de 100% e altura de camada de 0,25 mm. Por fim, obteve-se a melhor performance na orientação de 0° e a menor em $\pm 45^\circ$.

Já Tymrak, Kreiger e Pearce (2014), obtiveram melhores resultados na posição $\pm 45^\circ$, para o ABS e PLA. Porém com o ângulo de $0^\circ/90^\circ$ teve o melhor resultado em módulo de elasticidade nos ensaios mecânicos de tração.

2.2.4.6 Temperatura

É a temperatura para a deposição do material durante o processo. Essa temperatura vai depender do material e outros parâmetros que influenciam o processo de adição.

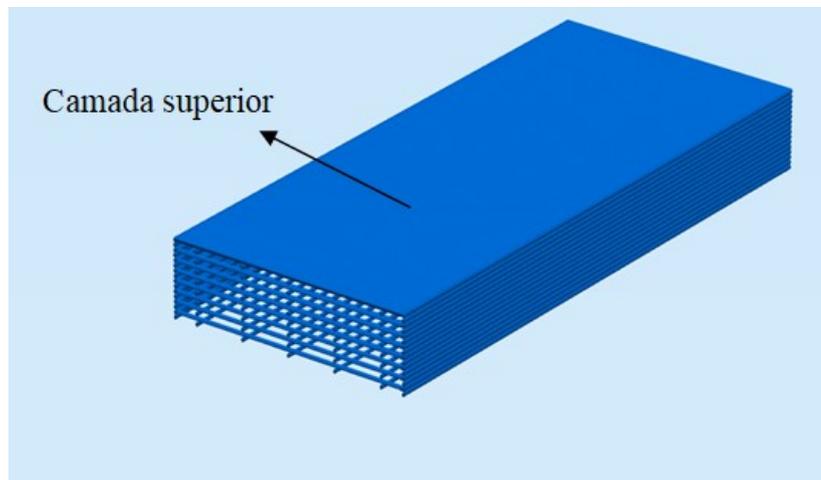
Segundo Realmaker 3d (2019), a faixa de temperatura para o filamento está entre 180 e 220 graus. Porém, cada impressora terá uma faixa de temperatura que é possível depositar o material.

Segundo Casagrande (2018), a variação da temperatura utilizando o PLA influencia a resistência a tração. Maloch et al. (2018) chegou nas mesmas considerações, porém, para o ABS.

2.2.4.7 Camadas superiores

É a quantidade de camadas superiores sólidas do modelo, como mostra a Figura 19.

Figura 19: Camada superior



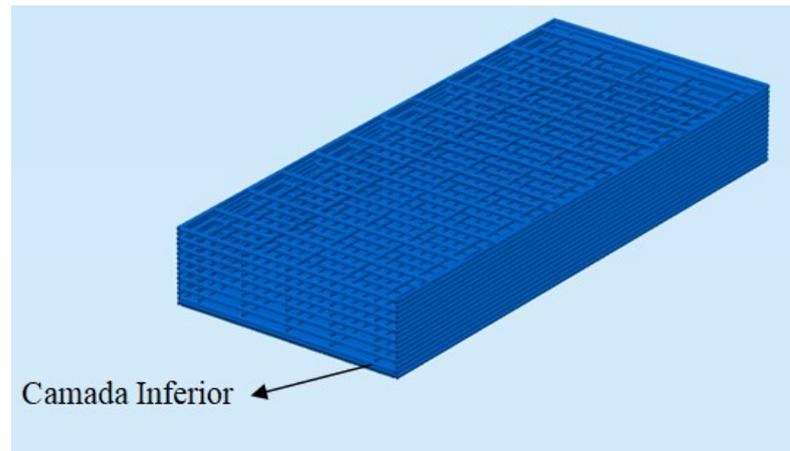
Fonte: Autor (2019).

No artigo publicado por Moradi, Meiabadi e Kaplan (2019), os parâmetros de camadas superiores, camadas inferiores são identificados e definidos. Porém, são utilizados como parâmetros fixos.

2.2.4.8 Camadas inferiores

É a quantidade de camadas inferiores sólidas do modelo, como mostra a Figura 20.

Figura 20: Camada inferior

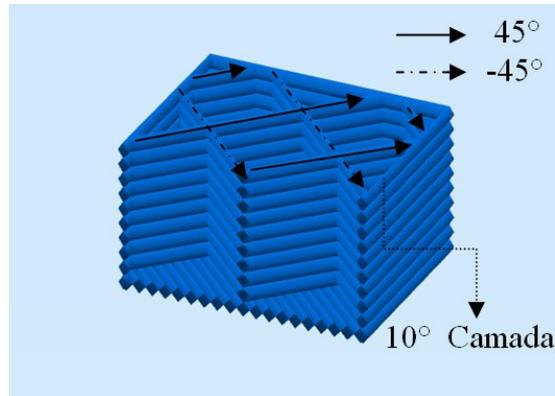


Fonte: Autor (2019).

2.2.4.9 Padrão do preenchimento interno

Esse parâmetro está relacionado com o tipo de movimentação realizada no preenchimento interno do modelo. Algumas das opções utilizadas são o modo grade e o retilíneo. No modo grade, a extrusora fará o movimento de preenchimento dos ângulos determinados no mesmo plano, como mostra a Figura 21.

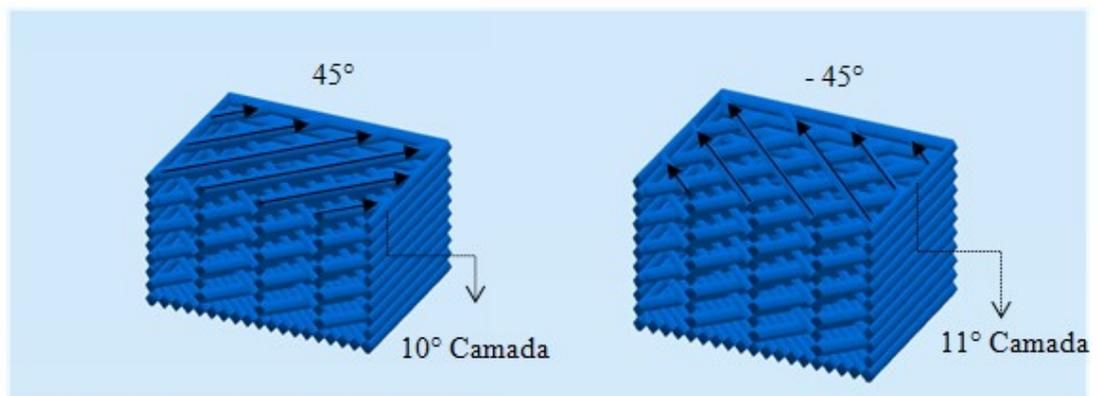
Figura 21: Preenchimento interno tipo grade



Fonte: Autor (2019).

No modo retilíneo, a extrusora faz a movimentação de preenchimento alternando os ângulos escolhidos em cada camada. Nesta opção, a extrusora realiza a movimentação de um determinado ângulo para uma camada e alterna para outro na camada subsequente, como mostra a Figura 22.

Figura 22: Preenchimento interno tipo retilíneo



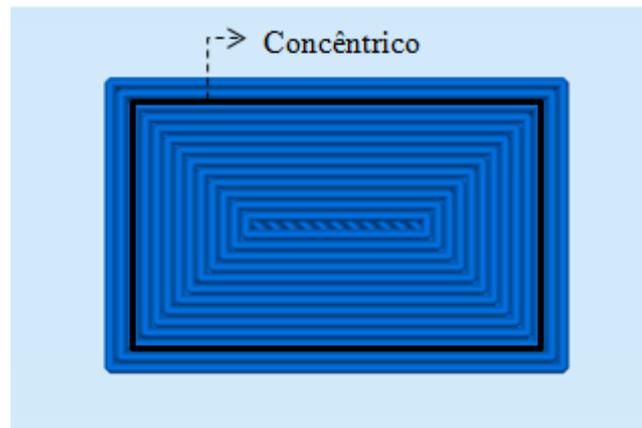
Fonte: Autor (2019).

Segundo Gomez-gras et al. (2018), verificou-se a diferença entre os resultados no ensaio de fadiga, quando variou o preenchimento interno em retilíneo e honeycomb, para o PLA.

2.2.4.10 Padrão do preenchimento externo

Esse parâmetro está relacionado com o tipo de movimentação realizada nas camadas superiores e inferiores. Existem duas opções para esse padrão, o concêntrico e o retilíneo. O modo concêntrico faz linhas que acompanham o formato da peça até o preenchimento completo da camada, Figura 23. Já o modo retilíneo é composto por linhas paralelas que preenchem o formato da camada do modelo. A Figura 24, mostra esse padrão utilizado no software.

Figura 23: Preenchimento externo do tipo concêntrico.



Fonte: Autor (2019).

Figura 24: Preenchimento externo do tipo retilíneo.

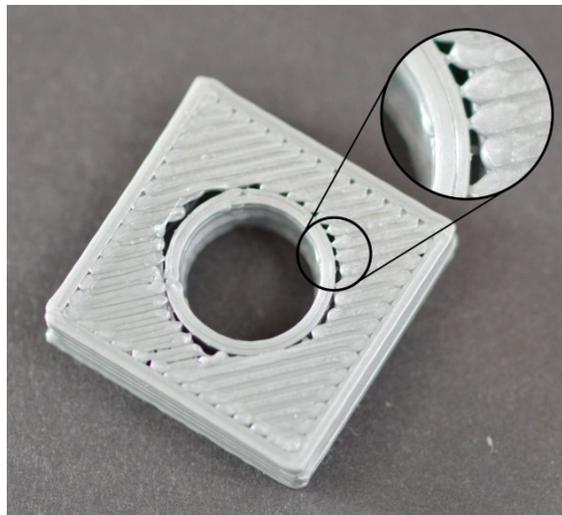


Fonte: Autor (2019).

2.2.4.11 Outline overlap

Segundo o Simplify3d (2019), como o preenchimento usa um padrão diferente de contorno, é importante que as linhas internas estejam unidas com as linhas do perímetro. Sendo assim, a opção outline overlap é uma porcentagem de avanço das camadas de preenchimento em relação a camada do perímetro. Quanto menor a porcentagem desse parâmetro menor será a união entre o perímetro e as linhas de preenchimento do modelo, Figura 25.

Figura 25: Efeito do Outline overlap



Fonte : Simplify3d (2019).

No estudo de Keles, Blevins e Bowman (2017), foi observado através de micrografia eletrônica de varredura que o ponto de deposição ao redor do furo do corpo de prova tinha uma ligação ruim com as linhas de preenchimento.

Hossain et al. (2014), também verificou em seu estudo que existia lacunas entre o perímetro e as linhas de preenchimento, causando interferência nos resultados.

Por fim, devido ao grande número de parâmetros descrito anteriormente, é visivelmente importante a necessidade de um estudo que busque avaliar a influência desses parâmetros na resistência mecânica ao impacto. Pois dependendo do projeto a resistência é um requisito fundamental.

3 METODOLOGIA

No presente estudo avaliou-se a resistência ao impacto de corpos de prova manufaturados pelo processo de FDM com três tipos diferentes de PLA.

Para a confecção dos corpos de prova (CP) utilizou-se um equipamento de FDM, presente no Laboratório de Inovação e Desenvolvimento de Produtos(LiD), localizado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Joinville. O modelo do equipamento utilizado foi o DH, 3D Cloner. O mesmo, possui um bico extrusor de 0,4 mm e uma extrusora do tipo direct (Figura 26). Como matéria prima foi utilizado um mesmo lote do material para a obtenção do PLA no estado natural, com pigmento na forma preto e branco, fornecido pelo fabricante RealMaker.

Figura 26: Impressora 3DCloner DH



Fonte: 3D Cloner (2019).

No decorrer do processo de manufatura dos corpos de prova desse trabalho, alguns parâmetros foram considerados constantes para viabilizar a produção dos modelos com os parâmetros propostos, como mostra a Tabela 1.

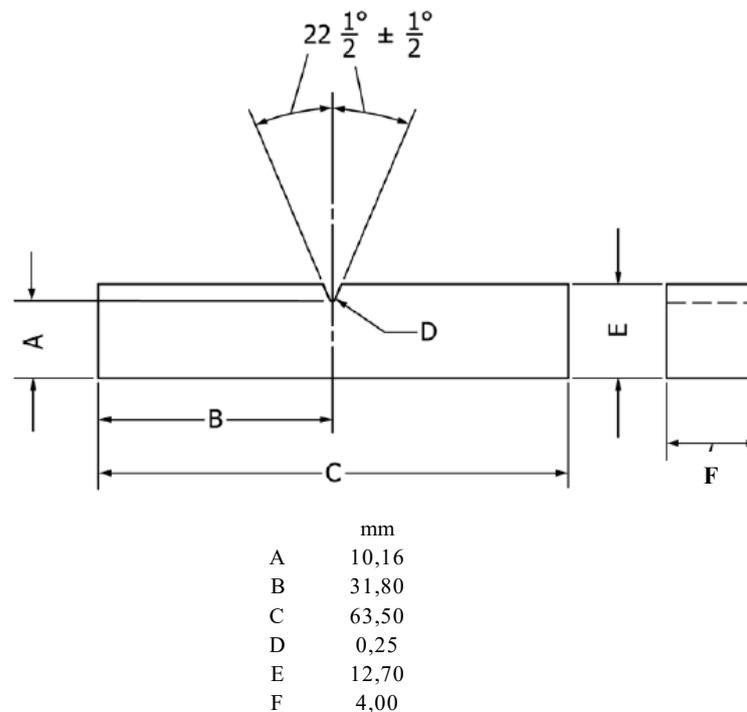
Tabela 1: Parâmetros fixos.

Parâmetros	
Velocidade de impressão	30,00 [mm/s]
Velocidade exterior	30,00 [mm/s]
Velocidade de preenchimento	30,00 [mm/s]
Velocidade de movimentação X/Y	65,00 [mm/s]
Velocidade de movimentação Z	16,70 [mm/s]

Fonte: Autor (2019).

Neste trabalho os CP's para o ensaio de impacto foram fabricados seguindo a norma ASTM D256-10, do tipo Izod e modelo E, que tem sua geometria definida como mostrado na Figura 27.

Figura 27: Dimensões dos corpos de prova segundo a norma ASTM D 256-10.



Fonte: Adaptado ASTM D256-10 (2018).

O equipamento utilizado para o teste de impacto foi o EMIC AIC 1 com um pêndulo de 10,8 Joules, como mostra a Figura 28.

Figura 28: Equipamento para teste de impacto.

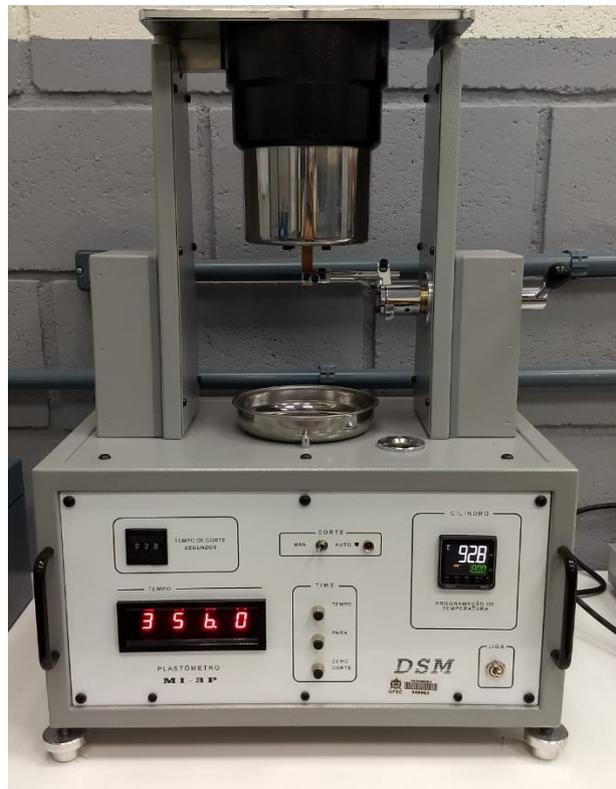


Fonte: Autor (2019).

Visando caracterizar o material utilizado, realizou-se um ensaio para medir o índice de fluidez segundo a norma ASTM D 1238-13 (ASTM, 2014).

A Figura 29 mostra o equipamento utilizado, plastômetro MI-3P. Durante o processo usou-se um peso de 2160g, temperatura de 170 °C para o preto e 180 °C para as demais cores.

Figura 29: Equipamento de Índice de fluidez.



Fonte: Autor (2019).

Este trabalho possui duas etapas, primeiramente, realizou-se um delineamento de ordem experimental (DOE) fracionado de 2^k para 11 fatores, em que cada combinação foi replicada 3 vezes. Utilizou-se uma resolução de IV e 95% de nível de confiança, resultando em 96 CP com filamento na configuração natural.

Após o pré estudo, foi restringido uma menor quantidade de parâmetros devido a quantidade de materiais disponíveis para um estudo completo. Desta forma, realizou-se uma DOE completa de 2^5 para as cores branco, preto e natural. Foram utilizados os 5 fatores mais significativos do DOE fracionado. Cada combinação foi replicada 3 vezes, totalizando em 288 CP ou 96 CP para cada cor. As análises dos experimentos foi realizada com o auxílio software Minitab.

Posteriormente, utilizou-se o microscópio estéreo, modelo olympus SZX10, para captar imagens da ruptura, camada superior e linhas dos perímetros dos CP's. A Figura 30 mostra o equipamento.

Figura 30: Microscópio estéreo.



Fonte: Olympus Corporation (2019).

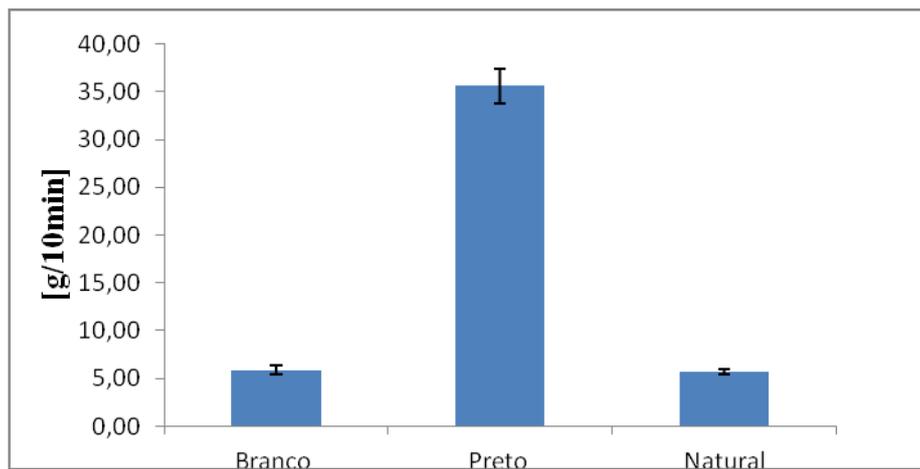
4 Resultados e Discussões

Neste tópico será apresentado os resultados do índice de fluidez, da DOE fracionada e DOE completa realizadas.

4.4.1 Resultados dos índices de fluidez

O Gráfico 2 mostra os resultados dos ensaios em gramas por dez minutos. Sendo possível verificar uma diferença da configuração preto para as demais.

Gráfico 2: Índice de fluidez do PLA.



Fonte: Autor (2019).

4.4.2 Resultado DOE fracionado

A Tabela 2 mostra os parâmetros de entrada para o pré estudo. Cada variável é representada por um símbolo e possui dois níveis. Essas escolhas foram realizadas com base no fabricante do equipamento, no fabricante do PLA, nas citações da literatura e limitações do software Simplify 3D usado para o fatiamento dos CP.

Tabela 2: Variáveis da DOE fracionada.

Variáveis	símbolos	Níveis	
		(-)	(+)
Posição	A	Flat	On-edge
Temperatura [°C]	B	200	215
Altura da camada [mm]	C	0,1	0,3
Perímetro	D	1	3
Orientação do preenchimento [°]	E	+45/-45	0/90
Preenchimento Interno [%]	F	30	100
Camadas Superiores	G	1	2
Camadas Inferiores	H	1	2
Padrão de Preenchimento Interno	J	Retilínea	Grade
Padrão de Preenchimento Externo	K	Retilínea	Concentrico
Outline Overlap [%]	L	30	70

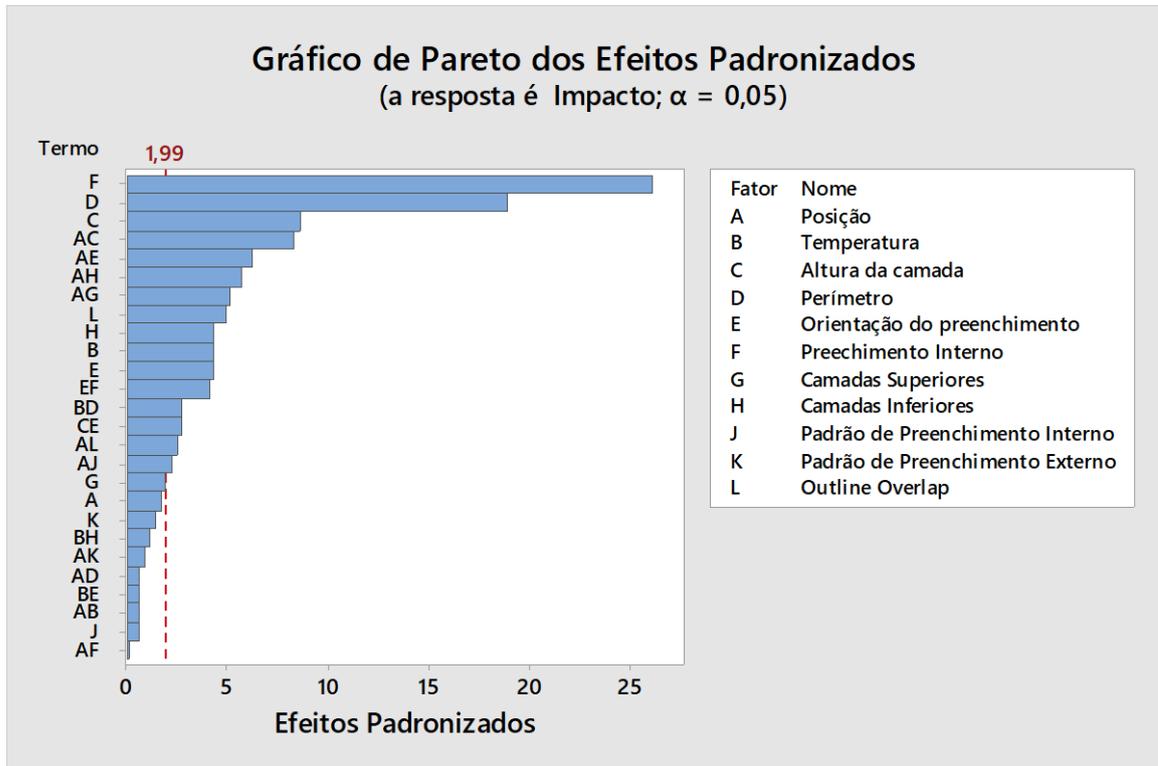
Fonte: Autor (2019).

Para avaliar fatores e interações significativas esse gráfico permite avaliar com nível de confiança de 95%.

O Gráfico 3 mostra o valor absoluto dos efeitos em ordem decrescente e desenha uma linha vertical de referência mostrando qual o valor mínimo de efeito que é estatisticamente significativo, 1,99. Portanto, qualquer efeito menor que a linha vertical pontilhada não é significativo para essa análise. Nesse gráfico pode-se realizar algumas observações importantes como:

- O preenchimento interno, representado por F, possui o maior efeito na resposta de resistência ao impacto.
- Posteriormente vem o perímetro seguido da altura da camada.
- O efeito combinado de AC, AE, AH e AG são significativos.
- O parâmetro (A) posição não se apresentou significativo mas interage com outros parâmetros.

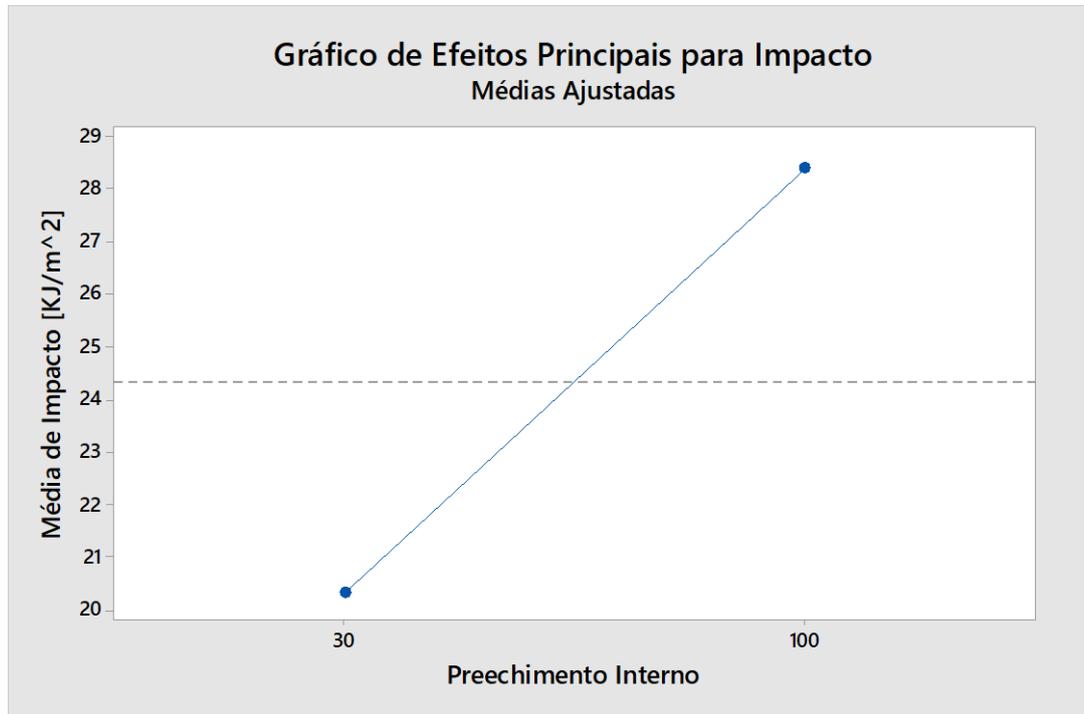
Gráfico 3: Gráfico de Pareto para DOE fracionada - Natural.



Fonte: Autor (2019).

No Gráfico 4, mostra os efeitos principais do preenchimento interno. Os valores representados no eixo vertical, são as médias ajustada dos ensaios de impacto que utilizaram o parâmetro de preenchimento interno. Já o eixo horizontal, indica os níveis avaliados no experimento, 30% e 100% de preenchimento interno. Desta forma, observa-se uma reta inclinada que indica as médias ajustadas de impacto mais alta para o parâmetro de 100% de preenchimento interno.

Gráfico 4: Gráfico de efeitos principais para o preenchimento interno.



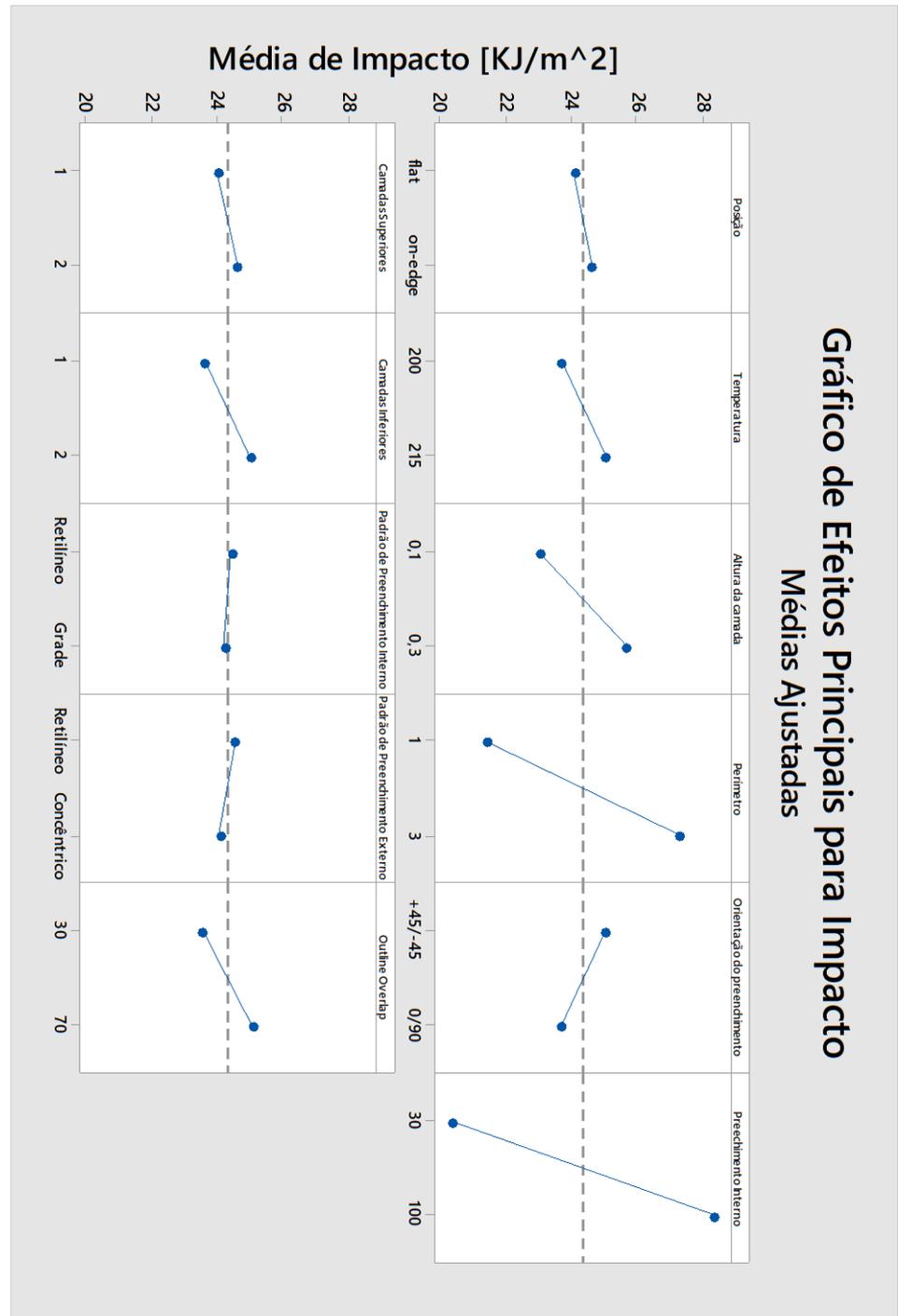
Fonte: Autor (2019).

No Gráfico 5, é apresentado todos os gráficos de efeitos principais dos 11 parâmetros avaliados. O modo de interpretação é igual ao Gráfico 4. Esses gráficos apresentam as médias ajustadas para cada nível de cada variável categórica. Sendo assim, é possível extrair desse gráfico as seguintes informações:

- A linha pontilhada representa a média geral dos ensaios realizados.
- Os gráficos da posição, camadas superiores, padrão de preenchimento interno, e padrão de preenchimento externo tem efeitos bem próximos quando analisados isoladamente.
- O gráfico da temperatura indica um melhor resultado para a temperatura de 215 graus
- O gráfico da altura de camada sugere 0,3 mm com maior resistência.
- O gráfico do perímetro mostra a segunda média mais alta dos parâmetros analisados, para 3 linhas.
- O gráfico da orientação do preenchimento indica os ângulos de +45/-45 graus com melhores resultados.
- O gráfico de camadas inferiores indica 2 camadas com melhores resultados.

- O gráfico do outline overlap apresenta melhores resultados para 70%.
- Os fatores preenchimento interno e o perímetros apresentam a maior inclinação, observa-se que seu valores são os maiores em relação a média. Isso indicando maior influência do parâmetro para a resistência ao impacto.

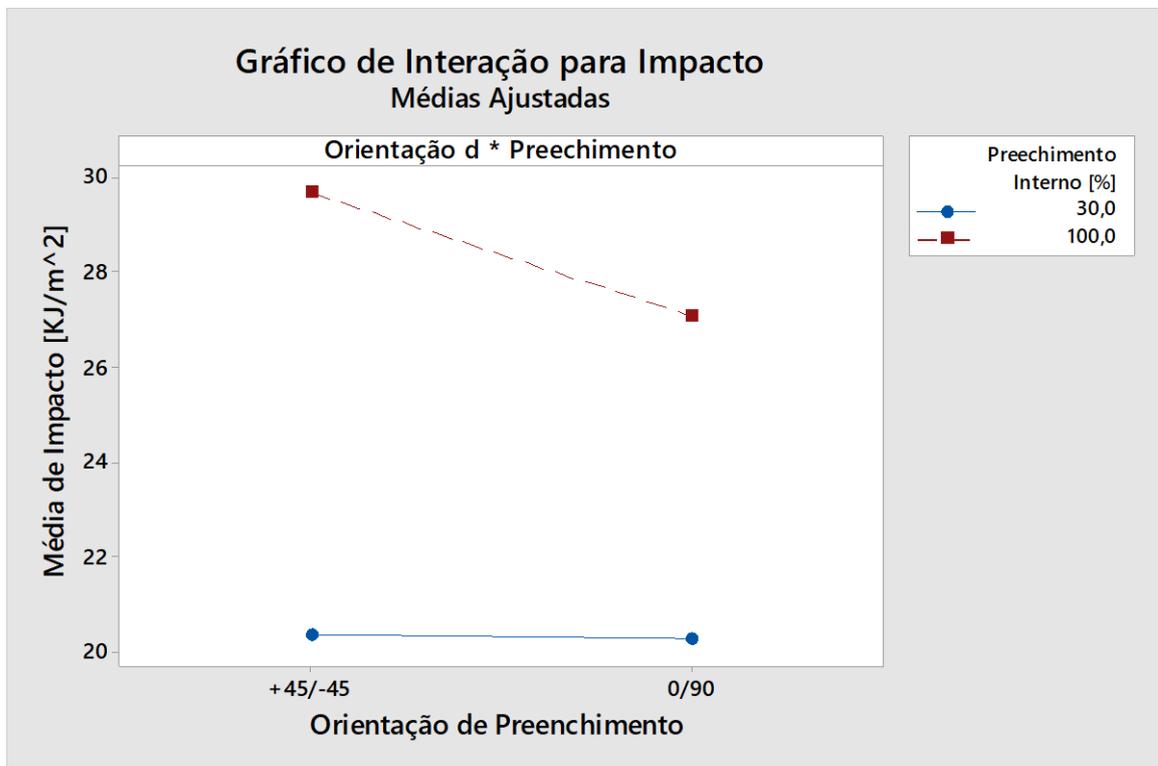
Gráfico 5: Gráficos dos efeitos principais para DOE fracionada.



Fonte: Autor (2019).

O software disponibiliza o gráfico de interação, Gráfico 6, que mostra a média ajustada do valor da orientação do preenchimento versus o preenchimento interno. No eixo horizontal é possível observar os dois níveis de orientação de preenchimento, +45/-45 e 0/90. Já as linhas contínuas representam o preenchimento interno de 30%, enquanto a pontilhada representa os resultados de 100%. O eixo vertical são as médias dos resultados da resistência para a interação dos dois parâmetros. Este gráfico mostra o efeito de interação aparente, devido as linhas não serem paralelas. Isto é um indicativo de que os resultados desses fatores dependem de outro fator.

Gráfico 6: Gráfico de interação para médias ajustadas da orientação do preenchimento x preenchimento interno.



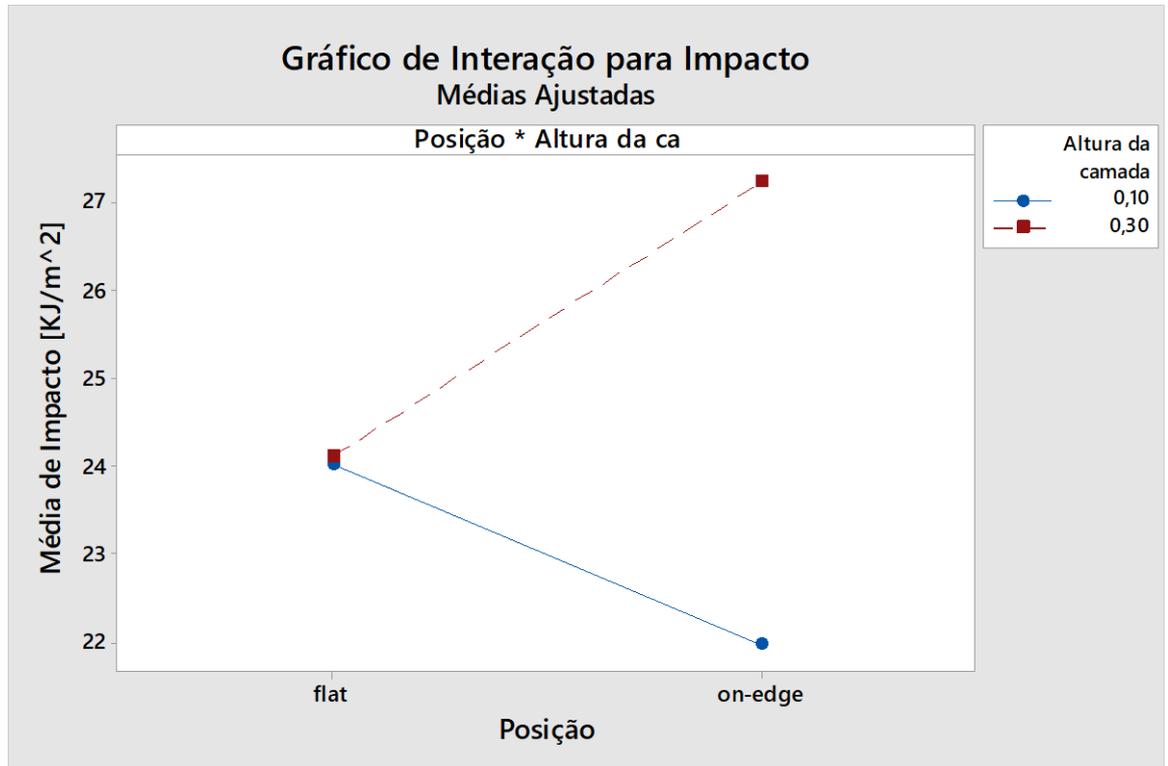
Fonte: Autor (2019).

Nesse mesmo gráfico é possível observar que o preenchimento interno de 30%, linha contínua, tem valores próximos para as duas orientações do preenchimento mas possui resultados inferiores para as médias do preenchimento de 100 %, linha pontilhada. No caso do preenchimento de 100%, a orientação de +45/-45 é um indicativo de maior resistência.

Visando uma melhor compreensão da combinação do parâmetro posição e altura da camada que apresentou um alto efeito no Gráfico 3 de Pareto, representado pela sigla AC, é

possível observar através do gráfico de interação, Gráfico 7, que a média do resultados são maiores para posição on-edge e altura de camada de 0,3mm.

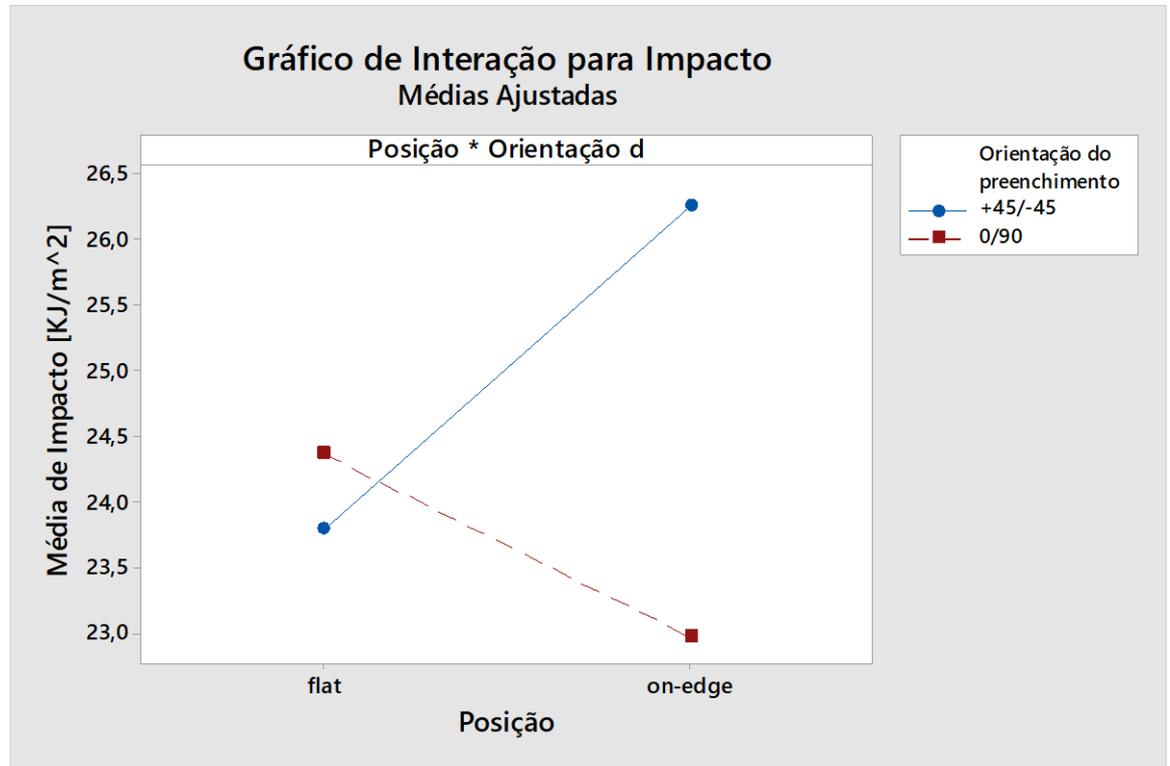
Gráfico 7: Gráfico de interação para médias ajustadas da posição x altura da camada.



Fonte: Autor (2019).

No Gráfico 8, representa a interação entre a posição e orientação do preenchimento, que se mostrou significativo no Gráfico 3 de Pareto, representado pela sigla AE. Sendo possível observar que a posição on-edge abrange a maior e a menor média para os resultados do impacto.

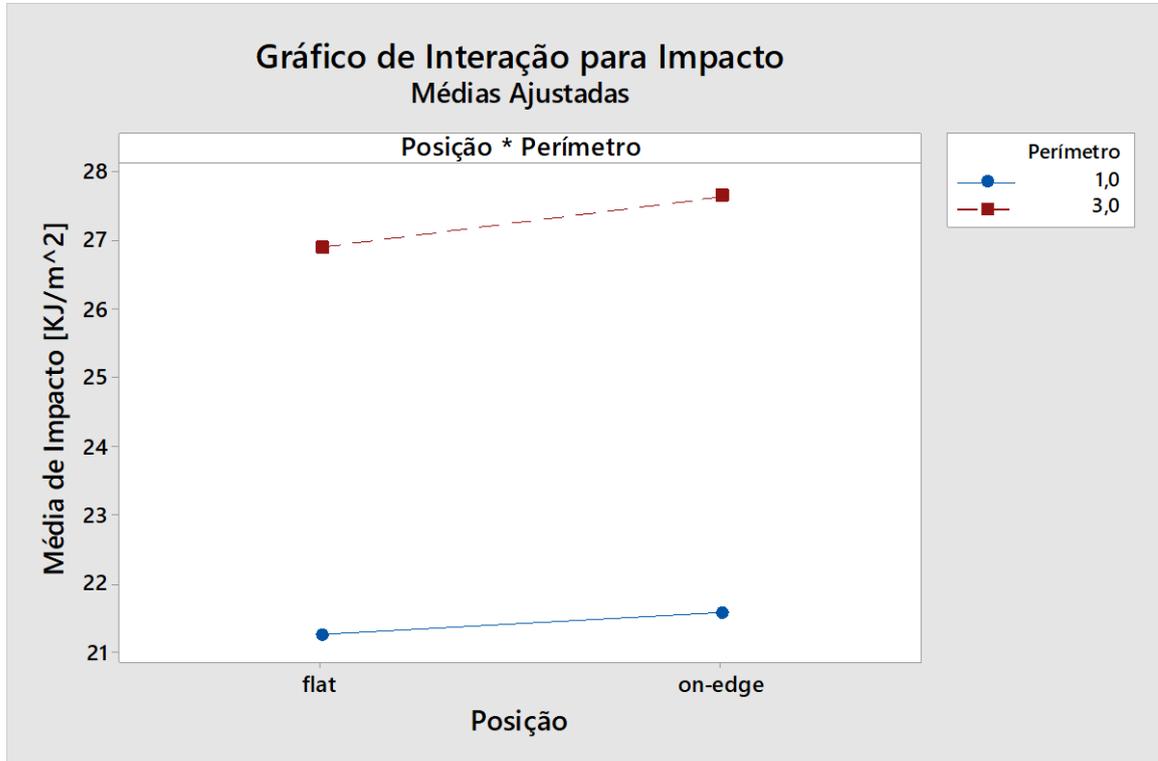
Gráfico 8: Gráfico de interação para médias ajustadas da posição x orientação do preenchimento.



Fonte: Autor (2019).

O mesmo efeito ocorre no Gráfico 9, que representa a interação entre a posição e perímetro. Sendo possível observar que a posição on-edge também abrange os maiores e um dos menores resultados da média do impacto.

Gráfico 9: Gráfico de interação para médias ajustadas da posição x perímetro.



Fonte: Autor (2019).

4.4.3 Resultado DOE Completa

Os parâmetros da Tabela 3 foram utilizado como variáveis de entrada para o DOE completo. Esses parâmetros foram escolhidos em relação ao pré estudo realizado na seção anterior. Portanto, escolheu-se as cinco variáveis com índice de maior influência da DOE fracionada, devido ao fator limitante de matéria prima disponível para realizar um DOE completa com 3 replicações. Nesta etapa do experimento foram utilizados os seguintes filamentos: Branco, Preto e Natural do mesmo lote.

Tabela 3: Variáveis da DOE Completa.

Variáveis	símbolos	Níveis	
		(-)	(+)
Preenchimento Interno [%]	A	30	100
Perímetro	B	1	3
Altura da camada [mm]	C	0,1	0,3
Outline Overlap [%]	D	30	70
Orientação do preenchimento [°]	E	+45/-45	0/90

Fonte: Autor (2019).

Com base nos resultados do pré estudo, observou-se que os seguintes parâmetros são indicativos de maior resistência ao impacto. Sendo assim, fixou-se os seguintes parâmetros no estudo completo, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros fixos na DOE completa.

Parâmetros fixos	
Posição	On-edge
Temperatura [°C]	215
Camadas Superiores	2
Camadas Inferiores	2
Padrão de Preenchimento Interno	Retilínea
Padrão de Preenchimento Externo	Retilínea

Fonte: Autor (2019).

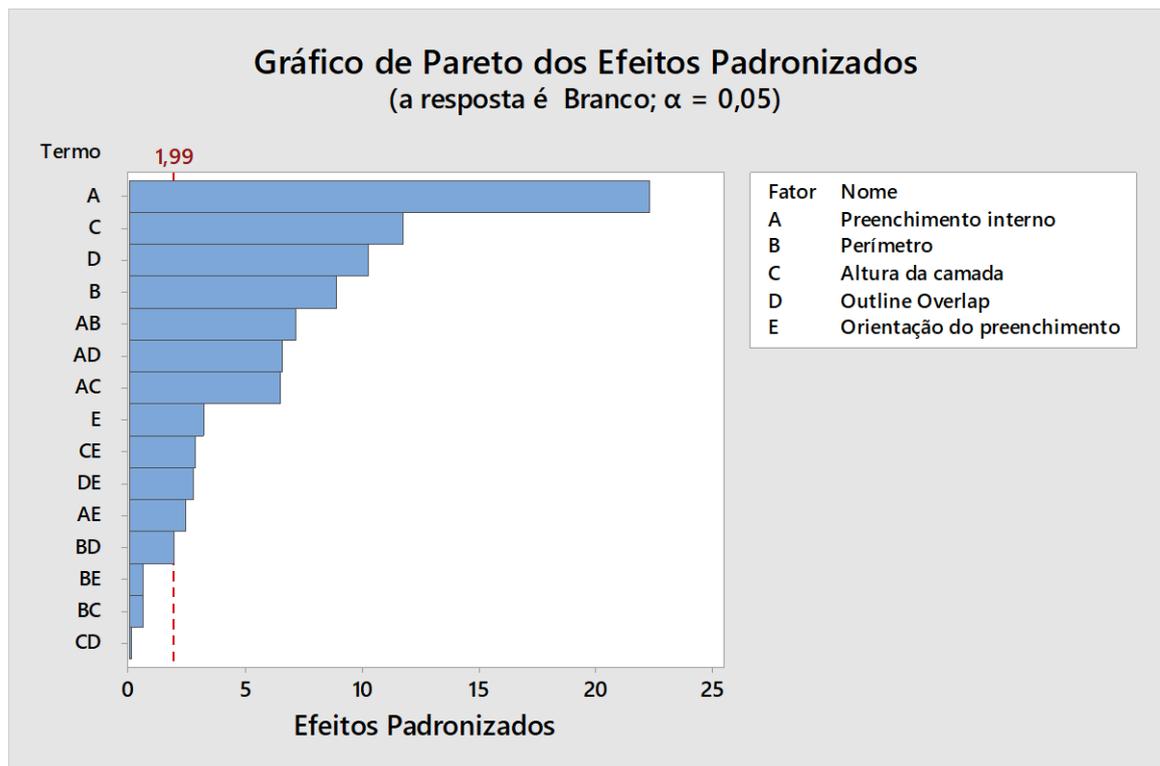
4.4.3.1 Resultado do DOE Completa Branco

Na análise do nível de significância para o experimento com o PLA branco, utilizou-se o gráfico de Pareto, Gráfico 10. Todos os gráficos de Pareto neste trabalho utilizaram um nível de confiança de 95%. Sendo assim, obteve-se as seguintes informações no gráfico:

- O preenchimento interno teve maior efeito em relação aos outros fatores
- Posteriormente vem o efeito da altura da camada seguido do outline overlap.

- A orientação do preenchimento teve o menor efeito isolado.
- O efeito combinado de AB, AD e AC é significativo para o experimento com o PLA branco.

Gráfico 10: Gráfico de Pareto para DOE Completa Branco.



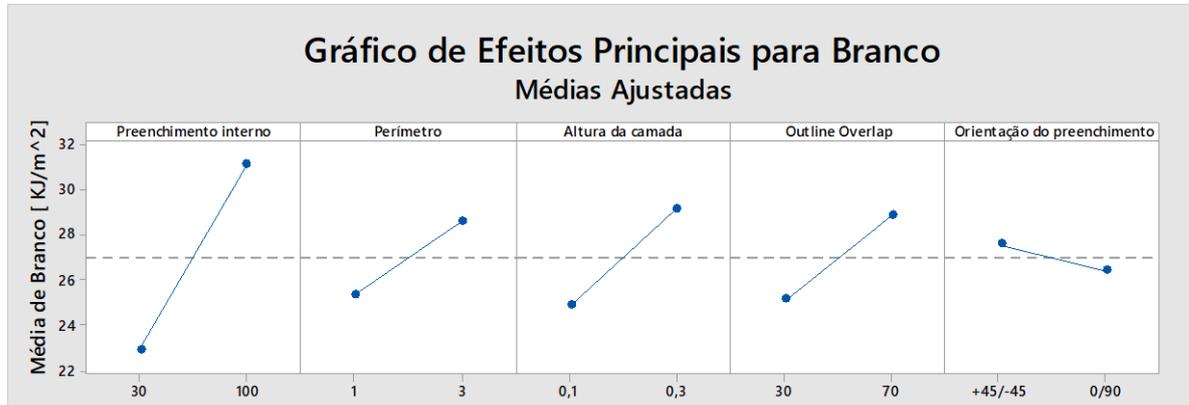
Fonte: Autor (2019).

O Gráfico 11, é apresentado todos os gráficos de efeitos principais dos 5 parâmetros avaliados para o PLA branco. O erro de incerteza foi de $\pm 1,79$ KJ/m² em relação a média e o modo de interpretação é igual ao Gráfico 5. Portanto, observou-se as seguintes informações no gráfico a seguir:

- O gráfico do preenchimento interno apresentou uma média mais alta para o parâmetro de 100%.
- O erro de incerteza é maior que o resultado no gráfico do perímetro.
- No gráfico da altura de camada, 0,3 mm é indício de maior resistência ao impacto.
- O gráfico do Outline Overlap indica uma maior média para 70 %.

- O gráfico de Orientação de preenchimento tem os valores menor que o erro de incerteza. Com isso, é possível afirmar nada sobre o resultado.

Gráfico 11: Gráficos dos efeitos principais do Branco.

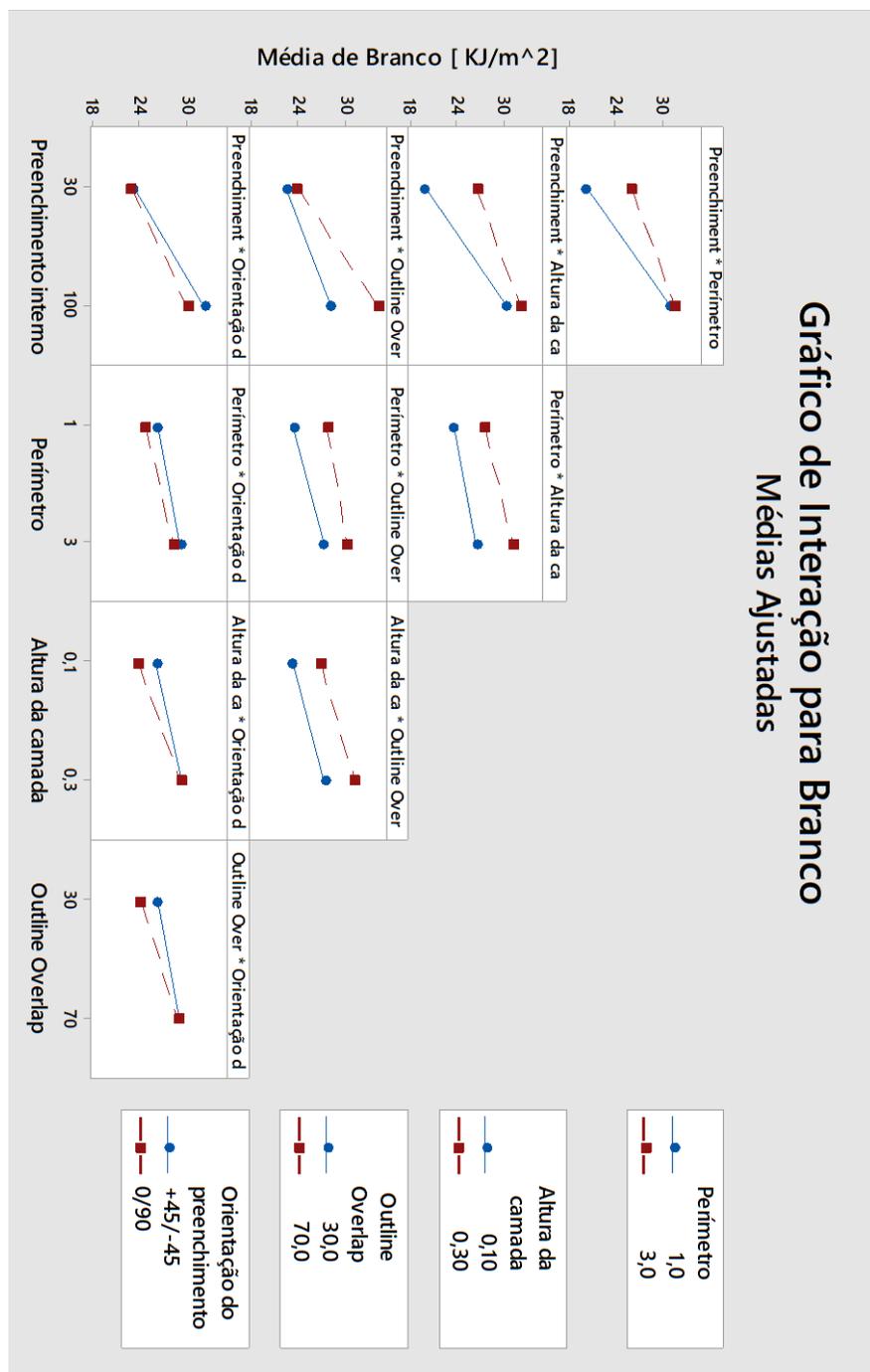


Fonte: Autor (2019).

Para melhor compreender os resultados dos gráficos dos efeitos principais o software disponibiliza o gráfico de interação, Gráfico 12, que mostra os gráficos das médias ajustadas da interação entre os parâmetros analisados. Desta forma pode-se obter os seguintes resultados:

- Nos gráficos da primeira coluna o preenchimento de 100% tem maior resistência quando combinado com os demais parâmetros.
- Nos gráficos da primeira linha, linha inferior, observa-se que os resultados das orientações de preenchimento, +45/-45 e 0/90, são próximas quando combinada com outros parâmetros.
- Nos gráficos da segunda coluna, da esquerda para a direita, observa-se que 3 perímetros apresentou melhores resultados ao impacto para o PLA branco.
- Nos gráficos da terceira coluna, da esquerda para a direita, observa-se maiores resultados 0,3 mm de altura de camada.
- No gráfico da última coluna, 70% de outline overlap mostrou um bom resultado. Porém, tem praticamente o mesmo valor para as duas orientações de preenchimento.

Gráfico 12: Gráfico de interação para médias ajustadas do Branco.



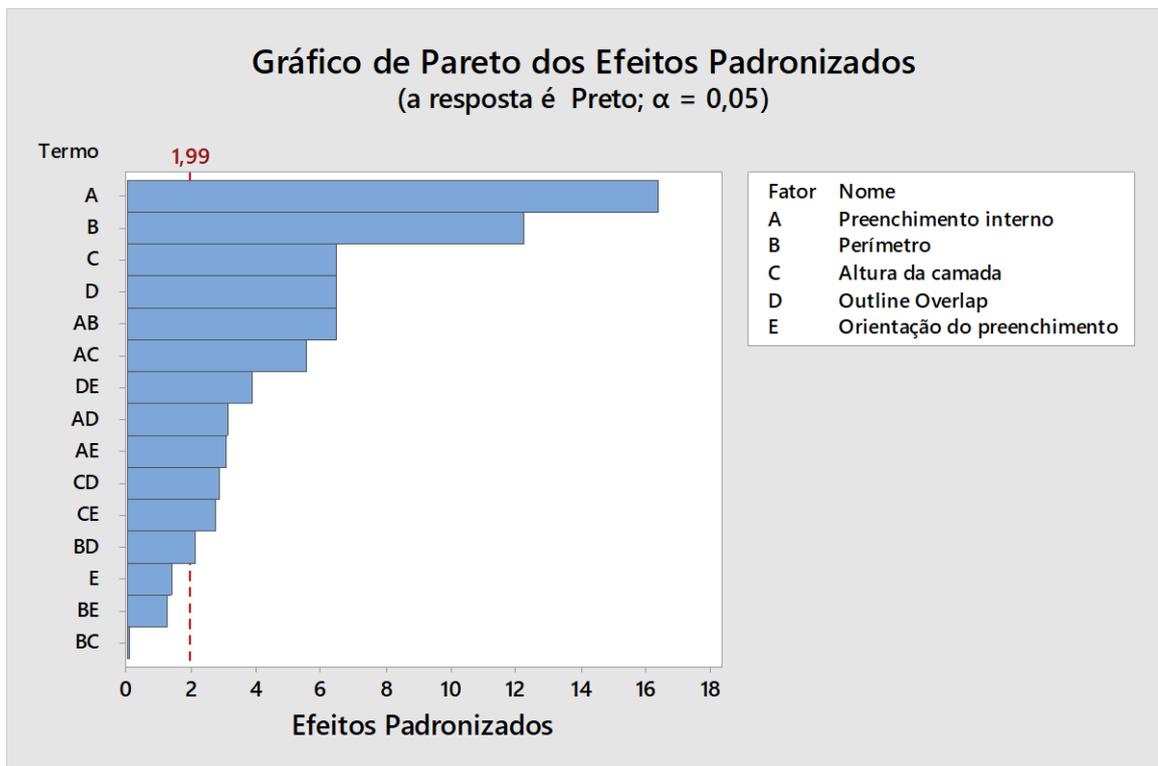
Fonte: Autor (2019).

4.4.3.2 Resultado DOE Completa Preto

Posteriormente para análise dos efeitos significativos o experimento com o PLA Preto, utilizou-se o gráfico de Pareto, Gráfico 13. Dessa forma, obteve-se as seguintes informações:

- O preenchimento interno teve maior efeito em relação aos outros fatores
- Posteriormente vem o perímetro seguido da altura da camada.
- A orientação do preenchimento teve efeito significativo isolado. Porém, quando combinado com Outline Overlap (DE), com o preenchimento interno (AE) e com a altura da camada (CE), mostrou-se significativo.
- A combinação do dois parâmetros mais influentes na resposta também apresentam uma influência alta, AB.

Gráfico 13: Gráfico de Pareto para DOE Completa Preto.

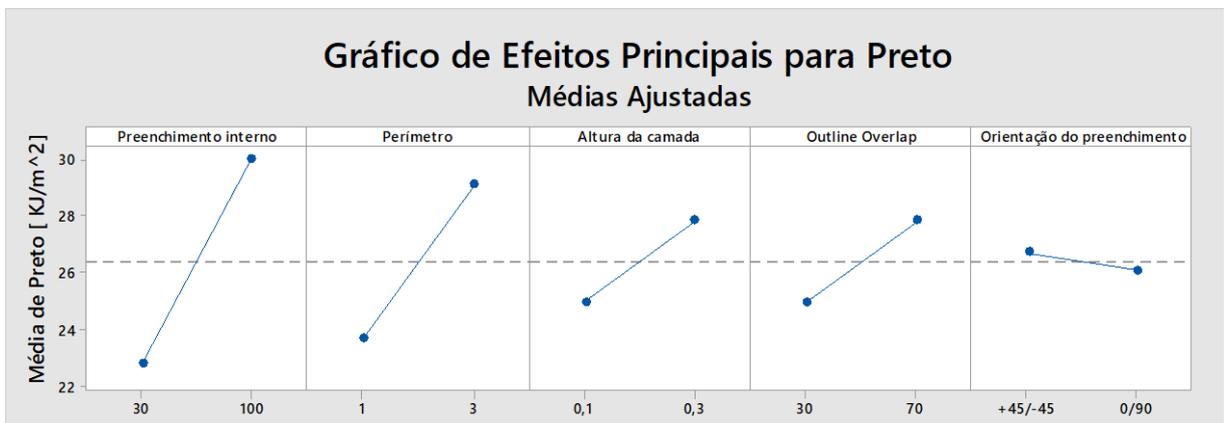


Fonte: Autor (2019).

No Gráfico 14 é apresentado todos os gráficos de efeitos principais dos 5 parâmetros avaliados para o PLA Preto. O erro de incerteza foi de $\pm 2,17 \text{ KJ/m}^2$ em relação a média dos resultados. Desta maneira, constatou-se as seguintes informações:

- O gráfico do preenchimento interno apresentou uma média mais alta para o parâmetro de 100%.
- O gráfico do perímetro indica um maior resultado para 3 linhas.
- O erro de incerteza é maior que o resultado no gráfico da altura de camada.
- O erro de incerteza é maior que o resultado no gráfico do Outline Overlap
- O gráfico de Orientação de preenchimento tem valores próximos e o erro de incerteza é maior que os resultados.

Gráfico 14: Gráficos dos efeitos principais do Preto.



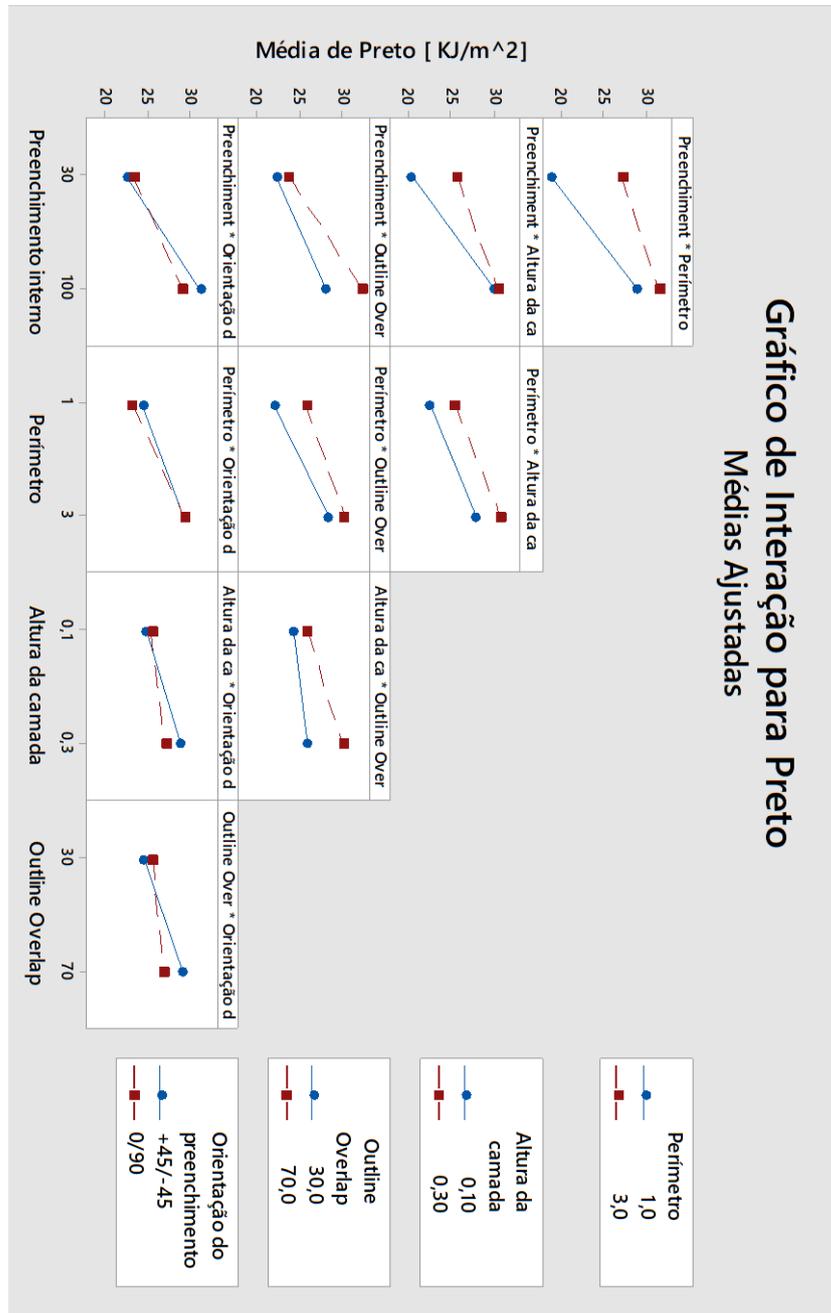
Fonte: Autor (2019).

Visando compreender melhor os resultados dos gráficos dos efeitos principais do PLA preto, utilizaremos o gráfico de interação, Gráfico 15, que mostra os gráficos das médias ajustadas da interação entre os parâmetros analisados. Desse modo, pode-se obter os seguintes resultados:

- Nos gráficos da primeira coluna o preenchimento de 100% tem maior resistência quando combinado com os demais parâmetros.

- Nos gráficos da primeira linha, linha inferior, observa-se que os resultados das orientações de preenchimento são próximas quando combinada com outros parâmetros.
- Nos gráficos da segunda coluna, da esquerda para a direita, observa-se que 3 perímetros mostrou melhores resultados ao impacto para o PLA preto.
- No gráfico da terceira coluna e linha inferior, da esquerda para a direita, observa-se valores próximos para as duas orientações de preenchimento juntamente com as duas alturas de camadas analisadas.

Gráfico 15: Gráficos de interações para as médias ajustadas do Preto



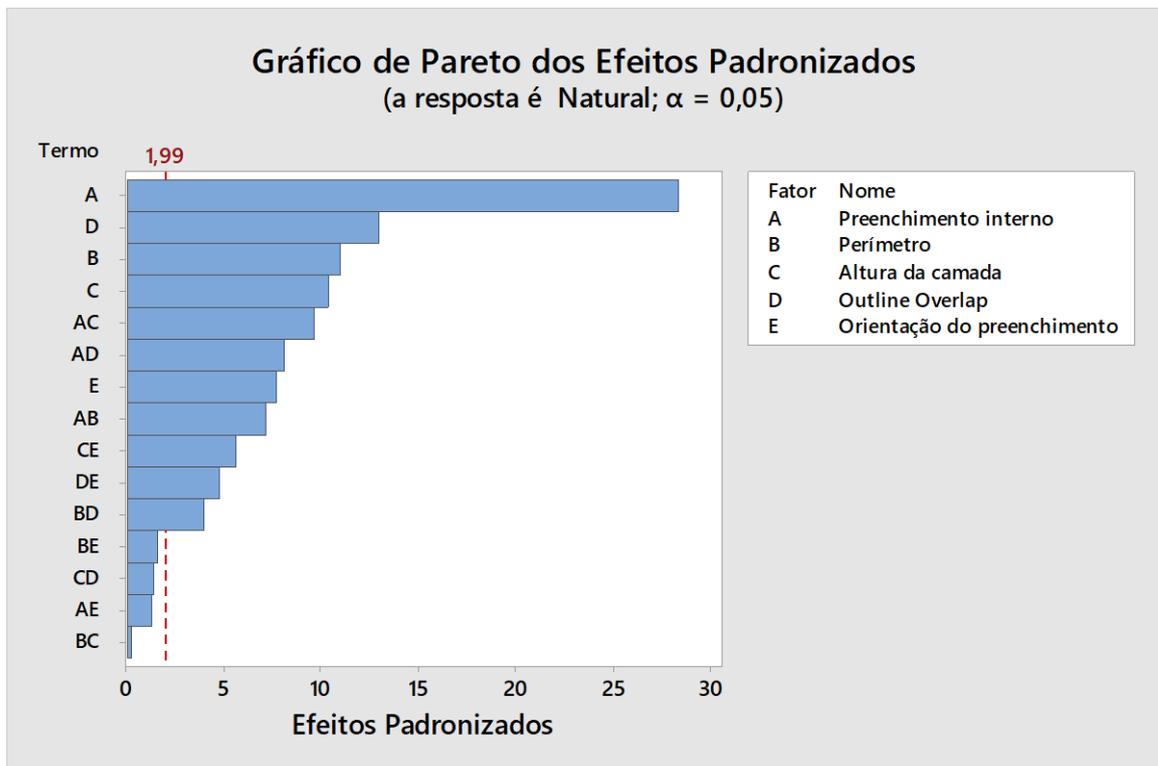
Fonte: Autor (2019).

4.4.3.3 Resultado DOE Completa Natural

Por fim, para análise dos efeitos significativos o experimento com o PLA Natural, utilizou-se o gráfico de Pareto, Gráfico 16. Dessa maneira, obteve-se os seguintes dados:

- O preenchimento interno teve maior efeito em relação aos outros fatores
- Os parâmetros Outline Overlap, perímetro e altura da camada tiveram efeito significativo entre 10 e 15.
- A combinação de preenchimento interno com altura de camada (AC) teve um efeito significativo de ~ 10 .

Gráfico 16: Gráfico de Pareto para o DOE Completo Natural.

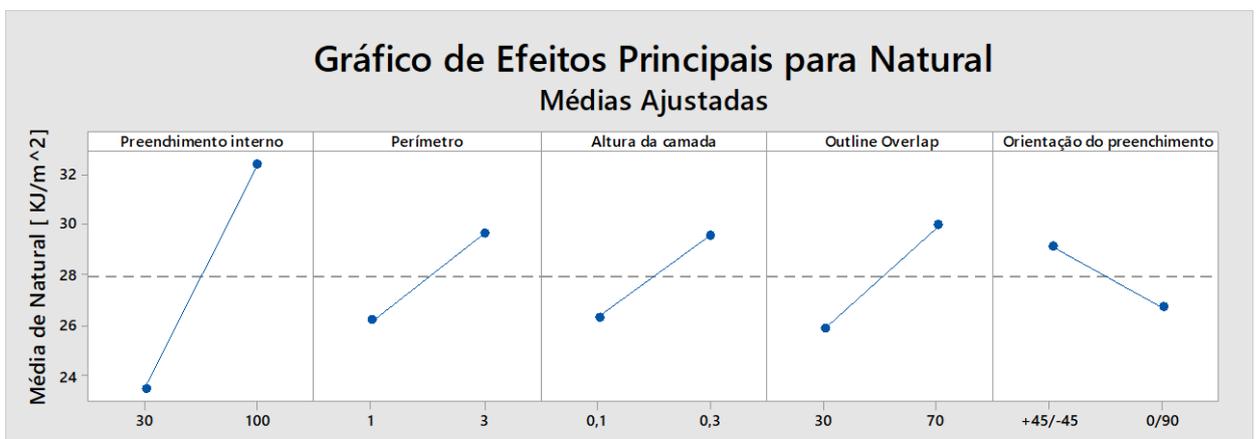


Fonte: Autor (2019).

No Gráfico 17, é mostrado todos os gráficos de efeitos principais dos 5 parâmetros avaliados para o PLA Natural. O erro de incerteza foi de $\pm 1,53 \text{ KJ/m}^2$ em relação a média dos resultados. Com isso, chegou-se aos seguintes resultados:

- O gráfico do preenchimento interno apresentou uma média mais alta para o parâmetro de 100%.
- O gráfico do perímetro indica um maior resultado para 3 linhas.
- No gráfico da altura de camada apresenta 0,3 mm como um indício de maior resistência ao impacto.
- O gráfico do Outline Overlap indica uma maior média para 70 %.
- O gráfico de Orientação de preenchimento apresenta o erro de incerteza maior que o resultado para as duas posições.

Gráfico 17: Gráficos dos efeitos principais do Natural.



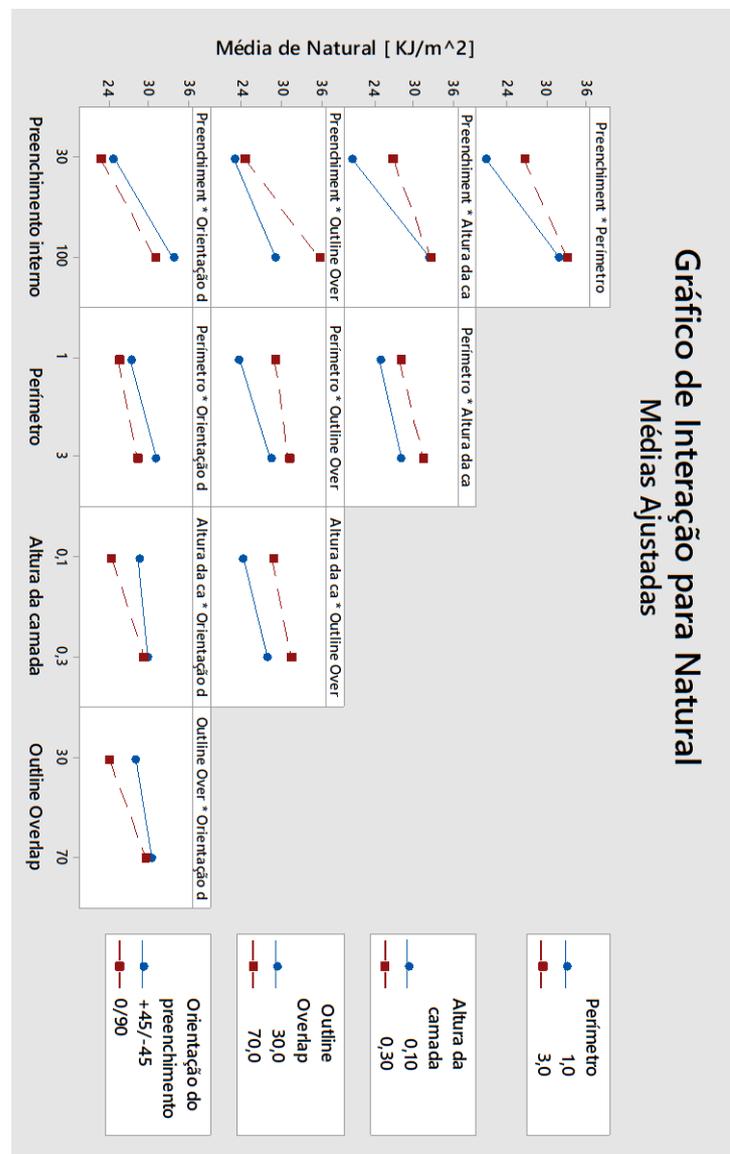
Fonte: Autor (2019).

Objetivando interpretar melhor os resultados dos gráficos dos efeitos principais do PLA Natural, utilizaremos o gráfico de interação, Gráfico 17, que apresenta os gráficos das médias ajustadas da interação entre os parâmetros abordados. Portanto, pode-se obter as seguintes análises:

- Nos gráficos da primeira coluna o preenchimento de 100% tem maior resultados para a resistência ao impacto, quando combinado com os demais parâmetros.

- Nos gráficos da primeira linha, linha inferior, observa-se que os resultados das orientações de preenchimento são próximas quando combinada com outros parâmetros.
- Nos gráficos da segunda coluna, da esquerda para a direita, observa-se que 3 perímetros mostrou melhores resultados ao impacto para o PLA Natural.
- No gráfico da terceira coluna e linha inferior, da esquerda para a direita, observa-se valores próximos para as duas orientações de preenchimento para a altura de camada de 0,3 mm.

Gráfico 18: Gráficos de interações para as médias ajustadas do Natural.



Fonte: Autor (2019).

4.4.4 Resultados para as três cores

Visando melhor descrever os resultados apresentados anteriormente propõe-se a Tabela 5 indicando a ordem do grau de influência de cada parâmetro para o PLA com pigmento branco, preto e sem pigmento (natural). Desta forma, observamos que o preenchimento interno tem maior influência para os três PLA analisados. O mesmo ocorre para a orientação de preenchimento que se repete na mesma posição para as três cores, porém é o de menor influência.

Tabela 5: Grau de influência de cada parâmetros para diferentes cores.

	Branco	Natural	Preto
Preenchimento interno	1°	1°	1°
Perímetro	4°	3°	2°
Altura da camada	2°	4°	3°
Outline Overlap	3°	2°	4°
Orientação de preenchimento	5°	5°	5°

Fonte: Autor (2019).

Com os resultados apresentados anteriormente foi possível através do software Minitab encontrar os parâmetros que indicam o melhor resultado para os ensaios mecânicos de impacto. Com isso, chegou-se nas seguintes combinações de parâmetros para as cores brancos, preto e natural, como mostra a Tabela 6.

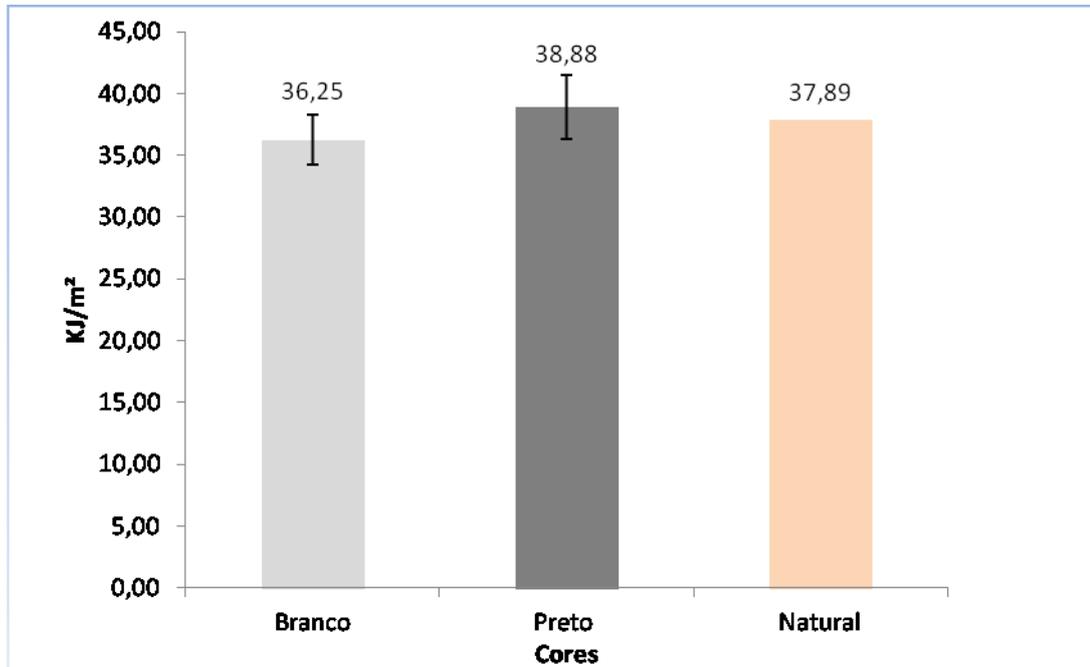
Tabela 6: Melhores resultados para cada cor.

	Branco	Natural	Preto
Preenchimento interno [%]	100	100	100
Perímetro	1	1	1
Altura da camada [mm]	0,3	0,1	0,3
Outline Overlap [%]	70	70	70
Orientação de preenchimento [°]	+45/-45	+45/-45	+45/-45

Fonte: Autor (2019).

Levando em consideração os parâmetros apresentados na Tabela 6 anteriormente, gerou-se o Gráfico 19, que apresenta a média da resistência ao impacto para os melhores resultados alcançados durante os testes realizados no estudo.

Gráfico 19: Maiores resultados de impacto para cada cor.



Fonte: Autor (2019).

Também foi possível identificar os parâmetros que indicam os menores resultados para os ensaios mecânicos de impacto. Com isso, chegou-se nas seguintes combinações de parâmetros para as cores brancos, preto e natural, como mostra a 7.

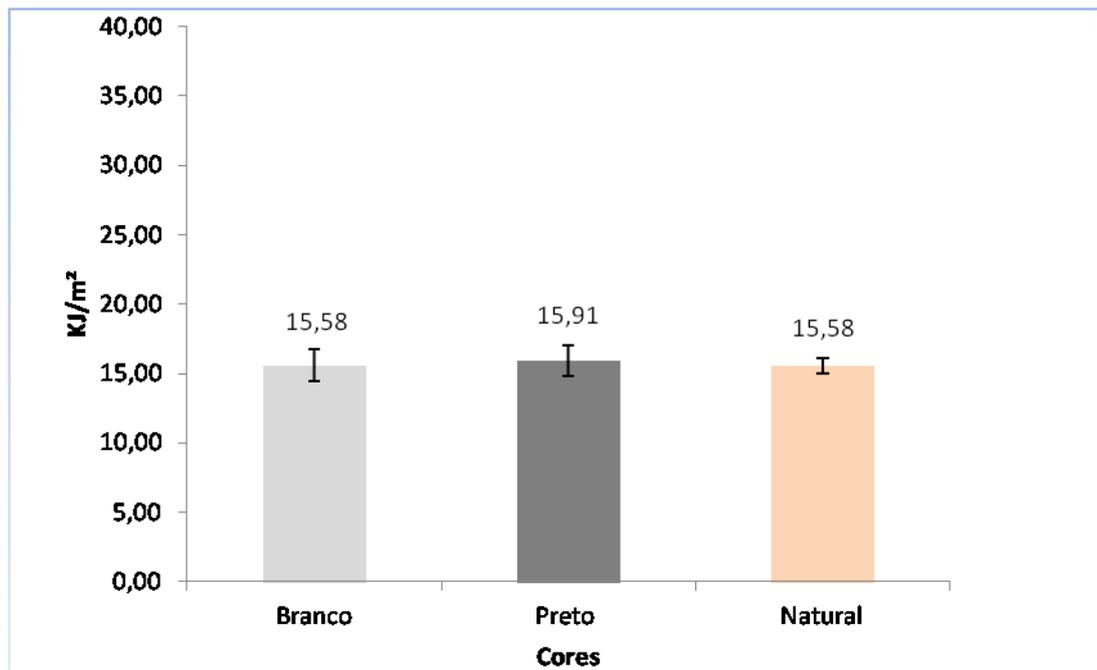
Tabela 7: Menores resultados para cada cor

	Branco	Natural	Preto
Preenchimento interno [%]	30	30	30
Perímetro	1	1	1
Altura da camada [mm]	0,1	0,1	0,1
Outline Overlap [%]	30	30	30
Orientação de preenchimento [°]	0/90	0/90	0/90

Fonte: Autor (2019).

Os parâmetros apresentados na Tabela 7 anteriormente, gerou-se o Gráfico 20 que apresenta a média da resistência ao impacto para os menores resultados alcançados durante os testes de impacto.

Gráfico 20: Menores resultados de impacto para cada cor.



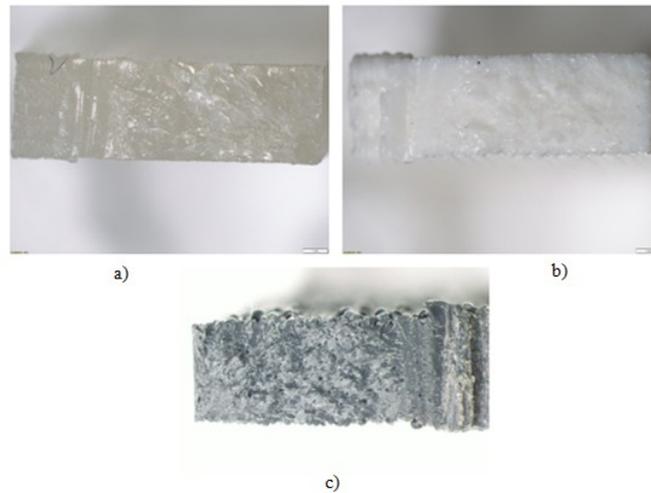
Fonte: Autor (2019).

O menor resultado do branco é 58% menor que o maior resultado obtido nos ensaios de impacto, para o preto é 48% e 50% no branco. Todos os resultados dos ensaios realizados para as três cores estão no apêndice A.

4.4.5 Resultados Microscópio estéreo

Também observou-se com o auxílio do microscópio a ruptura dos CP's das três cores. Na Figura 31 observou-se que as três cores apresentaram o mesmo tipo de ruptura, frágil. Também identificou-se alguns pontos de porosidade na seção do CP preto. Isso pode ser decorrente da temperatura muito elevada para esse tipo de pigmento e dos espaçamentos entre as linhas de preenchimento durante o processo de deposição. Para verificar se o mesmo ocorreu nos outros CP's, seria necessário a utilização de outro tipo de microscópio.

Figura 31: Ruptura dos CP's: a) natural, b) branco e c) preto.

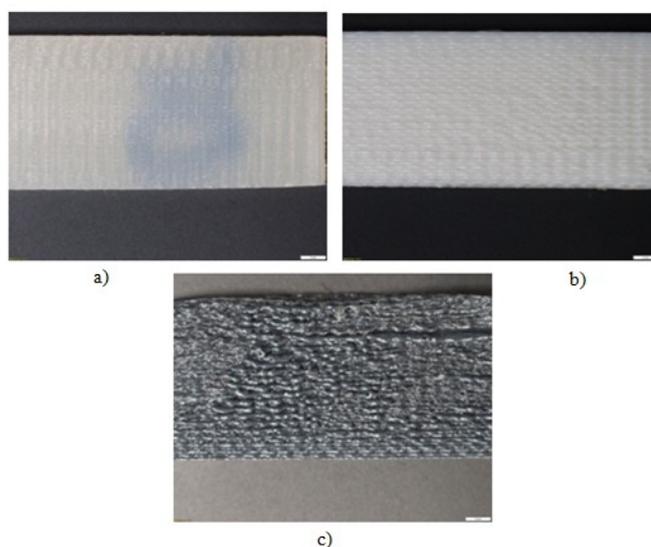


Fonte: Autor (2019).

Na Figura 32, é possível verificar as imagens captadas das linhas de perímetros dos CP's. Sendo possível observar linhas suaves para o CP natural e branco. Já o CP preto é possível observar regiões com excesso de material ao longo das linhas dos perímetros. Isso ocorre devido a alta temperatura de deposição e velocidade inadequada durante a impressão.

Para fins estéticos o CP natural apresentou a melhor continuidade nas linhas de perímetros. Essas são as linhas que ficam expostas nos modelos construído por meio do processo FFF. No caso do CP preto, as linhas são visivelmente descontínuas e com o tato é possível verificar uma maior rugosidade quando comparado com os demais CP's.

Figura 32: Linhas dos perímetros dos CP's: a) natural, b) branco e c) preto.



Fonte: Autor (2019).

5 Conclusões

A disseminação das impressoras 3D tem aumentado a cada ano e o presente trabalho acerca da análise da influência dos parâmetros de processo nas propriedades mecânicas de impacto, tem por finalidade contribuir para o melhor entendimento nas combinações de parâmetros durante a manufatura através do processo FDM.

Neste trabalho utilizou-se o PLA, uma matéria prima popularmente conhecida e de fácil manuseio nas impressões. Com isso, avaliou-se o PLA de um mesmo lote com diferentes pigmentações e verificou-se que o grau de influência de cada parâmetro impacta diferentemente para cada cor.

No entanto, o parâmetro de preenchimento interno tem o maior impacto para todas as cores. Constatando-se que modelos com maior porcentagens de preenchimento apresentam maior resistência mecânica.

O parâmetro de orientação de preenchimento também ficou com o mesmo grau de importância para todas as cores, mas sendo o de menor influência. Já os outros parâmetros não apresentaram as mesmas ordens no grau de influência. Acredita-se que essas alternâncias ocorreram devido a quantidade e a composição da pigmentação utilizada. Um indício está no gráfico do índice de fluidez que apresentou o maior resultado para a cor preta. Outro indicativo são as imagens capturadas no microscópio estéreo. É possível observar a diferença na textura no CP preto, branco e natural.

Devido o maior índice de fluidez para a cor preta, acredita-se que tenha ocorrido melhor adesão entre as camadas. Essa afirmação é decorrente do aspecto visual da Figura 32 c), que mostra uma linha de impressão onde a temperatura estava inadequada durante a deposição. Vale ressaltar que em um processo de construção de camada sobre camada a adesão entre ambas é um fator relevante para resistência mecânica.

Outra questão fundamental para obter um bom resultado é a análise dos efeitos combinados dos parâmetros. Visto que os gráficos de efeitos principais mostram os resultados das médias ajustadas para cada parâmetro. No entanto, alguns parâmetros podem apresentar divergências quando os resultados forem analisados. Esse foi o caso do resultado apresentado para o fator perímetro que nos gráficos de efeitos principais indicavam melhores resultados para três contornos, isso, para todos os filamentos analisados. Entretanto, o parâmetro que indicou as melhores respostas, Tabela 6, foi apenas uma linha de perímetro.

Também ocorreu divergência para o resultado da altura de camada no filamento natural. Visto que o Gráfico 17, gráfico de efeitos principais, indica a média dos melhores

resultados para uma altura de camada de 0,3 mm. Porém, a melhor resposta, tabela 6, foi indicada por uma altura de camada de 0,1 mm combinada com os demais fatores.

Desta forma, é importante analisar a combinação dos parâmetros para o modelo proposto. Visto que para os mesmos parâmetros replicados nos CP's do DOE completo com diferentes pigmentações houve também uma mudança no aspecto visual das peças.

Por fim, este trabalho demonstra a importância de explorar os parâmetros no processo FDM. Visto que não foram encontrados estudos variando os parâmetros outline overlap, camadas superiores, camadas inferiores e padrão de preenchimento externo.

6 Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho abre caminhos para a utilização de novos estudos e possibilita novas investigações em relação aos parâmetros apresentados nesse trabalho. Recomendam-se em outros estudos:

- Aplicar esse procedimento para outras propriedades mecânicas, como resistência à tração e compressão.
- Repetir o DOE fracionado para o PLA preto e branco devido as diferenças apresentadas no DOE completo de cada cor.
- Avaliar os parâmetros L, H e B do DOE fracionado, pois apresentaram o mesmo grau de influência no pré estudo.
- Avaliar a velocidade de impressão para os melhores resultados sugeridos nesse trabalho.
- Investigar o tempo de manufatura em relação a resistência ao impacto.
- Investigar a resistência em relação ao aspecto visual dos modelos.
- Avaliar o tipo e quantidade de pigmento utilizado no filamento.

REFERÊNCIAS

- 3D PRINTING TECHNIQUES (Egito) (Org.). **Digital Light Processing**. Disponível em: <<https://amtech3d.com/3d-printing-techniques/>>. Acesso em: 23 out. 2019.
- 3DCIONER. Indústria Shumacher Ltda. **Home**. Disponível em: <http://3dcloner.ind.br/institucional/2-industria_schumacher Ltda.html>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- ABDULHAMEED, Osama et al. Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. **Advances In Mechanical Engineering**, [s.l.], v. 11, n. 2, p.1-27, fev. 2019. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1687814018822880>.
- ALKAIOS, J. **Introduction to FDM 3D printing**. 2019. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com>>. Acesso em: 21 out. 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **F2792 – 12A**: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. , 2013. 3 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1238 – 13**: Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. 13 ed., 2014. 16 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D256 – 10**: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. 10 ed. , 2018. 20 p.
- BCT (Org.). **Additive Manufacturing with NX**. 2019. Disponível em: <<https://www.bcttechnology.com/en/support/tips-tricks/nx-1102-additive-manufacturing.html>>. Acesso em: 21 out. 2019.
- BLAND, S. (Ed.). Rapid prototyping moves on metal powders. **Pm Special Feature**. ..., p. 22-27. out. 1997. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(97\)87071-3](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(97)87071-3)>. Acesso em: 22 out. 2019.
- BURNS, Marshall. **Rapid prototyping: System selection e implementation guide**. Boston: Management Roundtable, 1991. 165 p.
- CAMINERO, M.a. et al. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 148, p.93-103, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.054>.
- CAMINERO, Miguel Ángel et al. Additive Manufacturing of PLA-Based Composites Using Fused Filament Fabrication: Effect of Graphene Nanoplatelet Reinforcement on Mechanical Properties, Dimensional Accuracy and Texture. **Polymers**, [s.l.], v. 11, n. 5, p.1-22, 4 maio 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym11050799>.
- CARNEIRO, O. S.; SILVA, A. F.; GOMES, R.. Fused deposition modeling with polypropylene. **Materials & Design**. ..., p. 768-776. fev. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.053>>. Acesso em: 21 out. 2019.

CASAGRANDE, Tiago. **Influência da cor no Poli (Ácido Lático) em peças obtidas pelo processo de modelagem por fusão e deposição.** 2018. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, CTJ, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

CHANG, K.H.; LONG, T. **Rapid prototyping for complex assemblies.** Computer-Aided Design and Applications, 2011.

CHACÓN, J.m. et al. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. **Materials & Design**, [s.l.], v. 124, p.143-157, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>.

CUAN-URQUIZO, Enrique et al. Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches. **Materials**, [s.l.], v. 12, n. 6, p.895-850, 18 mar. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma12060895>.

EILIAT, Hasti; URBANIC, Jill. Determining the relationships between the build orientation, process parameters and voids in additive manufacturing material extrusion processes. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 100, n. 1-4, p.683-705, 27 set. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-2540-6>.

GOH, Guo Dong et al. Recent Progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite. **Advanced Materials Technologies**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.1-22, 8 out. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/admt.201800271>.

GOMEZ-GRAS, Giovanni et al. Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. **Materials & Design**, [s.l.], v. 140, p.278-285, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.072>.

HOSSAIN, Mohammad Shojib et al. Improved Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling-Manufactured Parts Through Build Parameter Modifications. **Journal Of Manufacturing Science And Engineering**, [s.l.], v. 136, n. 6, p.1-13, 24 out. 2014. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4028538>.

HUNT, E.J., ZHANG, C., ANZALONE, N., PEARCE, J.M. **Polymer Recycling Codes for Distributed Manufacturing with 3-D printers.** Conservation and Recycling 97 (2015) p. 24-30.

JONES, Rhys et al. RepRap – The Replicating Rapid Prototyper. **Robotica**. p. 1-35. 04 nov. 2009.

KELES, Özgür; BLEVINS, Caleb Wayne; BOWMAN, Keith J.. Effect of build orientation on the mechanical reliability of 3D printed ABS. **Rapid Prototyping Journal**, [s.l.], v. 23, n. 2, p.320-328, 20 mar. 2017. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/rpj-09-2015-0122>.

KNOL, Marius Friso. **THERMAL MODELLING OF SELECTIVE LASER MELTING.** 2016. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mechanical Engineering, Delft University Of Technology, 2016.

KRUTH, J. P.; LEU, M. C.; NAKAGAWA, T.. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. **Elsevier: CIRP Annals**. ..., p. 525-540. out. 1998. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5)>. Acesso em: 21 out. 2019.

KUZNETSOV, Vladimir et al. Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process. **Polymers**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.313-324, 13 mar. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym10030313>.

LAURETO, John J.; PEARCE, Joshua M.. Anisotropic mechanical property variance between ASTM D638-14 type i and type iv fused filament fabricated specimens. **Polymer Testing**, [s.l.], v. 68, p.294-301, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.04.029>.

LIM, C. S., CHUA, C. K., LEONG, K. F., LAU, M. L., & TAN, K. W.. Enhanced learning of rapid prototyping systems through multimedia. **International Journal of Mechanical Engineering Education**, ..., p. 115–125. 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.7227/IJMEE.32.2.3>> Acesso em: 21 out. 2019.

LIU, F.W. **Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development**. 2007

MALOCH, Jaroslav et al. Effect of Processing Parameters on Mechanical Properties of 3D Printed Samples. **Materials Science Forum**, [s.l.], v. 919, p.230-235, abr. 2018. Trans Tech Publications. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.919.230>.

MANDA, Varaprasada Rao; KAMPURATH, Vidhu; MSRK, Chaitanya. 3D Printing and its Effect on Outsourcing: A Study of the Indian Aircraft Industry. **Journal Of Aerospace Technology And Management**, [s.l.], v. 10, p.1-22, 26 fev. 2018. Institute of Aeronautics and Space. <http://dx.doi.org/10.5028/jatm.v10.862>. Manda, Kampurath e Msrk (2018).

MOHAMED, Omar A.; MASOOD, Syed H.; BHOWMIK, Jahar L.. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. **Advances In Manufacturing**, [s.l.], v. 3, n. 1, p.42-53, 25 fev. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>.

MOLINA, René et al. Comportamiento al creep de un polímero utilizado para impresión 3D. **Matéria (rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 23, n. 2, p.1-6, 19 jul. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0412>.

MORADI, Mahmoud; MEIABADI, Saleh; KAPLAN, Alexander. 3D Printed Parts with Honeycomb Internal Pattern by Fused Deposition Modelling; Experimental Characterization and Production Optimization. **Metals And Materials International**, [s.l.], v. 25, n. 5, p.1312-1325, 19 abr. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12540-019-00272-9>.

MURR, L.e. et al. Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting. **Acta Materialia**, [s.l.], v. 58, n. 5, p.1887-1894, mar. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2009.11.032>.

NICKELS, Liz. Additive manufacturing: A user's guide. **Metal Powder Report**, [s.l.], v. 71, n. 2, p.100-105, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mprp.2016.02.045>.

OLYMPUS CORPORATION (Org.). **Microscópio estéreo: SZX10**. Disponível em: <<https://www.olympus-ims.com/pt/microscope/szx10/>>. Acesso em: 21 out. 2019.

PHAM, D.t; GAULT, R.s. A comparison of rapid prototyping technologies. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [s.l.], v. 38, n. 10-11, p.1257-1287, out. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955\(97\)00137-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955(97)00137-5).

RABBIT FORM (Polônia) (Org.). **MJM (Modelagem MultiJet)**. 2014. Disponível em: <<http://www.rabbitform.pl/mjp-multijet-printing-mjm-multijet-modeling/>>. Acesso em: 23 out. 2019.

RABELLO, Marcelo. **Aditivação de polímeros**. São Carlos: Artliber, 2007.

REALMAKER 3D (Brasil) (Org.). **PLA**. 2019. Disponível em: <<https://www.realmaker.com.br/>>. Acesso em: 03 dez. 2019.

REVILLA-LEÓN, Marta; ÖZCAN, Mutlu. Additive Manufacturing Technologies Used for Processing Polymers: Current Status and Potential Application in Prosthetic Dentistry. **Journal Of Prosthodontics**, [s.l.], v. 28, n. 2, p.146-158, 22 abr. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jopr.12801>.

SANTANA, L.; ALVES, J. L.; NETTO A. C. S. A study of parametric calibration for low cost 3D printing: Seeking improvement in dimensional quality. **Mat. Des.** v. 135, p. 159 - 172, 2017.

SIMPLIFY3D (Org.). **Gaps Between Infill and Outline**. 2019. Disponível em: <<https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/gaps-between-infill-and-outline/>>. Acesso em: 23 out. 2019.

SINGH, Sunpreet; RAMAKRISHNA, Seeram; SINGH, Rupinder. Material issues in additive manufacturing: A review. **Journal Of Manufacturing Processes**, [s.l.], v. 25, p.185-200, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006>.

SOUZA, R. H. S; SACHELLI C. M. Estudo inicial das propriedades mecânicas do ABS P430 para fins de uso em moldes híbridos de injeção. In:VII CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA - CONEM, 10 a 15 de Agosto de 2014 , **Anais...**, 9 p., 2014.

TREVISAN, Francesco et al. Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications. **Journal Of Applied Biomaterials & Functional Materials**, [s.l.], v. 16, n. 2, p.57-67, 25 set. 2017. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.5301/jabfm.5000371>.

TYMRAK, B.m.; KREIGER, M.; PEARCE, J.m.. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. **Materials & Design**, [s.l.], v. 58, p.242-246, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>.

VOLPATO, N.; AHRENS, C.H.; FERREIRA, C.V.; GÜNTHER, P.; CARVALHO, J. de; SANTOS, J.R.L. dos; SILVA, J.V.L. da. **Prototipagem Rápida: Tecnologia e Aplicações**. Primeira Edição. São Paulo: Blücher, 2007.

WILLIAMS, Christopher B.; MISTREE, Farrokh; ROSEN, David W.. A Functional Classification Framework for the Conceptual Design of Layered Manufacturing Technologies. **Volume 5**: 13th Design for Manufacturability and the Lifecycle Conference; 5th Symposium on International Design and Design Education; 10th International Conference on Advanced Vehicle and Tire Technologies, [s.l.], v. 133, n. 121002-9, p.1-11, jan. 2008. ASME. <http://dx.doi.org/10.1115/detc2008-49353>.

**APÊNDICE A – PARÂMETROS E RESULTADOS DO DOE COMPLETO BRANCO,
PRETO E NATURAL**

CDP	Preenchimento	Perímetro	Altura da camada	Sobreposição	Ângulo de preenchimento
1	30	1	0,1	30	+45/-45
2	100	1	0,1	30	+45/-45
3	30	3	0,1	30	+45/-45
4	100	3	0,1	30	+45/-45
5	30	1	0,3	30	+45/-45
6	100	1	0,3	30	+45/-45
7	30	3	0,3	30	+45/-45
8	100	3	0,3	30	+45/-45
9	30	1	0,1	70	+45/-45
10	100	1	0,1	70	+45/-45
11	30	3	0,1	70	+45/-45
12	100	3	0,1	70	+45/-45
13	30	1	0,3	70	+45/-45
14	100	1	0,3	70	+45/-45
15	30	3	0,3	70	+45/-45
16	100	3	0,3	70	+45/-45
17	30	1	0,1	30	0/90
18	100	1	0,1	30	0/90
19	30	3	0,1	30	0/90
20	100	3	0,1	30	0/90
21	30	1	0,3	30	0/90
22	100	1	0,3	30	0/90
23	30	3	0,3	30	0/90
24	100	3	0,3	30	0/90
25	30	1	0,1	70	0/90
26	100	1	0,1	70	0/90
27	30	3	0,1	70	0/90
28	100	3	0,1	70	0/90
29	30	1	0,3	70	0/90
30	100	1	0,3	70	0/90
31	30	3	0,3	70	0/90
32	100	3	0,3	70	0/90

CDP	Preenchimento	Perímetro	Altura da camada	Sobreposição	Ângulo de preenchimento
33	30	1	0,1	30	+45/-45
34	100	1	0,1	30	+45/-45
35	30	3	0,1	30	+45/-45
36	100	3	0,1	30	+45/-45
37	30	1	0,3	30	+45/-45
38	100	1	0,3	30	+45/-45
39	30	3	0,3	30	+45/-45
40	100	3	0,3	30	+45/-45
41	30	1	0,1	70	+45/-45
42	100	1	0,1	70	+45/-45
43	30	3	0,1	70	+45/-45
44	100	3	0,1	70	+45/-45
45	30	1	0,3	70	+45/-45
46	100	1	0,3	70	+45/-45
47	30	3	0,3	70	+45/-45
48	100	3	0,3	70	+45/-45
49	30	1	0,1	30	0/90
50	100	1	0,1	30	0/90
51	30	3	0,1	30	0/90
52	100	3	0,1	30	0/90
53	30	1	0,3	30	0/90
54	100	1	0,3	30	0/90
55	30	3	0,3	30	0/90
56	100	3	0,3	30	0/90
57	30	1	0,1	70	0/90
58	100	1	0,1	70	0/90
59	30	3	0,1	70	0/90
60	100	3	0,1	70	0/90
61	30	1	0,3	70	0/90
62	100	1	0,3	70	0/90
63	30	3	0,3	70	0/90
64	100	3	0,3	70	0/90

CDP	Preenchimento	Perímetro	Altura da camada	Sobreposição	Ângulo de preenchimento
65	30	1	0,1	30	+45/-45
66	100	1	0,1	30	+45/-45
67	30	3	0,1	30	+45/-45
68	100	3	0,1	30	+45/-45
69	30	1	0,3	30	+45/-45
70	100	1	0,3	30	+45/-45
71	30	3	0,3	30	+45/-45
72	100	3	0,3	30	+45/-45
73	30	1	0,1	70	+45/-45
74	100	1	0,1	70	+45/-45
75	30	3	0,1	70	+45/-45
76	100	3	0,1	70	+45/-45
77	30	1	0,3	70	+45/-45
78	100	1	0,3	70	+45/-45
79	30	3	0,3	70	+45/-45
80	100	3	0,3	70	+45/-45
81	30	1	0,1	30	0/90
82	100	1	0,1	30	0/90
83	30	3	0,1	30	0/90
84	100	3	0,1	30	0/90
85	30	1	0,3	30	0/90
86	100	1	0,3	30	0/90
87	30	3	0,3	30	0/90
88	100	3	0,3	30	0/90
89	30	1	0,1	70	0/90
90	100	1	0,1	70	0/90
91	30	3	0,1	70	0/90
92	100	3	0,1	70	0/90
93	30	1	0,3	70	0/90
94	100	1	0,3	70	0/90
95	30	3	0,3	70	0/90
96	100	3	0,3	70	0/90

	Natural	Preto	Branco	
1	18,21	15,26	16,24	KJ/m ²
2	32,97	27,07	30,02	KJ/m ²
3	27,07	21,16	26,08	KJ/m ²
4	31,00	30,02	25,10	KJ/m ²
5	23,13	17,22	22,15	KJ/m ²
6	28,05	24,11	25,10	KJ/m ²
7	30,02	27,07	28,05	KJ/m ²
8	32,97	31,00	33,96	KJ/m ²
9	18,21	14,27	21,16	KJ/m ²
10	37,89	32,97	32,97	KJ/m ²
11	26,08	23,13	22,15	KJ/m ²
12	35,93	32,97	31,99	KJ/m ²
13	25,10	21,16	23,13	KJ/m ²
14	34,94	41,83	33,96	KJ/m ²
15	27,07	34,94	30,02	KJ/m ²
16	37,89	35,93	35,93	KJ/m ²
17	15,26	15,26	16,24	KJ/m ²
18	21,16	25,10	23,13	KJ/m ²
19	18,21	26,08	20,18	KJ/m ²
20	28,05	30,02	26,08	KJ/m ²
21	22,15	19,19	23,13	KJ/m ²
22	27,07	27,07	27,07	KJ/m ²
23	28,05	29,04	29,04	KJ/m ²
24	30,02	27,07	29,04	KJ/m ²
25	17,22	16,24	16,24	KJ/m ²
26	35,93	31,99	32,97	KJ/m ²
27	23,13	25,10	22,15	KJ/m ²
28	33,96	32,97	33,96	KJ/m ²
29	26,08	21,16	25,10	KJ/m ²
30	35,93	28,05	35,93	KJ/m ²
31	31,00	29,04	31,99	KJ/m ²
32	34,94	30,02	32,97	KJ/m ²

33	18,21	16,24	16,24	KJ/m ²
34	31,99	28,05	31,99	KJ/m ²
35	26,08	22,15	25,10	KJ/m ²
36	32,97	29,04	30,02	KJ/m ²
37	22,15	21,16	21,16	KJ/m ²
38	30,02	23,13	29,04	KJ/m ²
39	30,02	25,10	29,04	KJ/m ²
40	32,97	31,99	28,05	KJ/m ²
41	18,21	17,22	18,21	KJ/m ²
42	37,89	28,05	31,99	KJ/m ²
43	26,08	22,15	23,13	KJ/m ²
44	35,93	32,97	32,97	KJ/m ²
45	25,10	24,11	23,13	KJ/m ²
46	36,91	37,89	37,89	KJ/m ²
47	31,00	31,99	28,05	KJ/m ²
48	35,93	35,93	35,93	KJ/m ²
49	15,26	17,22	14,27	KJ/m ²
50	22,15	26,08	22,15	KJ/m ²
51	18,21	27,07	19,19	KJ/m ²
52	26,08	31,00	26,08	KJ/m ²
53	23,13	19,19	23,13	KJ/m ²
54	27,07	27,07	27,07	KJ/m ²
55	27,07	27,07	30,02	KJ/m ²
56	31,00	29,04	30,02	KJ/m ²
57	16,24	17,22	18,21	KJ/m ²
58	35,93	28,05	33,96	KJ/m ²
59	23,13	25,10	22,15	KJ/m ²
60	35,93	27,07	34,94	KJ/m ²
61	26,08	22,15	26,08	KJ/m ²
62	36,91	27,07	32,97	KJ/m ²
63	29,04	31,00	31,00	KJ/m ²
64	33,96	30,02	34,94	KJ/m ²

65	19,19	16,24	16,24	KJ/m ²
66	31,00	25,10	31,00	KJ/m ²
67	27,07	24,11	24,11	KJ/m ²
68	32,97	31,00	30,02	KJ/m ²
69	21,16	21,16	20,18	KJ/m ²
70	28,05	23,13	33,96	KJ/m ²
71	31,00	26,08	27,07	KJ/m ²
72	31,00	30,02	30,02	KJ/m ²
73	19,19	17,22	17,22	KJ/m ²
74	37,89	31,00	33,96	KJ/m ²
75	24,11	23,13	23,13	KJ/m ²
76	35,93	31,99	32,97	KJ/m ²
77	25,10	23,13	23,13	KJ/m ²
78	31,99	36,91	36,91	KJ/m ²
79	30,02	32,97	30,02	KJ/m ²
80	35,93	32,97	35,93	KJ/m ²
81	16,24	15,26	16,24	KJ/m ²
82	22,15	27,07	21,16	KJ/m ²
83	18,21	25,10	19,19	KJ/m ²
84	28,05	30,02	26,08	KJ/m ²
85	22,15	21,16	22,15	KJ/m ²
86	28,05	26,08	27,07	KJ/m ²
87	29,04	34,94	30,02	KJ/m ²
88	31,00	31,00	29,04	KJ/m ²
89	17,22	16,24	16,24	KJ/m ²
90	35,93	30,02	32,97	KJ/m ²
91	23,13	25,10	21,16	KJ/m ²
92	34,94	36,91	34,94	KJ/m ²
93	26,08	23,13	25,10	KJ/m ²
94	34,94	28,05	33,96	KJ/m ²
95	29,04	28,05	29,04	KJ/m ²
96	31,99	31,00	32,97	KJ/m ²