



PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

PROJETO PARA MANUFATURA ADITIVA DE PEÇAS COM TOPOLOGIA COMPLEXA

Meriane Ferreira da Costa Meneses

Brasília-DF, 20 de dezembro de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

PROJETO PARA MANUFATURA ADITIVA DE PEÇAS COM TOPOLOGIA COMPLEXA

POR,

Meriane Ferreira da Costa Meneses

Projeto de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Mecânica como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alberto Carlos G. C. Diniz, ENM/FT-UnB (*Orientador*)

Prof. Dr. Adriano Todorovic Fabro, ENM/FT-UnB (*Examinador interno*)

Prof. Dr. Marcus Vinícius Girão de Moraes, ENM/FT-UnB (*Examinador interno*)

Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus, ao meu marido Alex Ferreira, a minha família em especial a minha mãe Sonia Maria, e às minhas amigas irmã Jurema, Mônica e todos os demais que me apoiaram durante toda a minha graduação e minha vida.

Meriane Ferreira da Costa Meneses

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus pela minha vida, e por todas as oportunidades que Ele me concedeu ao longo desses anos que permitiu ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da graduação, e a minha família pelo apoio, cuidados e incentivo constantes. Agradeço também ao meu orientador Prof. Alberto Carlos G. C. Diniz pelo acolhimento, paciência, incentivo e aprendizado, a Universidade de Brasília e a Faculdade de Tecnologia por todo ensinamento e recursos na realização deste trabalho. Aos demais professores e servidores do Departamento de Engenharia Mecânica pela dedicação ao ensino e aos meus amigos que passaram pela minha vida acadêmica e contribuíram de alguma forma, sei que foi Deus que colocou vocês no meu caminho. Minha gratidão a todos.

Meriane Ferreira da Costa Meneses

A indústria 4.0 apresentou a integração de sistemas de manufatura inteligentes e tecnologias de informação avançadas, como a manufatura aditiva e a otimização estrutural, que passaram a ter grandes responsabilidades na engenharia, pois possibilitam grandes vantagens como economia de tempo e material e a prototipagem rápida. A capacidade de produzir peças com geometria complexa tem inserido essas tecnologias em crescentes números de setores como defesa, aeroespacial, biomedicina e automotivo. A manufatura aditiva consiste na aplicação de tecnologia de impressão tridimensional capaz de construir um modelo a partir do zero, através do incremento de material camada por camada. Já a otimização estrutural, é o processo responsável por atender certas restrições, minimizando ou maximizando uma ou mais funções para obter o projeto estrutural mais eficiente possível. A otimização estrutural pode ser realizada alterando as dimensões, forma e/ou topologia da estrutura, gerando peças complexas. Hoje em dia, existe uma grande necessidade em todos os setores de reduzir custos e aumentar a produtividade, concentrada principalmente em peças fabricadas. Dessa forma, a manufatura aditiva aliada a otimização topológica, formam um conjunto de ferramentas que possibilitam atender essas necessidades, e também a crescente demanda de eficiência e inovação dos mais variados setores de projeto e fabricação. Uma das tecnologias de manufatura aditiva mais populares atualmente para a prototipagem é o processo de modelagem de deposição fundida. Nesse processo, um filamento de plástico parcialmente derretido é extrudado por um bico fino e depositado em uma superfície plana para formar um objeto tridimensional. Na utilização da manufatura, os projetistas podem ser orientados pelos prós e contras da implementação do processo de fabricação para atender às necessidades específicas do projeto e configurar parâmetros do processo, como orientação da peça e necessidades de suporte durante a produção. Metodologias de projeto para manufatura aditiva (DfAM) permitem que os engenheiros reconheçam que o projeto de um componente pode ser modificado para acomodar restrições do processo sem prejudicar a funcionalidade pretendida do projeto. Em outras situações, estabelece parâmetros do processo para atender aos parâmetros do projeto. Isso mostra a importância de uma orientação nos estágios iniciais do processo de projeto, quando o produto ainda não está definido. Alguns parâmetros do processo podem ser determinados no fatiamento seguindo as restrições do projeto e o modelo de equipamento de manufatura aditiva através do software de fatiamento. O UltiMaker Cura® é um dos mais populares softwares de fatiamento e abrange a metodologia abordada nesse estudo.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Peças complexas; DfAM; FDM; Fatiamento.

ABSTRACT

Industry 4.0 introduced the integration of intelligent manufacturing systems and advanced information technologies, such as additive manufacturing and structural optimization, which now have major responsibilities in engineering, as they enable great advantages such as time and material savings and rapid prototyping. The ability to produce parts with complex geometry has introduced these technologies into a growing number of sectors such as defense, aerospace, biomedicine and automotive. Additive manufacturing consists of the application of three-dimensional printing technology capable of building a model from scratch, by adding material layer by layer. Structural optimization, on the other hand, is the process responsible for meeting certain restrictions, minimizing or maximizing one or more functions to obtain the most efficient structural design possible. Structural optimization can be carried out by changing the dimensions, shape and/or topology of the structure, generating complex parts. Nowadays, there is a great need in all sectors to reduce costs and increase productivity, mainly concentrated in manufactured parts. In this way, additive manufacturing combined with topological optimization form a set of tools that make it possible to meet these needs, as well as the growing demand for efficiency and innovation in the most varied design and manufacturing sectors. One of the most popular additive manufacturing technologies today for prototyping is the fused deposition modeling process. In this process, a partially molten plastic filament is extruded through a fine nozzle and deposited on a flat surface to form a three-dimensional object. In manufacturing utilization, designers can be guided through the ins and outs of implementing the manufacturing process to meet specific design needs and configure process parameters such as part orientation and support needs during production. Design methodologies for additive manufacturing (DfAM) allow engineers to recognize that a component's design can be modified to accommodate process constraints without detracting from the design's intended functionality. In other situations, it establishes process parameters to meet project parameters. This shows the importance of guidance in the early stages of the design process, when the product is not yet defined. Some process parameters can be determined in slicing following the design constraints and additive manufacturing equipment model through the slicing software. UltiMaker Cura® is one of the most popular slicing software and covers the methodology covered in this study.

Keywords: Additive Manufacturing; Complex parts; DfAM; FDM; Slicing.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVO.....	3
1.2. METODOLOGIA	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	5
2.1.1 Problemas de Otimização e Métodos Numéricos.....	6
2.1.2 Otimização Paramétrica ou Dimensional	9
2.1.3 Otimização de Forma	9
2.1.4 Otimização Topológica	10
2.2. MANUFATURA ADITIVA	15
2.2.1 Processos e aplicações.....	15
2.2.2 Jateamento de Aglutinante	18
2.2.3 Fotopolimerização de Cuba.....	19
2.2.4 Modelagem de Deposição Fundida (Extrusão de Material).....	20
2.2.5 Jateamento de Material.....	21
2.2.6 Laminação em Folha	22
2.2.7 Deposição por Energia Direta	24
2.2.8 Fusão de Leito em Pó	26
2.2.9 Vantagens e Desvantagens	27
2.2.10 Comparações com outros processos de manufatura.....	31
2.2.11 Cadeia Digital de Fabricação por MA.....	33
2.3. FERRAMENTAS PARA DESIGN DE MANUFATURA ADITIVA.....	34
3. METODOLOGIA DE PROJETO PARA MANUFATURA ADITIVA	37
3.1. METODOLOGIAS APRESENTADAS NA LITERATURA	40
3.2. ANÁLISE DE VIABILIDADE	48
3.3. PROJETO PARA FUNCIONALIDADE.....	51
3.4. DEFINIÇÕES DO PROCESSO.....	53
4. APLICAÇÃO DA PROPOSTA PARA MODELAGEM DE DEPOSIÇÃO FUNDIDA (FDM) 57	
4.1. ANÁLISE DO PROCESSO DE FDM	58
4.2. SISTEMÁTICA DO PROCESSO	58
4.2.1 Análise de Viabilidade	58
4.2.2 Projeto para Funcionalidade.....	60
4.2.3 Definições do Processo	62
5. ESTUDO DE CASO	71
5.1. GEOMETRIAS DO PROJETO	72
5.1.1 Decisões de projeto	73

5.2. ANÁLISE ESTRUTURAL	73
5.3. SIMULAÇÃO DA FABRICAÇÃO	79
5.4. ESTUDO DE VIABILIDADE	84
5.4.1. Modelo com braços maciços	85
5.4.2. Modelo com braços vazados	88
5.4.3. Modelo com braços vazados reforçados	91
6. CONCLUSÕES	95
REFERÊNCIAS	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Categorias de OE com os problemas a esquerda e as soluções ótimas mostradas a direita. a) Otimização dimensional de uma estrutura de treliça, b) otimização de forma e c) otimização topológica. Adaptado de Bendsoe e Sigmund (2004).....	8
Figura 2 – Otimização dimensional - Adaptado de Christensen e Klarbring (2009)	9
Figura 3 – Otimização de forma - Adaptado de Christensen e Klarbring (2009)	10
Figura 4 - Otimização topológica - Adaptado de Christensen e Klarbring (2009).....	10
Figura 5 - Procedimento de projeto estrutural utilizando OT – Adaptado de Silva (2002)	12
Figura 6 – Processo de otimização topológica de uma prótese craniofacial – Adaptado de Sutradhar, et al (2016).....	13
Figura 7 – OT de Stents Conor – Wu (2008)	14
Figura 8 - Protótipo de um bloco do motor de aço inox 316L (ExOne, 2021)	19
Figura 9 – Equipamento de FDM – Adaptado de CustomPartNet (2022)	20
Figura 10 - Exemplo da utilização de estruturas de suporte – Adaptado de Volpato (2007)	21
Figura 11 – Equipamento de Jateamento de Material – Adptado de Varotsis (2022).....	22
Figura 12 - Layout de uma máquina de laminação em folha (WANG, 2019)	23
Figura 13 - Esquema do processo de fabricação de aditivo ultrassônico (Adaptado de ZHANG, 2018).....	24
Figura 14 - MA de uma peça pelo processo de deposição por energia direta (METALAM, 2022).....	25
Figura 15 - Um bocal de foguete fabricado no processo DED para aplicações aeroespaciais (GRADL, 2021)	25
Figura 16 - Impressora de fusão em leito de pó da GE Additive (ALL3DP, 2022).....	26
Figura 17 - Comparação entre processos de MA de componentes aeroespaciais - Adaptado de Garcia-Colomo et al. (2019).....	27
Figura 18 – Turbilhonadores produzidos pela Siemens (AMFG, 2020)	32
Figura 19 – Combustores produzidos por manufatura convencional na esquerda e MA na direita (ARC ADVISORY GROUP, 2018).....	32
Figura 20 – Cabeçote injetor produzido por MA (EOS, 2021)	33
Figura 21 – Softwares utilizados no processo de MA por OT. (NIETO; SANCHEZ,2021)	35
Figura 22 - Metodologia de processo para consolidação de componentes – Adaptado Yang, Tang e Zhao (2015)	43
Figura 23 - PDP-MA – Adaptado de Kumke, Watschke e Vietor (2016).....	46
Figura 24 - Metodologia de processo de projeto – Adaptado de Wiberg, Persson e Olvander (2019)	47
Figura 25 – Fluxograma da etapa de análise de viabilidade do projeto para MA – Adaptado de Alves (2021)	49
Figura 26 - Fluxograma da etapa de análise de viabilidade do projeto para MA – Adaptado de Alves (2021)	51
Figura 27 - Fluxograma da etapa de definições do processo do projeto para MA – Adaptado de Alves (2021)	53
Figura 28 – Filtro de seleção complexidade – Adaptado de Diegel, Nordin e Motte (2019)	59
Figura 29 - Domínio com 41 elementos quadrados e (b) domínio com 192 elementos – Adaptado de Hutton (2004).....	63

Figura 30 – Ensaio por elementos finitos de peça discretizada por trajetórias (GÓRSKI, KUCZKO, HAMROL, 2015).....	64
Figura 31 – Padrões de preenchimento – (CAVALCANTE, 2022).....	66
Figura 32 – Parâmetros de impressão de FDM investigados em publicações (CAVALCANTE, 2022)	67
Figura 33 – Ilustração da percepção de falhas e distorções na peça – (ALL3DP, 2023)..	68
Figura 34 – Análise da verificação da necessidade de suportes – (ULTIMAKER, 2022)	69
Figura 35 – Fluxograma de execução do trabalho – Autoria própria.....	71
Figura 36 – Opções de modelo de carcaça de drone - Autoria própria a partir de Gradcab (2017)	72
Figura 37 – Condições de contorno aplicados as estruturas dos modelos 1, 2 e 3 – Autoria própria	74
Figura 38 - Malha do modelo 1 gerada no software SolidWorks® – Autoria própria.....	74
Figura 39 – Malha do modelo 2 gerada no software SolidWorks® – Autoria própria	75
Figura 40 – Malha do modelo 3 gerada no software SolidWorks® – Autoria própria	75
Figura 41 – Tensão equivalente de von Mises para o modelo 1 – Autoria própria.....	76
Figura 42 - Tensão equivalente de von Mises para o modelo 2 – Autoria própria	76
Figura 43 – Tensão equivalente de von Mises para o modelo 3 – Autoria própria.....	77
Figura 44 – Deformação máxima do modelo 1 – Autoria própria	78
Figura 45 – Deformação máxima do modelo 2 – Autoria própria	78
Figura 46 - Deformação máxima do modelo 3 – Autoria própria.....	79
Figura 47 – Interface de seleção de impressora e material no software UltiMaker Cura® – Autoria própria.....	80
Figura 48 - Interface de seleção de altura e espessura da camada no software UltiMaker Cura® – Autoria própria	82
Figura 49 - Interface de seleção de preenchimento e velocidade no software UltiMaker Cura® – Autoria própria	82
Figura 50 - Interface de seleção de suporte e aderência a mesa no software UltiMaker Cura® – Autoria própria	83
Figura 51 – Modelagem do drone com braços maciços – Autoria própria	85
Figura 52 – Modelo sendo preparado no software de fatiamento UltiMaker Cura® - Autoria própria	86
Figura 53 – Simulação do modelo no software de fatiamento - Autoria própria	87
Figura 54 - Modelagem do drone com braços vazados - Autoria própria.....	88
Figura 55 - Modelo sendo preparado no software de fatiamento UltiMaker Cura® - Autoria própria	89
Figura 56 - Simulação do modelo no software de fatiamento - Autoria própria.....	90
Figura 57 - Modelagem do drone com braços vazados reforçados (GRADCAB, 2017)..	91
Figura 58 - Modelo sendo preparado no software de fatiamento UltiMaker Cura® - Autoria própria	92
Figura 59 - Simulação do modelo no software de fatiamento - Autoria própria.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Técnicas de Manufatura Aditiva - Adaptado de Guo e Leu (2013)	16
Tabela 2 - Tecnologias de MA. - ISO/ASTM 52900:2015	18
Tabela 3 – Limitações da MA – Adaptado de Bromberger e Kelly (2017).....	29
Tabela 4 – MA - Adaptado de Bromberger e Kelly (2017), AMFG (2020), Attaran (2017) e Tofail, et al (2018).....	30
Tabela 5 – Etapas do desenvolvimento de produto – Adaptado de Borges e Naveiro (1998)	38
Tabela 6 – Características DfX – Adaptado de Melo, Merino e Merino (2017)	38
Tabela 7 – Elementos definidos pelo subcomitê ASTM-F42.02 (ASTM, 2018).....	41
Tabela 8 – Características do FDM e dos materiais TPU e PETG - Adaptado de Diegel, Nordin e Motte (2019).....	60
Tabela 9 – Restrições de projeto para FDM – (ALVES, 2021).....	61
Tabela 10 – Características do material PETG.....	73
Tabela 11 – Parâmetros de impressão a serem inseridos.....	84
Tabela 12 – Propriedades de massa do modelo 1	85
Tabela 13 – Propriedades de massa do modelo 2	89
Tabela 14 – Propriedades de massa do modelo 3	92
Tabela 15 – Resultados obtidos	94
Tabela 16 – Divisão por ano das fontes de pesquisa.	97
Tabela 17 – Divisão por categoria das fontes de pesquisa.	97

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Siglas e Símbolos

3D	3 Dimensões
3DP	Impressão 3D
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Sociedade Americana para Ensaios de Materiais
CAD	Desenho Assistido por Computador
CAE	Engenharia Auxiliada por Computador
CAM	Manufatura Auxiliada por Computador
CLIP	Produção de Interface Líquida Contínua
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DED	Deposição por Energia Direta
DfA	Projeto para Montagem
DfM	Projeto para Manufatura
DfAM	Projeto para Manufatura Aditiva
DMD	Deposição Direta de Metal
EBM	Fusão de Feixe de Elétrons
FDM	Modelagem por Deposição de Material Fundido
FEF	Fabricação por Extrusão Congelada
ISO	Organização Internacional de Padronização
LENS	Moldagem de Rede Projetada a Laser
LMD	Deposição de Metal a Laser
LOM	Manufatura de Objetos em Lâminas
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MEF	Método de Elementos Finitos
MJM	Modelagem Multijato
NURBS	Modelo Matemático Utilizado em Programas Gráficos
OE	Otimização Estrutural
OT	Otimização Topológica
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produtos
PETG	Polietileno Tereftalato com Glicol
RFP	Prototipagem de Congelamento Rápido
SLA	Estereolitografia
SLM	Fusão Seletiva a Laser
SLS	Sinterização Seletiva à Laser
STL	Extensão de Arquivo de Estereolitografia
UAM	Fabricação Aditiva Ultrassônica
UC	Ultrassônica de Consolidação
UV	Ultravioleta

1. INTRODUÇÃO

A Engenharia está associada ao conhecimento necessário para planejar, projetar, fabricar, manter e aperfeiçoar equipamentos, estruturas, sistemas, materiais e processos, passando pelo conjunto de requisitos que devem ser alcançados através do correto dimensionamento de um projeto. A indústria 4.0 apresentou a integração de sistemas de manufatura inteligentes e tecnologias de informação avançadas, e dessa forma, a manufatura aditiva passou a ter uma grande responsabilidade visto que emprega importantes melhorias, como otimização estrutural, economia de tempo e material, prototipagem rápida, alta eficiência e métodos de produção descentralizados (MEHRPOUYA, et al., 2019).

A manufatura aditiva (MA) possibilita a fabricação geométrica de peças complexas, garantindo uma redução de massa, além da diminuição de tempo de ciclo entre a produção do modelo virtual e fabricação do modelo físico, gera menos resíduos de produção, o que garante assim a eficiência de materiais, redução de energia, e dessa forma, diminuição de custos. Essa tecnologia vem sendo adotada por um número crescente de setores como: defesa, aeroespacial, biomedicina e automotivo (ZHAI; LADOS; LAGOY, 2014).

A manufatura aditiva (MA) consiste na aplicação de tecnologia de impressão 3D capaz de construir um modelo a partir do zero, através do incremento de material camada por camada, trazendo uma economia, pois não há desperdício do mesmo, não gerando custo adicional em reaproveitamento (RODRIGUES, et al, 2017). Os produtos fabricados por manufatura aditiva envolvem uma sucessão de estágios que, vão desde a definição do objeto de forma virtual que pode ser com a utilização de um desenho CAD (Desenho Assistido por Computador) do objeto a ser criado ou através da reprodução de uma peça existente com a realização de um escaneamento, indo até a finalização da mesma com execução do acabamento e colocação para aplicação final (GIBSON, et al, 2015, p.4).

Atualmente, há uma grande necessidade em todos os setores de reduzir custos e aumentar a produtividade, concentrada principalmente em peças fabricadas. Existem muitos processos e fases que vão desde a fase do processo de projeto até a fase de vendas, mas acredita-se que a fase do processo de projeto, onde os processos de geometrias, tipos de materiais, manufatura, pós processamento e demais tratamentos são definidos tenham maior efeito. Sendo assim, uma forma de reduzir custos é aplicar metodologias nessa fase. Neste contexto, uma possibilidade é utilizar técnicas de otimização estrutural (OE) durante a fase do processo de projeto. A OE visa satisfazer certas restrições e minimizar ou maximizar uma ou mais funções

para obter o projeto estrutural mais eficiente possível. A otimização estrutural pode ser realizada alterando as dimensões, forma e/ou topologia da estrutura (LOPEZ; MIGUEL, 2013).

Técnicas de OE, como a otimização topológica, e a crescente utilização de softwares comerciais que incorporam ferramentas de otimização topológica, têm impactado o projeto de peças e componentes na indústria mecânica levando a concepção de peças com geometrias cada vez mais complexas, visto as facilidades advindas da manufatura aditiva. A otimização topológica é uma área da engenharia que se propõe em projetar a topologia ótima de estruturas segundo determinado conjunto de critérios de projeto, que pode ser o menor peso da estrutura ou a restrição a um dado limite de tensão ou deslocamento (ALMEIDA; SIMONETTI; NEVES, 2014).

O setor de manufatura aditiva é favorecido pela otimização topológica (OT), pois esta técnica permite a produção de peças e estruturas com geometrias complexas, desempenho aprimorado, densidade e duração de fabricação reduzida, além de melhoria nos custos devido à redução de massa (ROZVANY, 2009). Dessa forma, a MA aliada a OT, formam um conjunto de ferramentas que possibilitam atender à crescente demanda de eficiência e inovação dos mais variados setores de projeto e fabricação.

Na MA, as metodologias e ferramentas de projeto existentes são limitadas às etapas avançadas do processo de projeto da peça que são específicas do tipo de processo e não apresentam as interfaces com as abordagens existentes de desenvolvimento de produto (KUMKE; WATSCHKE; VIETOR, 2016). As metodologias existentes não oferecem suporte para os engenheiros com uma visão de todo o processo de projeto (LAVERNE et al., 2015). Sendo assim, é interessante notar que para aumentar a eficácia da MA, se faz necessário uma orientação nos estágios iniciais do processo de projeto, quando o produto ainda não está definido. Enfoques criativos podem ser adotadas para gerar soluções inovadoras que explorem seus recursos de maneira economicamente viável (PRADEL et al., 2018).

Uma das tecnologias de MA mais populares atualmente para a prototipagem é o processo de modelagem de deposição fundida (FDM). Nesse processo, um filamento de plástico parcialmente derretido é extrudado por um bico fino e depositado em uma superfície plana para formar um objeto tridimensional.

A atividade de fatiamento é responsável por dividir a geometria da peça em fatias finas, criando assim uma divisão em camadas. Conforme a tecnologia de MA utilizada, os parâmetros do processo são determinados no fatiamento seguindo as restrições do projeto e o modelo de equipamento de MA. Existem vários softwares que realizam essa tarefa. O UltiMaker Cura® é um dos mais populares softwares de fatiamento e abrange a metodologia abordada no estudo.

1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVO

A motivação do trabalho se baseia no crescimento da utilização da otimização topológica que geram formas de peças complexas. A manufatura aditiva possibilita a criação de qualquer tipo de geometria, porém com limitações. Para contornar essas limitações é necessário que o projetista avalie os cuidados pensando na melhor forma de projetar peças que serão fabricados por manufatura aditiva. O conhecimento das vantagens e desvantagens, além das tecnologias, levam ao projetista a adaptar aquela que seja mais adequada a sua necessidade, a fim de prevenir quaisquer obstáculos que possam impedir a correta fabricação e minimizar custos.

Nesse contexto o objetivo desse projeto de graduação é avaliar três diferentes configurações de projeto de uma estrutura de geometria complexa fabricada por Manufatura Aditiva por modelagem de deposição fundida (FDM) buscando a economia de material ao mesmo tempo que garanta propriedades mecânicas capazes de suportar as condições de carregamento impostas. A redução de material não só gera economia de recursos financeiros, com a diminuição de custos de produção, como também melhora o desempenho e a eficiência dos produtos, como por exemplo uma aeronave que pesando menos, consome menos combustível.

1.2. METODOLOGIA

Baseado no processo de projeto para manufatura aditiva proposto no mestrado de Tiago Camargo Alves intitulado “*Proposta de uma sistemática do Projeto para Manufatura Aditiva (DfAM) no contexto de desenvolvimento de produtos*” (Alves, 2021) foi feito um estudo de caso de uma peça que havia passado por um processo de otimização topológica usando softwares comerciais. Para a simulação do processo de manufatura aditiva foi usado o software Ultimaker Cura® e para a análise estrutural foi utilizado o software SolidWorks®, onde o uso da simulação na engenharia permitiu a visualização com maior precisão do resultado que a máquina fará na prática, além de possibilitar a análise por métodos de elementos finitos de como os projetos de seus produtos funcionarão em condições reais. Nos tópicos abordados, são discutidos os assuntos pertinentes, onde será analisada a aplicabilidade da sistemática abordada através de software de simulação, com o objetivo de simular o processo físico de construção para ajudar a encontrar uma orientação de construção ideal, estruturas de suporte, propriedades de materiais ou para compensar distorções.

Para melhor avaliação das situações estudadas foi feito um estudo preliminar dos diferentes processos de MA, bem como um breve estudo introdutório do processo de otimização topológica, para melhor compreender os impactos da associação dessas duas tecnologias no processo de projeto para MA.

Além da dissertação de mestrado mencionada, também foram estudadas outras referências sobre Projeto para Manufatura Aditiva (DfAM).

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Além dessa introdução, este trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2 - Contém a revisão da literatura, incluindo trabalhos de outros autores sobre o assunto tratado e as bases teóricas usadas na pesquisa de forma a compreender os objetivos propostos e as contribuições alcançadas;
- Capítulo 3 - Descreve a metodologia baseada na análise de viabilidade, projeto para funcionalidade e definições do processo aplicados para obtenção de projetos para manufatura aditiva;
- Capítulo 4 - Apresenta a metodologia de projeto voltada para tecnologia de modelagem de deposição fundida (FDM);
- Capítulo 5 - Apresenta em detalhe os resultados e análises obtidos em cada etapa do desenvolvimento do estudo de caso;
- Capítulo 6 - Contém a conclusão e sugestão de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

A Otimização Estrutural (OE) é o processo de definição da melhor distribuição de material num domínio de volume físico, para transmitir ou suportar com segurança a condição de carregamento inserida, levando em consideração as limitações impostas pela fabricação e tipo de uso (QUERIN, 2017).

Trata-se de um procedimento numérico que busca configurações estruturais ótimas a partir de uma medida pré-determinada de desempenho, podendo ser mínima massa, máxima rigidez, dentre outros requisitos (SIMONETTI, et al, 2016). Projetos cada vez mais sustentáveis e suas soluções economicamente viáveis justificam a importância da otimização estrutural, cujo propósito é a redução do consumo de recursos naturais, sem a perda da eficiência estrutural (LANES; GRECO, 2013).

Os projetos de estruturas que envolvem setores aeronáuticos, mecânicos e construção civil por exemplo, exigem a elaboração do projeto com a topologia exata de uma estrutura para um determinado espaço de projeto, suporte e condições de carregamento. O projeto estrutural mais acertado, normalmente é motivado através das considerações de recursos materiais limitados, competição tecnológica e questões ambientais (LIANG, 2005, p.11).

A OE busca explorar os recursos disponíveis maximizando a utilidade, de forma a alcançar o melhor projeto viável de acordo com uma medida de eficácia pré-selecionada. A carência de matérias-primas leva a uma demanda por peso leve e estruturas de baixo custo, ressaltando o requisito de peso e custo em projetos de otimização de estruturas. Dessa forma, o processo do projeto de estruturas pode ser dividido em quatro estágios: a formulação dos requisitos, o conceito do projeto, a otimização e o detalhamento (KIRSCH, 1993, p.1).

A otimização estrutural realizada através de métodos numéricos como ferramenta de design oferece algumas vantagens, como por exemplo, redução do tempo e melhoria da qualidade do design, mesmo em casos em que a otimização por si só não economiza tempo ou custo do projeto, tornando o resultado final superior. Também permite lidar com uma ampla diversidade de variáveis de projeto e restrições relativas aos métodos tradicionais, além de possibilitar melhorias e resultados inesperados através da aplicação de procedimentos de design lógico sistematizado (KIRSCH, 1993, p.5).

2.1.1 Problemas de Otimização e Métodos Numéricos

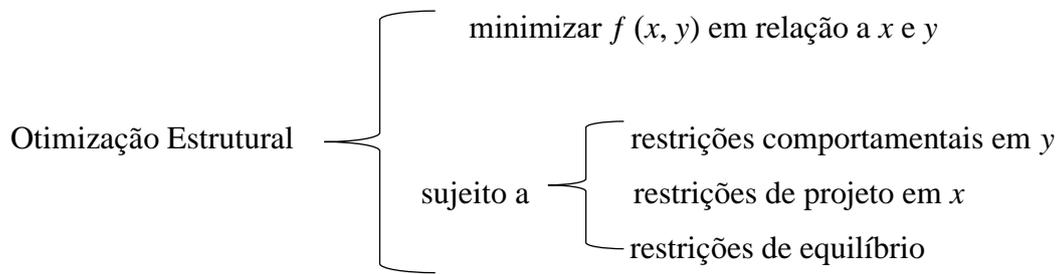
Os métodos numéricos são técnicas nas quais os problemas matemáticos são elaborados de maneira que possam ser solucionados através de operações aritméticas, e por envolverem muitos cálculos aritméticos maçantes, sua utilização na resolução de problemas de engenharia tem aumentado juntamente com o desenvolvimento de computadores rápidos e eficientes (CHAPRA; CANALE, 2016, p3).

Os métodos numéricos utilizam uma ramificação no campo da matemática numérica conhecida como programação matemática, e os desenvolvimentos neste ramo são relacionados ao crescimento da capacidade de computação (KIRSCH, 1993, p.4). Nos métodos de programação matemática, o projeto estrutural é tratado como um problema de extremização matemática de uma função de custo ou objetivo em um espaço variável de projeto multidimensional, delimitado por alguns comportamentos funcionais e ou geométricos (HASSANI; HINTON, 1999, p3).

A forma matemática geral de um problema de otimização estrutural segundo Christensen e Klarbring (2009) possui funções e variáveis que se apresentam como:

- Função Objetivo (f): É a função responsável por classificar os projetos, onde f retorna um número que corresponde à sua qualidade. Em problemas de minimização, busca-se um valor de f menor, que pode representar o peso ou tensão efetiva, por exemplo. Pelo lado matemático, a função objetivo é função das variáveis de projeto e de estado $f(x, y)$.
- Variável de Projeto (x): É o vetor ou função, que representa o projeto, como a geometria da peça ou até mesmo o seu material. Na geometria, ele refere-se à interpolação da forma. Esta variável pode ser redefinida ao longo do processo de otimização.
- Variável de Estado (y): Para uma variável de projeto x , a variável de estado y é o vetor ou função, que representa a resposta da estrutura quanto às suas condições impostas. No caso de um objeto mecânico, esta resposta significa deslocamento, tensão, deformação ou força.

O problema de otimização estrutural é descrito como:



As restrições de comportamento em y são descritas como $g(y) \leq 0$, sendo g a função que representa a resposta da estrutura, como um deslocamento ou uma deformação, por exemplo. Já as restrições de projeto em x são as similares da variável do projeto x , como por exemplo, a dimensão e o material.

Se tratando de um problema linear discretizado, as restrições de equilíbrio podem ser representadas como $K(x)u = F(x)$, onde $K(x)$ é a matriz de rigidez da estrutura, geralmente função de projeto, u é o vetor deslocamento, que assume o papel da variável de estado geral y , e $F(x)$ é o vetor de força, que depende do projeto.

A OE possui um amplo campo de expectativas, e dessa forma, existem muitas classificações possíveis de problemas diferentes (KIRSCH, 1993, p.8), que incluem as seguintes áreas:

- O tipo matemático das variáveis de projeto: variáveis de projeto contínuas, discretas ou mistas contínuas-discretas.
- O significado físico das variáveis de projeto, descrevendo a topologia, geometria (configuração), propriedades dos materiais ou dimensões da seção transversal dos elementos.
- A filosofia de design: filosofia de design determinística ou baseada em probabilidades.
- Os tipos de modos de falha: escoamento inicial, deflexões excessivas e danos locais em condições de carga de serviço; ou ruptura, colapso e estabilidade geral sob condições de sobrecarga. As restrições correspondentes estão relacionadas às condições elásticas (carga de serviço) e de colapso plástico (sobrecarga).
- O tipo de função objetivo: critério único ou multicritério, que representa custo, peso, desempenho, confiabilidade, entre outros.
- A resposta estrutural: resposta estática ou dinâmica (dependente do tempo), linear ou não linear.

- Tipo de problema: problemas de otimização contínuo (parâmetro distribuído) ou problemas de otimização finitos (parâmetros discretos).
- O método de solução: métodos de otimização numéricos ou analíticos.

O MEF é uma forma de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais. Essa análise matemática consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as propriedades do meio original. Os elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados. A facilidade na resolução de enormes equações algébricas através do MEF foi possível com o uso e evolução dos sistemas computacionais. O MEF tem grande aplicabilidade e eficiência sendo utilizado em diversas áreas das ciências exatas e biológicas e, existem trabalhos com esta metodologia nas diversas especialidades, quando se deseja analisar cargas, tensões ou deslocamentos (LOTTI, 2006).

Segundo Hassani (1999), existem três tipos de métodos de otimização que estão sob o título de OE conforme apresentado na figura 1, são eles: (a) dimensional, (b) forma e (c) otimização de topológica.

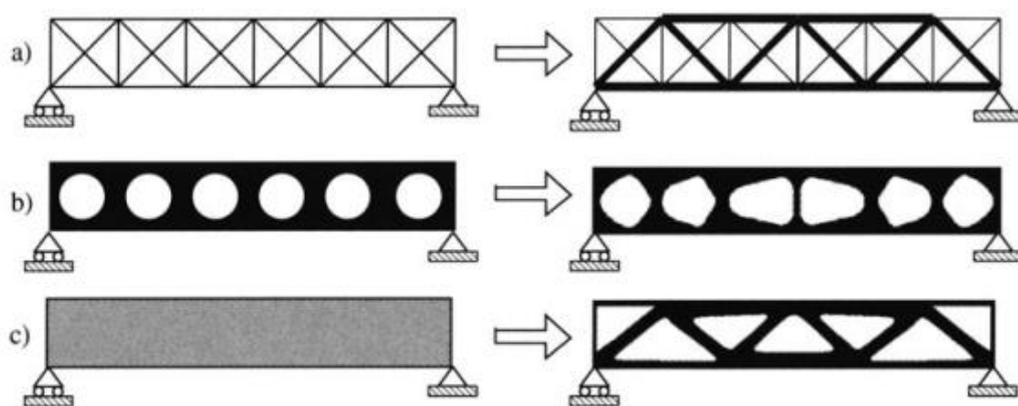


Figura 1 - Categorias de OE com os problemas a esquerda e as soluções ótimas mostradas a direita. a) Otimização dimensional de uma estrutura de treliça, b) otimização de forma e c) otimização topológica. Adaptado de Bendsoe e Sigmund (2004)

2.1.2 Otimização Paramétrica ou Dimensional

Na otimização dimensional o tamanho da estrutura é mantido, modificando-se apenas as dimensões da estrutura. Por exemplo, se fosse utilizada uma viga, seria dimensionado apenas a altura e largura da seção transversal para suportar uma carga, onde seu comprimento e posição seriam conhecidos (QUERIN, 2017).

Segundo Christensen e Klarbring (2009), na otimização dimensional, também conhecida como paramétrica, os valores modificados são de espessura e/ou área de seção transversal, sem modificar a sua forma, conforme apresentado na figura 2.

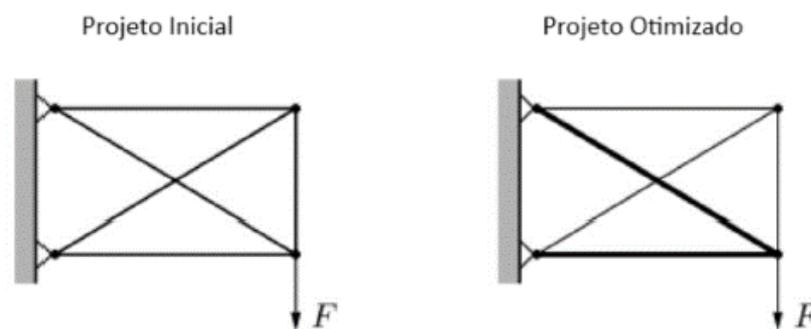


Figura 2 – Otimização dimensional - Adaptado de Christensen e Klarbring (2009)

2.1.3 Otimização de Forma

Na otimização de forma, o contorno ou a forma do limite de um domínio estrutural de uma peça é desconhecido, sendo assim, a forma ou limite pode ser representado por uma equação desconhecida ou por um conjunto de pontos cujos locais são desconhecidos (QUERIN, 2017). Desse modo, segundo Hassani (1999), a incógnita é a forma ou contorno de alguma parte do limite de um domínio estrutural no método de otimização de forma.

De acordo com Christensen e Klarbring (2009), a otimização de forma trabalha na interface da estrutura de maneira a encontrar a solução otimizada, onde a variável do projeto pode ser as coordenadas de contorno de alguma região limite da estrutura ou até mesmo os coeficientes das curvas que representam a forma da peça conforme apresentado na figura 3.

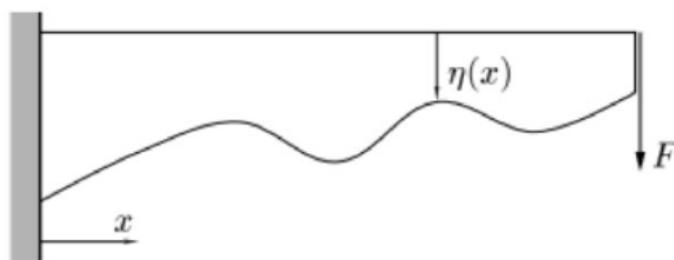


Figura 3 – Otimização de forma - Adaptado de Christensen e Klarbring (2009)

Segundo Haftka e Gürdal (1995), a grande dificuldade da otimização de forma é que com a modificação da geometria da estrutura a cada interação, a malha de elementos finitos fica distorcida, sendo necessária uma nova malha ao longo da otimização, demandando mais tempo.

2.1.4 Otimização Topológica

O método de Otimização Topológica (OT) tem sido objeto de estudo e aplicação em diversos campos da indústria, pois procura descobrir a melhor distribuição de material em uma estrutura, mostrando-se promissora na busca de soluções mais eficientes e econômicas (ROZVANY, 2009). Segundo Christensen e Klarbring (2009), este processo pode ocorrer através da variação de uma determinada função ou critério, maximizando ou minimizando parâmetros, como máxima rigidez e mínimo peso por exemplo, até alcançar o design ideal.

A OT se adapta bem à aplicação de elementos finitos para a análise do sistema, tendo em vista que o domínio permanece fixo, evitando assim, problemas com a discretização do modelo (BENDSOE; SIGMUND, 2004).

A figura 4 apresenta um exemplo de projeto de otimização topológica.

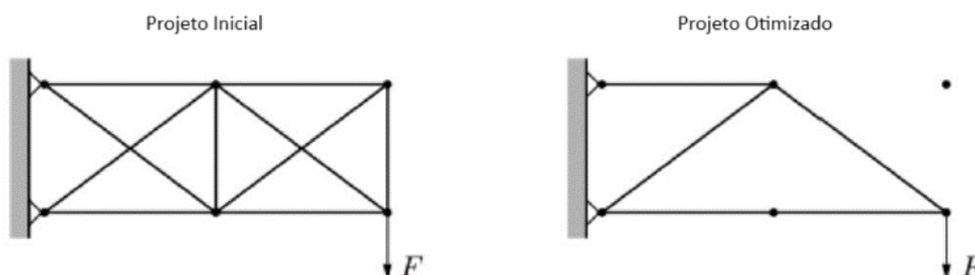


Figura 4 - Otimização topológica - Adaptado de Christensen e Klarbring (2009)

A capacidade de diminuir a quantidade de material em uma peça e ao mesmo tempo manter a integridade estrutural é um objetivo comum dos engenheiros de projeto, devido as muitas vantagens que o design leve possui. A redução de material utilizado numa peça não só economiza recursos financeiros, diminuindo os custos de produção e manutenção, como também melhora o desempenho e a eficiência dos produtos nos quais a peça é utilizada (REZAIE; BADROSSAMAY; GHAIE, 2013).

Um exemplo disso é o setor aeroespacial, visto que, uma aeronave pesando menos, consumirá menos combustível em voo, aumentando assim a eficiência de maneira geral. Para conseguir esses objetivos de design, os projetistas precisam olhar para diferentes tipos de design leve, já que suas aplicações são compostas por três categorias separadas, que abrangem a microscópica, mesoscópica e macroscópica (REINHART; TEUFELHART; OTT; SCHILP 2010).

De acordo com Reinhart e Teufelhart (2011), os procedimentos de design microscópico são atribuídos à remodelação da microestrutura de um material em relação aos requisitos da peça. Já a inclusão de adaptação do acúmulo do material, de forma a implementar estruturas celulares como treliça, espumas, favo de mel e configurações semelhantes, fazem parte da aplicabilidade do design mesoscópico. No segmento macroscópico, as estratégias de projeto buscam aprimorar a geometria da peça em relação às cargas aplicadas.

Segundo Bendsoe e Sigmund (2004), ao analisar o segmento de projeto macroscópico, uma abordagem importante é a otimização da topologia, pois ela visa encontrar o layout ideal de uma estrutura dentro de uma região determinada. Essa determinação se baseia em possíveis condições de suporte, cargas aplicadas, volume da estrutura e, eventualmente, restrições de projeto adicionais, como por exemplo, locais e tamanhos de furos prescritos ou áreas sólidas.

Segundo Bendsoe (1995, p.30), o procedimento padrão de projeto estrutural utilizando o método de otimização topológica deve ser através das seguintes etapas:

1. Domínio Inicial: Definição do domínio de existência da estrutura, limitado pelas condições de contorno da peça e pelos pontos de aplicação de carga. Quanto mais restrições tiverem, menor será a otimização da solução obtida.
2. Domínio Discretizado: São aplicadas as condições de contorno e o MEF.
3. Topologia Obtida: Esta etapa gera uma estrutura que serve como ponto de partida para a obtenção do projeto final, que por meio de um processo iterativo, distribui-se o material no domínio com o intuito de minimizar ou maximizar a função objetivo, onde os elementos pretos representam a presença de material (variável de

projeto = 1) e os elementos brancos representam a ausência de material (variável de projeto = 0).

4. Interpretação: Realiza-se um novo desenho da estrutura baseado na imagem da etapa anterior, ou então por processamento de imagem.
5. Verificação: Realiza-se uma simulação com a peça otimizada utilizando o MEF aplicando-se as condições de contorno e as cargas. Esta etapa é importante para a validação da otimização da estrutura.
6. Produção: A produção da estrutura propriamente dita, levando-se em consideração as técnicas que permitam realizar corretamente a produção da peça.

A figura 5 apresenta as representações visuais do procedimento de otimização topológica descrito acima. Na etapa 3 descrita acima, podemos perceber que existem elementos cinzas, denominados escala de cinza. Eles são inerentes a obtenção da solução ótima e representam materiais intermediários que não podem ser aplicados na prática.

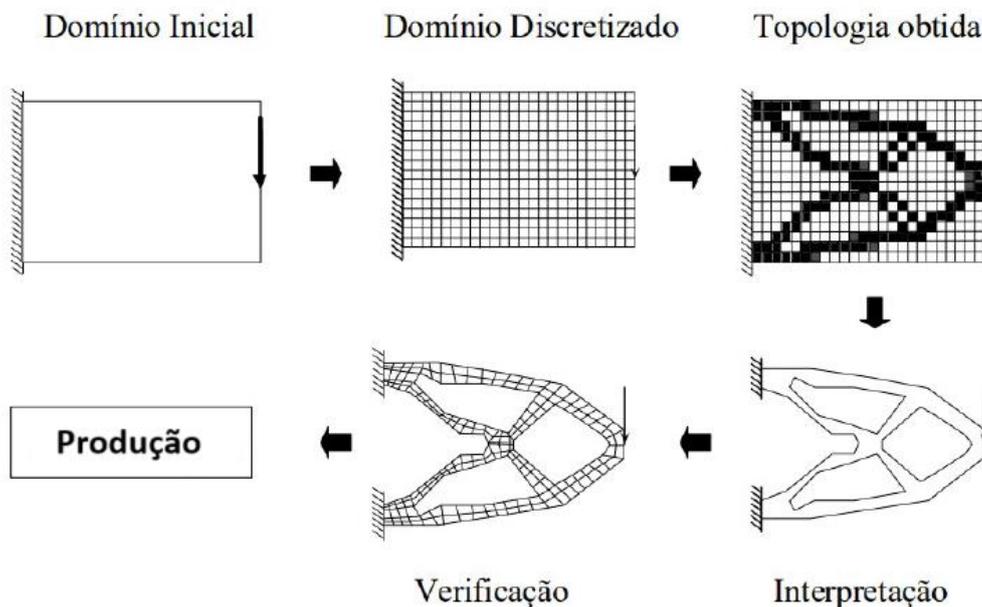


Figura 5 - Procedimento de projeto estrutural utilizando OT – Adaptado de Silva (2002)

As abordagens usuais de OT são realizadas através do MEF. A figura 6 apresenta a aplicação de OT numa prótese craniofacial. Inicialmente o domínio da estrutura é definido (figura 6.a), logo após as condições de contorno são aplicadas (figura 6.b) e, por meio de otimização topológica, é entregue a solução da estrutura (figura 6.c), para posteriormente ser testada e validada na aplicação (figura 6.d).

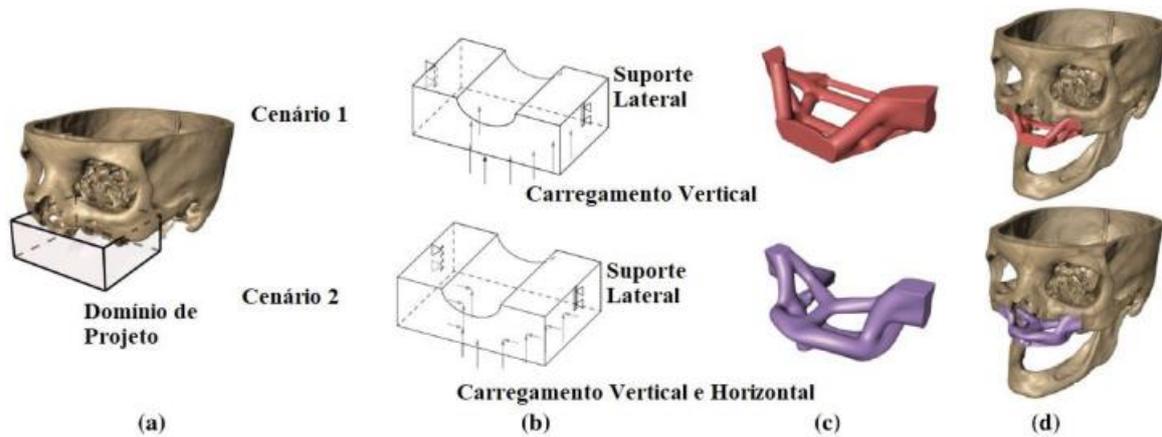


Figura 6 – Processo de otimização topológica de uma prótese craniofacial – Adaptado de Sutradhar, et al (2016)

Existem vários estudos de OT aplicada a projetos de engenharia nos diversos setores da indústria de fabricação. O estudo de Sigmund e Bendsoe (2004) por exemplo, apresenta a aplicação de otimização topológica em nanoescala de componentes de aeronaves. O estudo de Krog, Tucker e Rollema (2002), também mostra a otimização aplicada em projeto de componentes de aeronaves. Poncelet et al. (2005) apresentou um estudo onde a otimização de topologia é usada como uma ferramenta para o desenho industrial, aplicando-a no projeto de luminárias para um espelho de satélite e num dispositivo de iluminação pública.

Diversos estudos de OT também foram realizados na área biomédica. Zhong, et al. (2006) apresentou a otimização relacionada a implantes lombares e ortopédicos, moldando um espaçador lombar através de OT com a finalidade de reduzir o volume em 36%, proporcionando assim, mais estabilidade para a coluna vertebral, aumentando o espaço para o enxerto ósseo e reduzindo a quantidade de material e contribuindo para a redução de custos. No estudo de Shi, et al. (2007), foi apresentada uma concepção através de OT para determinar a melhor forma de um implante dentário com o objetivo de minimizar a concentração de tensão ao redor do mesmo.

Wu et al. (2008) mostraram sua aplicabilidade na indústria biomédica através de um projeto de uma plataforma *Stents* com reservatórios de medicamentos.

A figura 7 apresenta o desenho esquemático da OT de um *Stents* Conor. Em a) mostra a ilustração do *Stent* Conor com configuração aberta, composto por unidades de hastes alveolares unidas por elos flexíveis. (b) Um suporte isolado da unidade de *Stent*, (c) O modelo de bielas sem furos, que foi o domínio de projeto para otimização. (d) O modelo foi mesclado no software OptiStruct.

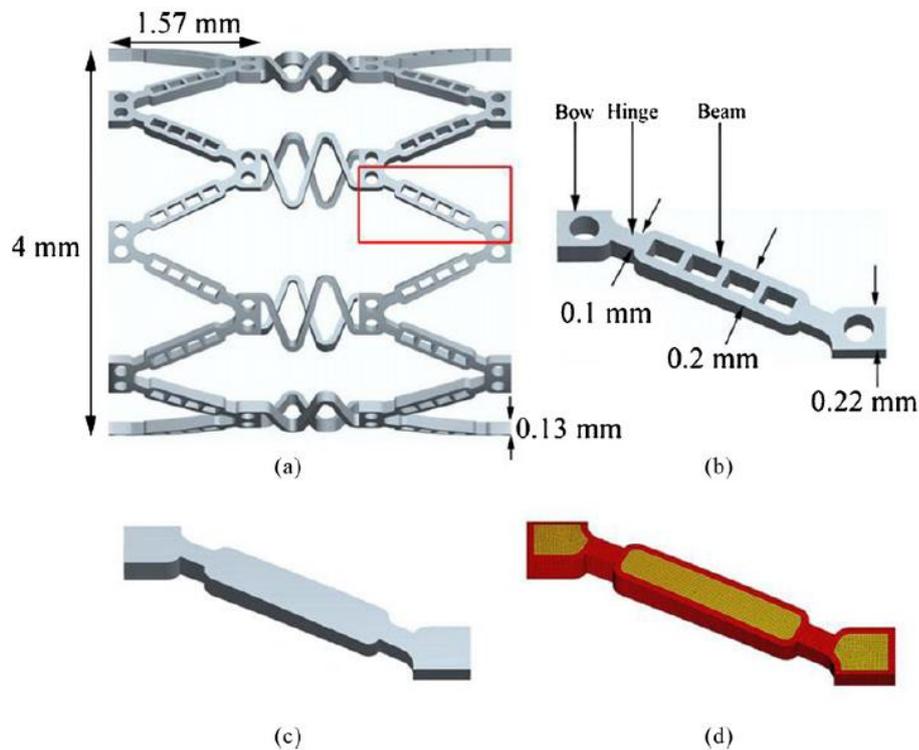


Figura 7 – OT de Stents Conor – Wu (2008)

Kang, et al. (2012) recorreram a OT para produzir macroestruturas de implantes ortopédicos a fim de minimizar as deformações perto da interface osso-implante. Chen, et al. (2013) desenvolveram uma técnica com a otimização com o objetivo de maximizar o contato osso-implante. Pesquisas mostram que além de projetos macroestruturais, a OT aplicada em componentes biomecânicos provou ser uma ferramenta eficiente também para projetos microestruturais que visam regularizar as propriedades mecânicas em aplicações de remodelagem óssea, segundo apresentado em Adachi, et al (2006) e Sturm et al. (2010).

Estes são apenas alguns dos muitos estudos de aplicação de OT em projetos de engenharia. A OT fornece o primeiro conceito de design otimizado de distribuição de materiais estruturais, obtendo assim, maiores economias e melhorias no design do que mera otimização de dimensionamento e forma (SIGMUND, 2000).

Um dos motivos para o crescimento no desenvolvimento da otimização topológica tem sido o aumento da capacidade e da velocidade computacional. Como resultado, tem-se um impacto notável no processo de design, mudando-o do tradicional conceito de design baseado em papel para design digital (QUERIN, 2017, p.93).

2.2. MANUFATURA ADITIVA

A Manufatura Aditiva (MA) consiste na aplicação de tecnologia de impressão 3D capaz de construir um modelo a partir do zero, através do incremento de material camada por camada, trazendo uma economia, pois não há desperdício. E assim faz oposição as metodologias subtrativas de fabricação, que resulta em produção de cavaco, além de se fazer necessário o uso combinado de vários processos de usinagens convencionais e de acabamento na produção de uma única peça de geometria complexa (RODRIGUES, et al, 2017).

2.2.1 Processos e aplicações

Com o avanço da tecnologia e a inserção de novos processos, a MA vem mostrando grande potencial nos últimos tempos, abrindo uma infinidade de possibilidades de projetos sem as limitações que a manufatura subtrativa oferece (HERZOG, et al, 2016).

A fabricação de peças através da manufatura aditiva oferece inúmeras vantagens, como liberdade de design que possibilita a fabricação de geometrias complexas, produção de peças personalizadas com reprodução de pequenos lotes e reparos, conforme as necessidades e exigências específicas. A MA possibilita a otimização geométrica de peças garantindo uma redução de massa, além da diminuição de tempo de ciclo entre a produção do modelo virtual e fabricação do modelo físico, gera menos resíduos de produção, o que garantem assim a eficiência de materiais, redução de energia, e dessa forma, diminuição de custos. Essa tecnologia vem sendo aderida por crescente números de setores como: defesa, aeroespacial, biomedicina e automotivo (ZHAI; LADOS; LAGOY, 2014).

Na engenharia, devido as diferenças nas propriedades físicas/químicas que influenciam os processos de fabricação, a produção de objetos envolve três categorias de materiais que são os metais, cerâmicas e polímeros. Uma quarta categoria chamada compósitos, abrange a mistura não homogênea das outras três categorias (GROOVER, 2010, p.7).

As tecnologias de MA são classificadas em quatro categorias conforme o tipo de matéria prima utilizada que pode ser: líquido, filamento, pó, e placa sólida conforme apresentado na tabela 1 (GUO e LEU, 2013).

Tabela 1 - Técnicas de Manufatura Aditiva - Adaptado de Guo e Leu (2013)

Estado da matéria	Processo	Material	Princípio	Aplicações
Líquido	Estereolitografia (SLA)	Polímeros fotossensíveis	Produção de peças de polímero a partir da solidificação assistida por laser	Protótipos, moldes
	Modelagem Multijato (MJM)	Acrílico fotossensível, plástico e cera	Produção de peças a partir da solidificação do material depositado por flash de iluminação ultravioleta (UV)	
Filamento/Pasta	Modelagem de Deposição Fundida (FDM)	Termoplásticos	Produção de peças por extrusão do plástico por bico em uma base	Protótipos, moldes
	Robocasting	Pasta cerâmica	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica	Objetos cerâmicos
	Fabricação por Extrusão Congelada (FEF)	Pasta cerâmica e água	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica aquosa	
Pó	Sinterização Seletiva a Laser (SLS)	<i>Alumide; Carbon Fibre PA 1101; PA2200/2201; PA 2221; PA2202; PA 2210; PA3200; PAEK; Polyestyrene</i>	Produção de peças por meio do processo de sinterização de camadas de pó	Protótipos, peças aeronáuticas, peças automotivas, peças especiais, para indústria, moldes
	Fusão seletiva a laser (SLM)	<i>Stainless steel 316L e 17-4PHH13 tool steel; Aluminium Al-Si-12 e Al-Si-10; Titanium CP, Ti-6Al-4V e Ti-4Al-7Nb; Cobalt-chrome ASTM75; Inconel 718 e 625</i>	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por laser	Implantes médicos, peças aeronáuticas, peças automotivas, trocadores de calor, peças especiais para indústria, moldes

Continuação da Tabela 1 - Técnicas de Manufatura Aditiva - Adaptado de Guo e Leu (2013)

Pó	Fusão de Feixe de Elétrons (EBM)	<i>Cobalt-chrome</i> ASTM F75; <i>Titanium</i> Ti-6Al-4V, Grade 2	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por arco elétrico	Implantes médicos, peças aeronáuticas, peças automotivas
	Deposição de Metal a Laser (LMD) / Moldagem de rede projetada a laser (LENS) / Deposição Direta de Metal (DMD)	<i>Aluminium</i> Al-Si-10Mg; <i>Cobalt-chrome</i> MP1 e SP2; <i>Maraging Steel</i> ; <i>Inconel</i> 718 e 625; <i>Stainless steel</i> 17-4PH e 15-5PH; <i>Titanium</i> Ti-6Al-4V	Produção de peças por fusão completa de pó metal	Implantes médicos, peças aeronáuticas, peças automotivas, trocaadores de calor, peças especiais para indústria, moldes
	Impressão 3D (3DP)	Polímeros, metais, cerâmica e outros pós	Produção de peça pela deposição de pó sobre uma base, unido seletivamente através da injeção de aglutinante	Protótipos, moldes, ferramental para indústria
Placa sólida	Fabricação de Objetos Laminados (LOM)	Papel, plástico e metal	Produção de peças pela união de uma camada de material laminado a uma série de outras lâminas conformadas	Protótipos, moldes

A norma ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM, 2015) classifica o método de produção de componentes por MA em sete categorias: Jateamento de Aglutinante (BJ), Deposição por Energia Direta (DED), Extrusão de Material (ME), Jateamento de Material (MJ), Fusão de Leito em Pó (PBF), Laminação em Folha (SL) e Cuba de Fotopolimerização (VP), conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2 - Tecnologias de MA. - ISO/ASTM 52900:2015

Processo	Definição
Jateamento de Aglutinante (BJ)	Líquido aglutinante é depositado seletivamente para unir partículas de pó
Deposição por Energia Direta (DED)	A energia térmica concentrada é usada para fundir camadas de materiais à medida que são depositados
Extrusão de Material (ME)	Material é distribuído de forma seletiva através de bico ou orifício
Jateamento de Material (MJ)	Gotículas de material de construção são depositadas seletivamente
Fusão de Leito em Pó (PBF)	A energia térmica funde seletivamente partículas de um leito em pó
Laminação em Folha (SL)	Folhas metálicas são unidas para formar uma peça
Fotopolimerização de Cuba (VP)	Fotopolímero líquido depositado em uma cuba é curado de forma seletiva através de polimerização ativada por luz.

A MA é largamente utilizada na indústria de energia, aeroespacial, automotiva e médica na produção de produtos de alto desempenho (KRUEGER, 2017). Esses processos podem criar um número significativo de peças em um espaço reduzido de tempo, pois as peças são criadas num único procedimento sem a necessidade de montagens. As peças também são moldadas diretamente do material de alimentação, eliminando assim os processos de fabricação tradicionais como fundição, forjamento ou extrusão, minimizando assim a geração de resíduos, onde a matéria-prima não utilizada pode ser reutilizada, o que torna o processo de MA flexível e econômico (CHOWDHURY, et al, 2022).

2.2.2 Jateamento de Aglutinante

Jateamento de Aglutinante foi criado no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) com nome de impressão tridimensional (3DP), o jato de encadernação utiliza como matéria prima partículas de pó e aglomerados de líquido aglutinante para fabricação de um objeto. Essa impressão em leito de pó utiliza a maior parte do material do pó que se encontra no próprio leito e apenas uma pequena parte é entregue através do bico de impressão, ou seja, a cada camada impressa, o leito desce e uma nova camada de pó é dispersa sobre o mesmo, sendo repetido até que o objeto esteja pronto, ficando no leito após a sua conclusão. O pós-processamento consiste em retirar o objeto do leito removendo o pó não aderido com a utilização de ar pressurizado. A ExOne e ZCorp são exemplos de empresas que licenciaram essa tecnologia e obtém sucesso desenvolvendo máquinas de impressão (GIBSON, et al, 2015, p.205). Na figura 8, é mostrado o exemplo de um protótipo fabricado pela empresa de manufatura aditiva ExOne.

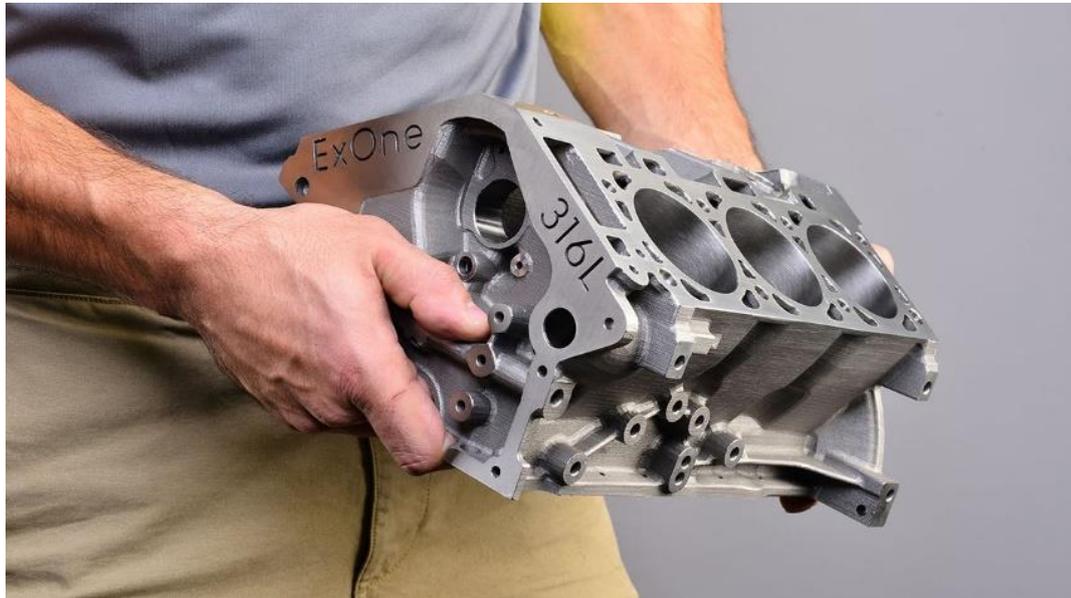


Figura 8 - Protótipo de um bloco do motor de aço inox 316L (ExOne, 2021)

2.2.3 Fotopolimerização de Cuba

O processo de MA conhecido como Fotopolimerização de Cuba (VP) possui três categorias que são a Estereografia (SLA), o Processamento Digital de Luz (DLP), e a mais atual chamada Produção de Interface Líquida Contínua (CLIP). A principal diferença entre elas é a forma de cura, sendo utilizado o laser para a SLA, projeção para DLP e LED para CLIP. Esses processos dependem de cubas cheias de fotopolímeros líquidos que são curados seletivamente pela luz UV. A reação química na qual a resina endurece sob a influência da luz ultravioleta é chamada de fotopolimerização. Após a cura de uma camada do modelo, a plataforma de construção é elevada ou abaixada, dependendo do equipamento, e uma nova camada de resina é espalhada sobre a camada anterior e o processo se repete criando uma nova camada, e ao mesmo tempo fixando-a a anterior (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015).

A MA através de VP é capaz de produzir peças de excelente qualidade e alta resolução. Os avanços mais recentes nas resinas possibilitam a fabricação de peças com perfeita clareza óptica, permitindo assim, que a peça se torne transparente após o polimento. Ao término da peça, os suportes de apoio devem ser removidos e a peça levada ao procedimento de pós-cura em um forno UV para solidificar completamente o material. O custo desse processo é elevado, possui pouca variedade de materiais e o processo de cura é complicado, sendo mais indicado para produção de peças menores (DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2019).

2.2.4 Modelagem de Deposição Fundida (Extrusão de Material)

O método de MA por extrusão de material foi desenvolvido pela empresa Stratasys em 1989, e conhecido como Modelagem de Deposição Fundida (FDM). O nome refere-se ao material utilizado na impressão, ou seja, um filamento plástico que precisa ser fundido para obter a peça. É a técnica mais utilizada, pois é simplificada e com baixo custo, porém não permite muitos detalhes na peça e dependendo geometria é necessário a utilização de suporte (MOREIRA, 2016).

No FDM, O material é aquecido até atingir seu ponto de fusão e depositado em locais específicos, através de um bico contido na extrusora que se movimenta sobre a mesa de impressão. Após a deposição, o material fundido esfria e solidifica. Depois que uma camada é concluída, a plataforma de construção é abaixada uma fração de milímetro e o processo se repete. A cabeça de impressão pode possuir um segundo bocal, que deposita estruturas de suporte para formar camadas sobressalentes (DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2019). Em alguns equipamentos, a plataforma de construção se mantém fixa durante o processo e o cabeçote de extrusão se move para cima. A figura 9 apresenta o processo esquematizado de um equipamento FDM.

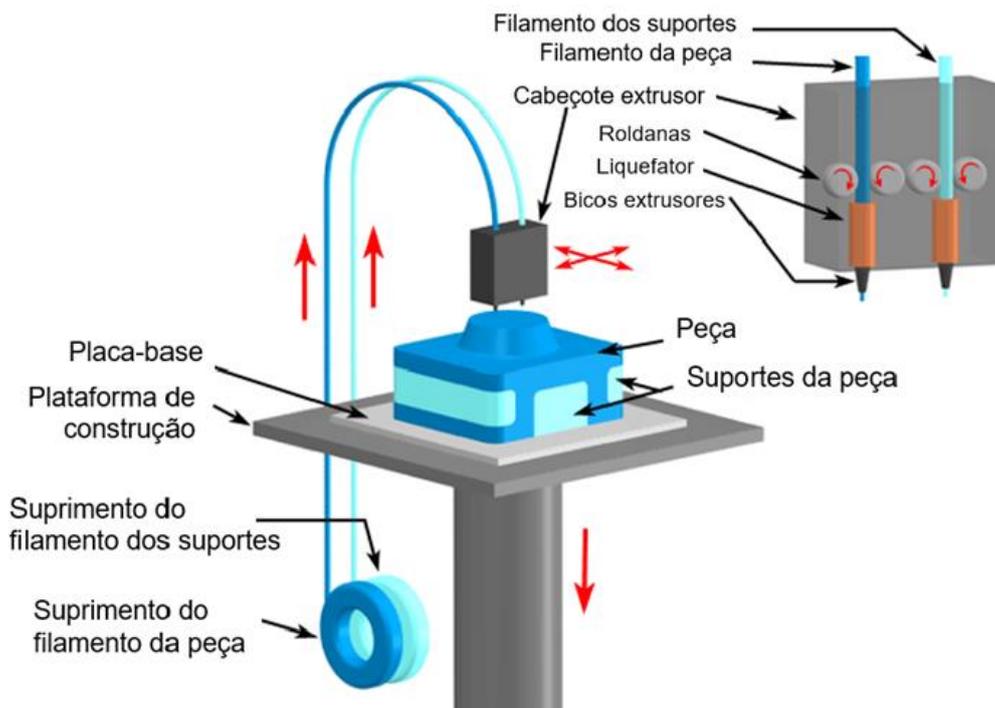


Figura 9 – Equipamento de FDM – Adaptado de CustomPartNet (2022)

O material do filamento deve ter propriedades mecânicas que não causem torção antes de entrar no cabeçote de impressão. Precisa passar pelo cabeçote extrusor em estado pastoso em fluxo constante, solidificar e aderir imediatamente à plataforma de construção e às camadas já depositadas (VOLPATO et al., 2017). As vantagens do FDM estão relacionadas a utilização de filamentos de polímeros termoplásticos, que não são tóxicos, apresentam uma ampla gama de cores e tipos, tornando o equipamento simples e de custo relativamente baixo (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2016).

As peças produzidas pelo FDM são química e mecanicamente estáveis e prontas para utilização, além de não precisar de pós-cura. Porém, algumas peças podem precisar de pós-processamento como acabamento superficial e também remoção de rebarbas e estruturas de suporte. O material dos suportes normalmente é mais frágil que o da peça, o que facilita a sua remoção de forma manual na finalização do processo (VOLPATO, 2007). A figura 10 apresenta o esquema de estruturas de suporte de uma peça a ser impressa no processo FDM.



Figura 10 - Exemplo da utilização de estruturas de suporte – Adaptado de Volpato (2007)

2.2.5 Jateamento de Material

O processo de MA conhecido como Jateamento de Material (MJ) é um método de impressão 3D no qual gotículas de material são colocadas seletivamente em uma placa e depois curadas. Esse método é baseado em fotopolímeros ou gotículas de cera que endurecem quando expostas à luz para criar uma camada de cada vez da peça. Esta técnica permite fabricar estruturas de suporte em diversos materiais dependendo do objeto que está sendo fabricado, sendo assim diferentes materiais podem ser impressos na mesma peça (DELGADO CAMACHO et al., 2018).

O cabeçote de impressão deposita diversas gotículas de fotopolímero líquido na plataforma de construção, que depois são curadas através de uma fonte de luz UV. Dessa forma, uma camada é criada, a plataforma de construção então desce uma camada e o processo se repete até a finalização da peça. É possível imprimir com diferentes materiais e cores em uma mesma peça, devido à possibilidade de ter múltiplos cabeçotes de impressão e assim, depositar material em toda a superfície de impressão numa mesma trajetória. Os objetos criados a partir desse processo são suscetíveis a decomposição se desprotegidas e expostas à luz UV ambiente. (DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2019; VAROTISIS, 2022). A figura 11 apresenta o processo esquematizado de um equipamento de Jateamento de Material.

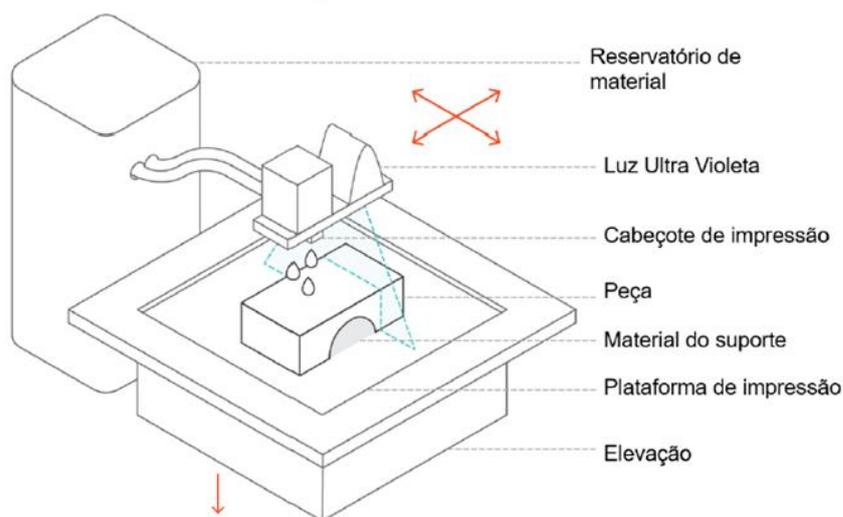


Figura 11 – Equipamento de Jateamento de Material – Adptado de Varotsis (2022)

2.2.6 Laminação em Folha

Criado em 1991, o processo de Laminação em Folha encontra visibilidade na fabricação de peças utilizando folhas de metal, onde através da soldagem ultrassônica que envolve características de ligação de estado, é realizado a união das folhas permitindo a criação de objetos que podem ser utilizados em uma gama de aplicações. A ordem em que se une e corta a folha pode variar nesses processos, em alguns o laminado é primeiro cortado e depois ligado ao substrato, noutros é ligado primeiro ao substrato e então formado na forma de seção transversal (GIBSON, et al, 2015, p.219). A figura 12 representa uma máquina MA de SL.

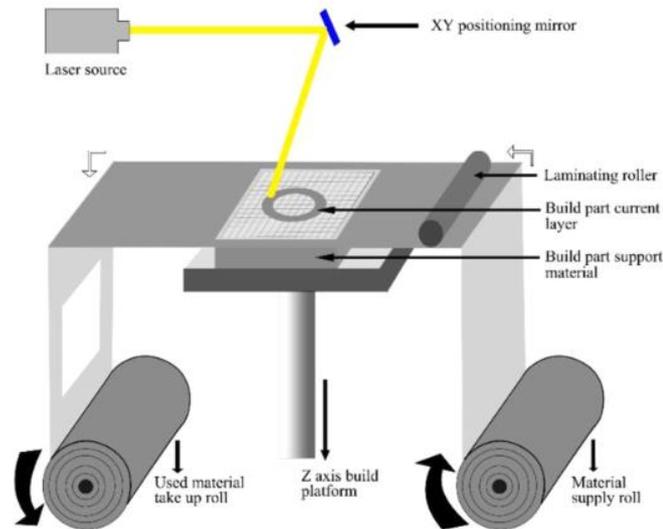


Figura 12 - Layout de uma máquina de laminação em folha (WANG, 2019)

Através da técnica de Fabricação Aditiva Ultrassônica (UAM) ou Ultrassônica de Consolidação (UC), que são as mais usadas, ondas ultrassônicas e pressão mecânica são aplicadas em pilhas de chapas metálicas em temperatura ambiente, e suas interfaces de folhas empilhadas são unidas por difusão em vez de fusão. Essas folhas empilhadas, são unidas camada por camada até formar a peça tridimensional projetada, sem utilizar qualquer força de atrito como fonte de calor. As chapas são frequentemente cortadas, antes da colagem UC, conforme a geometria projetada e o polimento tradicional é opcionalmente aplicado durante ou após o processo de consolidação para obter um acabamento detalhado. A figura 13 apresenta o processo de trabalho do equipamento UAM, onde, as chapas metálicas são dispostas e empilhadas sobre uma placa da base. Um sonotrodo controlado digitalmente que tem a função de fornecer energia vibratória e pressão ultrassônica, se move ao longo da direção de rolamento. Uma nova chapa metálica é ligada com as estruturas construídas anteriormente por causa da alta frequência de vibração do sonotrodo. Durante este processo, a temperatura consolidada na região aumenta devido ao calor friccional nas interfaces ligadas, e assim, para evitar calor residual, existe um curto período de tempo de resfriamento entre a fabricação de cada camada. Após a construção de todas as camadas, o produto é cortado da placa de base e depois polido para melhorar o acabamento da superfície (ZHANG, 2018).

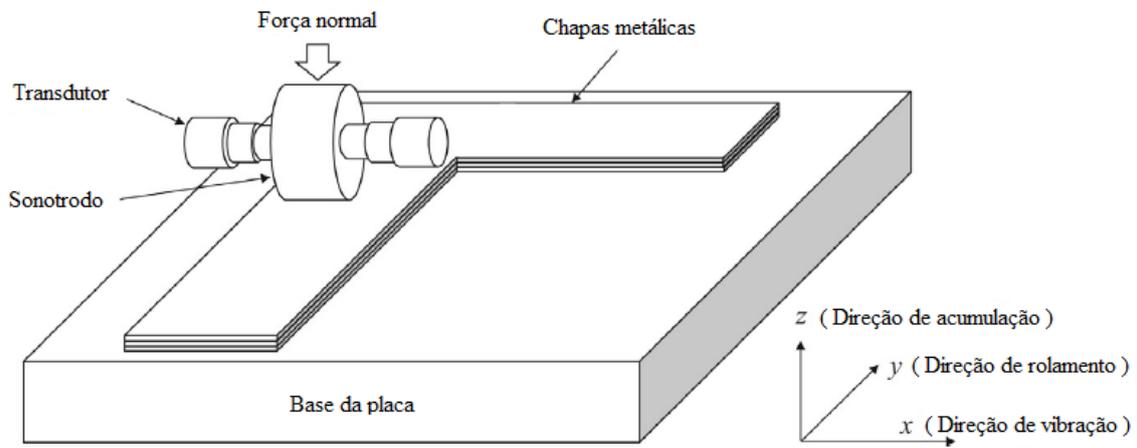


Figura 13 - Esquema do processo de fabricação de aditivo ultrassônico (Adaptado de ZHANG, 2018)

Nesse processo (SL), por ser parcialmente subtrativo, a laminação da folha normalmente não é capaz de produzir a mesma complexidade geométrica que outros processos de impressão 3D, pois não é possível acessar partes internas de um objeto, além de não ser possível remover excesso de material de dentro de um objeto (MOLITCH-HOU, 2018).

2.2.7 Deposição por Energia Direta

É o método de MA conhecido como Deposição por Energia Direta (DED) e normalmente é realizado por um braço que funde através de um bocal o material metálico, que pode ser pó ou fio de metal, depositando simultaneamente sobre uma superfície (GIBSON, et al, 2015, p.35). Diferente das técnicas de fusão em leito de pó, nesse processo, o material é fundido à medida que é depositado. Uma fonte de calor focada que pode ser um laser ou feixe de elétrons é utilizada e cada passagem da cabeça cria uma trilha de material solidificado com linhas adjacentes que formam camadas construindo assim objetos tridimensionais. Devido a geometria complexa dos objetos normalmente é utilizado um braço multi-eixo para suporte do cabeçote de deposição (GIBSON, et al, 2015, p.205). A figura 14 apresenta um exemplo de MA de um tubo sem suporte utilizando esse processo com um braço de 6 eixos.

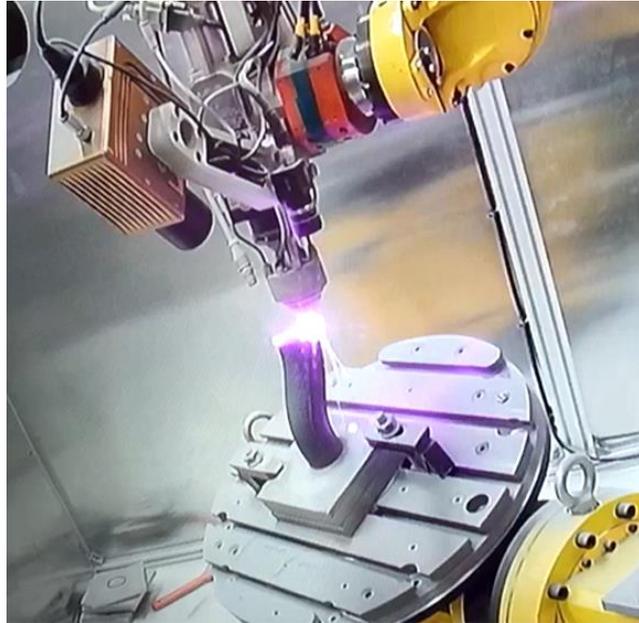


Figura 14 - MA de uma peça pelo processo de deposição por energia direta (METALAM, 2022)

O processo de MA de deposição por energia direta permite aplicações em diversas áreas, onde a fabricação e reparação de peças de metal grandes e de alto valor é uma prática comum na indústria. Esse processo pode reparar estruturas e adicionar material durante a restauração, minimizando futuras erosões ou danos. Assim, a peça é analisada nas áreas dos danos ou desgastes, e após, um material resistente e compatível com a liga base é depositado. Em alguns casos, o tratamento térmico desse processo é utilizado para reduzir tensões residuais devido às rápidas taxas de resfriamento e altos gradientes térmicos. A figura 15 apresenta o bocal de foguete RS25 da NASA em meia escala, com características internas, construído em 30 dias através do processo (DED) para reduzir custos e prazos de entrega (SVETLIZKY, et al, 2021).



Figura 15 - Um bocal de foguete fabricado no processo DED para aplicações aeroespaciais (GRADL, 2021)

Outro método de manufatura aditiva por DED é o *Electron Beam Freeform Fabrication* (EBF3), esse sistema usa um filamento de fio de metal em vez de injeção de pó. Com o laser ou feixe de elétrons, a extremidade frontal do fio de metal é derretida e pulverizada seletivamente no topo do substrato, adicionando camada para formar a peça, sendo amplamente utilizado na indústria aeroespacial (ZHANG, 2018).

2.2.8 Fusão de Leito em Pó

Fusão de Leito em Pó foi criado nos Estados Unidos, na universidade do Texas. Os processos de Fusão em Leito de Pó (PBF) foram os primeiros meios de MA a serem comercializados. Utilizam uma ou mais fontes térmicas, normalmente laser, para induzir fusão entre partículas de pó, um controlador que monitora a fusão do pó a uma região definida em cada camada, e diversos mecanismos que servem para acrescentar e suavizar camadas de pó; características fundamentais que são compartilhadas com todos os processos de fusão em leito de pó. Os processos que utilizam máquinas de Sinterização a Laser (LS) foram inicialmente desenvolvidos para a criação de protótipos de polímero através da técnica de varredura a laser pontual, sendo posteriormente estendida para materiais metálicos e cerâmicos (GIBSON, et al, 2015, p.107). A figura 16 apresenta a ação do laser (LPBF) na fusão do pó metálico.



Figura 16 - Impressora de fusão em leito de pó da GE Additive (ALL3DP, 2022)

No processo de MA de metais, a taxa de deposição, a complexidade da peça, o volume máximo, a necessidade de pós processamento e as propriedades mecânicas finais são aspectos importantes a serem levados em consideração. Garcia-Colomo et al. (2019) produziram um estudo que pode ser observado na figura 17, que compreende quatro tecnologias de MA na fabricação de peças metálicas empregadas na engenharia aeroespacial: Fusão por Feixe de

Elétrons (EBPBF), Fusão de Leito de Pó a Laser (LPBF), Manufatura Aditiva à Arco Elétrico (MADA) e Deposição de Metal a Laser (LMD).

Nesse estudo, foram escolhidos um total de dez parâmetros para serem avaliados em notas de 0 a 10, são eles: complexidade, precisão, acabamento superficial, economias em geral, gasto de material, propriedades mecânicas, necessidade de pós processamento, flexibilidade, máximo volume e taxa de deposição.

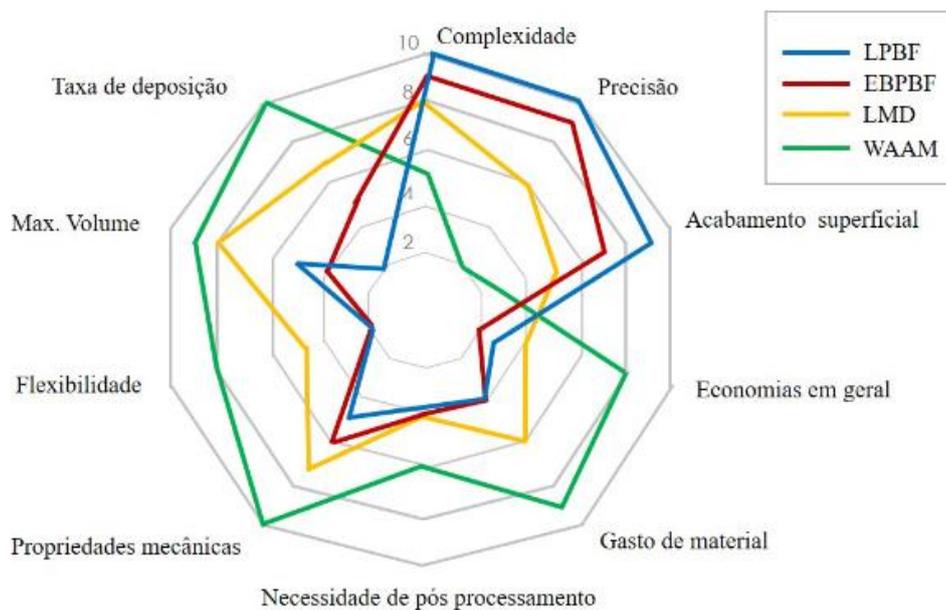


Figura 17 - Comparação entre processos de MA de componentes aeroespaciais - Adaptado de Garcia-Colomo et al. (2019)

2.2.9 Vantagens e Desvantagens

A diversidade de aplicações de MA na estrutura produtiva torna primordial o debate sobre suas vantagens e limitações. A evolução do design está diretamente relacionada a capacidade de produção. Diante disso, essa será uma característica a ser apresentada.

Objetos produzidos por MA permitem uma complexidade de forma e design mais aprimorado em relação aos criados por outros métodos. Seções e cortes transversais complexas produzem peças mais funcionais e leves em relação com aquelas produzidas através de MS. A MA permite que os produtos sejam disponibilizados mais depressa, chegando rapidamente ao mercado, tornando viável a redução de estoque de fornecedores. Também traz flexibilidade na fabricação, pois permite a criação de peças diferenciadas com características próprias. Um exemplo dessa aplicabilidade é a área da biomedicina onde cada paciente precisa de uma prótese customizada para o seu corpo.

A fabricação através de MA também é mais rápida, pois não depende de tempo de preparação de máquinas, apresentando redução de tempo e etapas de produção. Sendo assim, proporciona maior produtividade, com uma maior gama de material a ser utilizado, além da diminuição de desperdício de material. Também exibe uma cadeia de suprimentos resumida com produção localizada, promovendo a eliminação de partes obsoletas (BROMBERGER; KELLY, 2017).

Segundo Lettori, et al. (2020), as aplicações que favorecem as vantagens da MA são divididas em cinco categorias:

1. Componentes estruturais em que se objetiva maximizar a rigidez enquanto diminui o peso.
2. Produtos que precisam de uma geometria complexa e específica para otimizar sua aplicação, como aumentar eficiência fluidodinâmica de componentes.
3. Produção de ferramentas rápidas para testes ou para produzir outras peças, como por exemplo moldes.
4. Produtos em que é exigido alta personalização, como em produtos biomédicos, odontológicos dentre outros.
5. Protótipos para realização de testes, avaliar dimensões.

A MA possibilita o incremento de novos materiais para a indústria, onde alguns já inseridos especificamente para este objetivo e outros já existentes, mas não pensado antes para a fabricação. Porém existem obstáculos tecnológicos que precisam ser ultrapassados para uma maior adesão da MA. Uma das insuficiências é a falta de conhecimento sobre design em sua totalidade, ou seja, para aproveitar todo o potencial dessa tecnologia é necessário mudar a maneira de pensar e projetar o design do produto. A habilidade de projetar formas complexas, onde o design do produto precisa ser feito de forma a reduzir peso e material desnecessário, além da inclusão de estruturas orgânicas ou interiores que configuram limitações em processos tradicionais como de fresagens por exemplo, precisam ser apresentados através de treinamentos aos profissionais para o devido aproveitamento das particularidades da MA. Os equipamentos recentes de MA foram criados para protótipos e por isso ainda não resolvem questões de produção em série, sendo aguardada uma nova geração que atenda esse quesito. Há ainda a questão que envolve a segurança digital, pois os equipamentos atuais apresentam vulnerabilidade a ataques cibernéticos e alto risco de pirataria dos desenhos de produtos entre usuários, além da ausência de regulamentação e instruções nesse setor para que se possa testar

e orientar procedimentos (BROMBERGER; KELLY, 2017). A tabela 3 apresenta as limitações da indústria de MA.

Tabela 3 – Limitações da MA – Adaptado de Bromberger e Kelly (2017)

Engenharia e Design	Manufatura	Serviços
Falta de conhecimento sobre design	Altos custos de produção	Falta de especificações na indústria em testar procedimentos
Alto risco de pirataria dos desenhos de produtos entre usuários	Limitações de tamanho	Falta de uma estrutura de regulação
	Limitações na qualidade do produto	Risco de ruptura da cadeia de fornecedores
	Dependência de uma pequena quantidade de fornecedores de máquinas	

As fabricantes de equipamentos de MA enfrentam essas limitações com resultados relevantes, e pelo visto, não serão empecilhos no futuro e no desenvolvimento desse setor da indústria (BROMBERGER; KELLY, 2017). Variados setores da indústria podem se favorecer dessas aplicações de MA. Sendo assim, empresas nos mais diversos segmentos da indústria estão procurando integrar as tecnologias de MA nas suas produções AMFG (2020), Attaran (2017), Bomberger e Kelly (2017), Tofail et al (2018). A tabela 4 apresenta alguns setores e aplicações.

Tabela 4 – MA - Adaptado de Bromberger e Kelly (2017), AMFG (2020), Attaran (2017) e Tofail, et al (2018)

Setor da Indústria	Aplicações
Aeroespacial	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricação de protótipos, componentes de aeronaves, satélites e peças de reposição. • Redução de peso das aeronaves. • Produção de baixos volumes de maneira econômica. • Componentes otimizados como bicos injetores de combustível para turbinas de aviação mais duráveis e mais leves. • Câmara de combustão de motores de foguetes com maior confiabilidade, eficiência e robustez.
Alimentos	<ul style="list-style-type: none"> • Viabilidade de produzir alimentos no espaço, camada por camada. • Chocolates, doces, alimentos planos como biscoitos, massas podem ser utilizados na MA.
Arquitetura e construção	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricação de concreto para construção convencional, de materiais diversos e concretos de alto desempenho. • Fabricação de componentes estruturais diversos, com maior personalização e menores tempos de entrega.
Automotivo	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricação de protótipos e componentes de automóveis com geometrias complexas em menos operações, com isso tem-se maior velocidade no desenvolvimento de produtos. • Redução do peso dos automóveis. • Fabricação de peças de reposição e acessórios diversos. • Otimização de sistemas de refrigeração de carros de alta performance.
Consumo	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricação de roupas, cosméticos, produtos de higiene, acessórios, sapatos, armações de óculos de titânio, de materiais diversos e personalizados. • Melhor resposta ao mercado e tendências atuais, customização em massa facilitada.
Medicina e farmacêutica	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricação de implantes personalizados como aparelhos auditivos, odontológicos e próteses robóticas. • Reconstrução de ossos e partes do corpo. • Fabricação de equipamentos cirúrgicos e correlatos. • Protótipos de órgãos para auxiliar em cirurgias e diagnósticos. • Produção de equipamentos médicos diversos.

2.2.10 Comparações com outros processos de manufatura

O comparativo dos processos de MA com outros já estabelecidos na cadeia de produção merece destaque, isso porque a maioria dos processos de produção habituais apresentam mais de uma etapa de manufatura até a peça finalizada, enquanto que, as peças produzidas por MA necessitam de apenas uma etapa para chegar ao produto final, promovendo uma redução do tempo total de duração da manufatura. Também é importante considerar que todos os outros processos são de MS, que resulta numa quantidade maior de material que sobra e não é aproveitado, o que não ocorre na MA (GEBHARDT; HÖTTER, 2016).

Na tecnologia de Controle Numérico Computacional (CNC), as peças produzidas são homogêneas e com acabamento de alta qualidade, em contrapartida as peças produzidas por MA podem apresentar anisotropias e vazios. As máquinas CNC possuem maior velocidade para remoção de material do que os equipamentos de MA na fabricação, no entanto, o processo de MA é capaz de produzir em uma única etapa, enquanto que no CNC é necessário um tempo para preparação da máquina além de ser um processo de fabricação de múltiplas etapas (GEBHARDT; HÖTTER, 2016).

A MA possui vantagem na produção de peças com alta complexidade geométrica em relação ao CNC. A utilização do CNC numa etapa única de produção esbarra na limitação geométrica, ao contrário do processo MA. Porém, a precisão de ambos os processos é estabelecida conforme as propriedades do material utilizado. Em relação a programação e preparação para fabricação, o processo CNC abrange inúmeras variáveis tais como ângulo, velocidade, posição de aproximação e seleção de ferramentas, porém, os equipamentos de MA mesmo que apresentem algumas opções de pré-configurações precisam de menos tempo de preparo (GEBHARDT; HÖTTER, 2016).

A aquisição da empresa MATERIAL SOLUTIONS LTD pela Siemens AG por exemplo permite um incremento na produção de peças níquel para turbinas a gás, componentes de aço e titânio para sistemas aeroespaciais e automotivos de alta performance através da tecnologia SLM de MA (BROOKS, 2016). A Siemens AG surge como um grande modelo dessas vantagens, sendo capaz de fabricar até 16 turbilhonadores para turbinas através de uma única máquina de MA, reduzindo assim, a complexidade para obtenção desses equipamentos (AMFG, 2020). A figura 18 apresenta os turbilhonadores de turbinas a gás.



Figura 18 – Turbilhonadores produzidos pela Siemens (AMFG, 2020)

A figura 19 apresenta dois combustores de turbina a gás produzidos através de processos diferentes. A figura da esquerda mostra o combustor produzido por meio de manufatura convencional, sendo composto de 13 componentes interligados, 18 soldas e revestimento térmico, sendo necessário um período de 26 semanas para ser fabricado. Na figura da direita é mostrado o mesmo combustor produzido por MA no método PBF, feito numa única peça integrada e com prazo de 3 semanas para ser fabricado (ARC ADVISORY GROUP, 2018).



Figura 19 – Combustores produzidos por manufatura convencional na esquerda e MA na direita (ARC ADVISORY GROUP, 2018)

Outro exemplo são os cabeçotes injetores do foguete Ariane 6 produzidos pela Airbus em parceria com a Safran. O cabeçote injetor de um foguete possui dezenas e até mesmo

centenas de componentes que são fabricados de forma separada e depois montados. Durante a produção do Ariane 6 foi utilizado um modelo de cabeçote de níquel que demandava 248 componentes se fabricado convencionalmente ou um único componente impresso se o mesmo cabeçote fosse produzido através da MA. A tecnologia utilizada na produção foi a SLM que reduziu o tempo de 3 meses para apenas 35 horas indicando uma redução de custos de 50% (AMFG, 2020). A figura 20 apresenta o cabeçote injetor do Ariane 6 produzido por MA.



Figura 20 – Cabeçote injetor produzido por MA (EOS, 2021)

2.2.11 Cadeia Digital de Fabricação por MA

Peças fabricadas por MA envolvem uma sucessão de estágios que vão desde a definição do objeto de forma virtual que pode ser com a utilização de um desenho CAD do objeto a ser criado ou através da reprodução de uma peça existente com a realização de um escaneamento, indo até a sua finalização, com execução do acabamento e colocação para aplicação final. O objeto a ser criado passa por oito etapas conforme Gibson, et al, (2015, p.4):

1. Concepção de um modelo da peça a ser criada em formato virtual, com a utilização de algum software CAD ou escaneamento óptico/laser, com a sua representação em uma superfície sólida em 3D;
2. Conversão do formato de arquivo da peça elaborada para o padrão utilizado nos equipamentos de MA, que em sua maioria faz uso do formato STL, que armazena as informações necessárias para a montagem do objeto camada por camada;

3. Transferência do arquivo STL para o equipamento de MA com verificação quanto a posicionamento, tamanho e orientação;
4. Configuração do equipamento de MA, contendo parâmetros de construção como tempo, espessura da camada, fontes de energia e restrições de material;
5. Construção do objeto com monitoramento superficial do equipamento de MA, na prevenção de falta de material ou falhas de energia e software;
6. Remoção do objeto construído com a devida atenção em relação a temperatura de operação e partes móveis do equipamento de MA;
7. Realização de procedimentos pós processamento, como remoção de resíduos, de rebarbas de material e acabamento em geral do objeto; e
8. Verificação e montagens para aplicação do objeto. Os objetos prontos podem exigir pinturas ou montagens adicionais conforme a sua aplicação planejada.

A Sociedade Americana para Ensaio de Materiais (ASTM) classifica a cadeia de processo que abrangem a MA em dois tipos de categorias segundo a norma ISO/ASTM 17296-2 (ISO ASTM, 2015):

1. Processos de única etapa, onde as propriedades e formas geométricas básicas do objeto são alcançadas em um único procedimento; e
2. Processos de várias etapas, onde o objeto alcança a forma básica projetada em dois ou mais procedimentos, sendo a primeira que normalmente fornece a geometria e a seguinte a consolidação do objeto. Procedimentos adicionais pós-processamento podem ser necessários em todos os processos para chegar ao produto final projetado.

2.3. FERRAMENTAS PARA DESIGN DE MANUFATURA ADITIVA

A MA proporciona liberdades e oportunidades adicionais de design no nível do produto, incluindo consolidação de peças, peças incorporadas e produção direta de montagens, tornando-se um grande aliado na produção de objetos otimizados com topologia de macroestrutura para redução do uso de material e energia. O fluxo de trabalho digital direto e a geometria de forma livre da MA podem ser combinados para fabricar objetos com qualquer grau de customização (THOMPSON, et al, 2016). Ferramentas de software de *Design for Additive Manufacturing*

(DfAM) avançaram exponencialmente nos últimos anos, permitindo a otimização nos projetos de fabricação (NIETO; SÁNCHEZ, 2021).

O design juntamente com o acabamento final, fazem parte de um estágio importante no processo de fabricação, considerando a aplicação desejada, além de suas propriedades mecânicas. Normalmente, em peças mecânicas a propriedade mais importante é sua funcionalidade. Entretanto, em alguns setores cujos itens são sofisticados, como por exemplo os de joias, onde a beleza supera as outras funções. Dessa forma, o design deve ser avaliado a partir de múltiplos ângulos (PAKKANEN, 2018).

O surgimento da OT como uma excelente ferramenta para projetos de estruturas ficou comprovado através da inserção de topologia e outras formas de otimização em softwares de análise estrutural como por exemplo o ABAQUS, ANSYS, FEMtools e MSC NASTRAN. Ferramentas de análise integradas ou com acesso para ferramentas de análise externas como OPTISTRUCT e CATOPO também contribuem para a eficiência da OT (QUERIN, 2017, p.93). A figura 21 apresenta os diversos softwares utilizados no processo de MA por OT.



Figura 21 – Softwares utilizados no processo de MA por OT. (NIETO; SANCHEZ,2021)

3. METODOLOGIA DE PROJETO PARA MANUFATURA ADITIVA

Nesse capítulo é apresentado o processo de projeto para manufatura aditiva proposto no mestrado de Tiago Camargo Alves intitulado “*Proposta de uma sistemática do Projeto para Manufatura Aditiva (DfAM) no contexto de desenvolvimento de produtos*” (Alves, 2021).

Projeto é um processo contínuo com muitas fases interativas. Existem muitos recursos para auxiliar o projetista, entre os quais várias fontes de conhecimento e diversas ferramentas computacionais de projeto (SHIGLEY, 2016, p.4).

Naveiro e Oliveira (2001) destacam que “o processo de projeto inclui uma série de atividades criativas, como planejamento de artefatos, desenvolvimento de produtos, síntese de produtos e resolução de problemas”. Nesse contexto, o Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) pode ser definido como as atividades que visam atender às necessidades do mercado e dos clientes, levando em consideração capacidades tecnológicas, estratégias competitivas e custos, para identificar as especificações do projeto de um produto e a viabilidade de sua produção. Além de atender às restrições de custo e qualidade (ROZENFELD; AMARAL, 2006).

O desenvolvimento de um produto envolve o detalhamento dos componentes e materiais que o compõem, a criação de desenhos técnicos e a definição de detalhes de processos, além de procedimentos de montagem e planilhas de custos. É importante considerar as forças competitivas do mercado e buscar soluções criativas e inovadoras na hora de projetar. Sendo assim, uma das preocupações dos engenheiros é reduzir custos de processo e ao mesmo tempo buscar melhoria de desempenho e qualidade para que os produtos possam ser competitivos no mercado (NUNES, BORGES, 2006). Devido à competitividade do mercado, os PDP precisa ser capaz de atuar de forma dinâmica e flexível em termos de suas habilidades e competências (ROZENFELD; AMARAL, 2006).

Segundo Oliveira, et al, (2015), é possível encontrar em publicações várias propostas de metodologias, e cabe o pesquisador organizar, selecionar ou adaptar aquela que seja mais adequada a sua necessidade. A tabela 5 apresenta de forma simplificada as etapas necessárias ao desenvolvimento de produto.

Tabela 5 – Etapas do desenvolvimento de produto – Adaptado de Borges e Naveiro (1998)

Etapa	Descrição
Especificação do problema	Verificação das necessidades de usuários. Exame das possibilidades de realização
Estruturação do problema	Decomposição do problema geral em subproblemas
Geração de alternativas	Proposição de soluções gerais para o problema proposto inicialmente. Proposição de soluções para os subproblemas identificados anteriormente.
Seleção de alternativa	Uso de metodologias para escolha da alternativa de solução mais adequada para os problemas identificados.
Detalhamento do projeto	Elaboração da documentação final, detalhamento dos componentes, planejamento da produção, entre outros aspectos.

A fim de prever e prevenir quaisquer obstáculos potenciais que possam impedir a entrega do produto ou aumentar os gastos de desenvolvimento, a abordagem “Design for X” (DfX), também conhecida como “Projeto para X”, emprega uma variedade de práticas e técnicas para otimizar o processo de desenvolvimento do produto em razão de alguma particularidade que na aplicação será trocado pelo “X” descrito na técnica. As metodologias DfX procuram alcançar a excelência em função da característica aplicada. Essas metodologias são empregadas durante o desenvolvimento e incorporam procedimentos que servem de base para otimizar aspectos de produtos. As metodologias mais conhecidas de DfX são o projeto para manufatura (DfM) e o projeto para montagem (DfA) (ALVES, 2021). Existem 25 características encontradas em publicações que podem ser otimizadas, algumas delas são apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 – Características DfX – Adaptado de Melo, Merino e Merino (2017)

Nome	Tradução	Sigla
<i>Design for Assembly</i>	Projeto para Montagem	DfA
<i>Design for Cost / Profit</i>	Projeto para Custo	DfC
<i>Design for Environment / Recycling / Disassembly</i>	Projeto para Meio Ambiente, Reciclagem e Descarte	---

Continuação da Tabela 6 - Características DfX – Adaptado de Melo, Merino e Merino (2017)

<i>Design for Inspectability</i>	Projeto para Inspeção	---
<i>Design for Maintainability / Service / Repair</i>	Projeto para Manutenibilidade	---
<i>Design for Manufacturing</i>	Projeto para Manufatura	DfM
<i>Design for Dimensional Control</i>	Projeto para Controle Dimensional	DDS
<i>Design for Quality</i>	Projeto para Qualidade	---
<i>Design for Inspectability</i>	Projeto para Inspeção	---

DfM e DfA estabelecem procedimentos e diretrizes de projeto para implementar a otimização do produto e de seus sistemas de produção para reduzir o tempo e os custos de desenvolvimento, enquanto aumentam o desempenho, a qualidade e o lucro. Dessa forma, são considerados simultaneamente os objetivos do projeto e as restrições de fabricação, como necessidades do usuário e do mercado, materiais, processos, métodos de montagem e desmontagem, requisitos de manutenção etc. (THOMPSON et al., 2016). Atualmente, os métodos DfM e DfA são listados em conjunto, otimizando o projeto com base nas fases de fabricação e montagem.

O projeto faz parte da primeira etapa do processo de fabricação. É uma atividade que começa com esboços de peças e montagens, depois avança para a construção de modelos, onde são criados desenhos de montagens e de peças detalhadas, que são então repassados aos engenheiros de fabricação e montagem, cuja função é otimizar os processos utilizados para criar o produto final. Nesta fase, problemas de fabricação e montagem são frequentemente encontrados e são feitas solicitações de alterações no projeto. Em alguns casos, essas alterações de projeto causam atrasos significativos na entrega do produto final e dessa maneira, quanto mais tarde aparecem no ciclo de projeto e desenvolvimento do produto, mais caros se tornam (BOOTHROYD, 1994).

No DfM, os engenheiros devem adaptar os projetos para eliminar dificuldades de fabricação e minimizar custos. O projeto para manufatura e as tecnologias de MA em conjunto trazem a oportunidade para aproveitar as propriedades únicas dessas aplicações (CHU; GRAF; ROSEN, 2008). Ultimamente, tem havido um aumento do interesse na abordagem DfM para MA como um novo conceito, o DfAM. Mas considere que na realidade esta não é uma abordagem nova e que a DfAM está simplesmente empregando a abordagem DfM para MA, como foi implementado em outros processos de fabricação (ASADOLLAHIYAZDI;

GARDAN; LAFON, 2017). O DfM exige que os projetistas compreendam completamente as restrições de produção impostas pelos métodos de fabricação disponíveis. Algumas dessas restrições são reduzidas através da MA, outras não (YANG; ZHAO, 2015).

As publicações que apresentam metodologias de DfAM podem ser divididas em três grupos. O primeiro grupo representa pesquisadores que buscam estabelecer um método de projeto relacionado a criação de peças utilizando MA desde o início do processo de desenvolvimento. O segundo, inclui trabalhos que visam reduzir limitações de processos, buscando avanços técnicos ou estabelecendo parâmetros de processo otimizados. O terceiro grupo compreende as tarefas que buscam estabelecer diretrizes para o desenvolvimento de peças por MA, focando principalmente no estabelecimento da capacidade de fabricação de uma peça, indicando se ela necessita ou não de algum tipo de redesenho ou ajuste (BOOTH et al., 2017).

O projeto depende das limitações da tecnologia de fabricação disponíveis. Portanto, não faz sentido ter um novo conjunto de tecnologias de fabricação que ofereçam novas capacidades e continuem a considerar soluções de projeto anteriores devido às limitações de outras tecnologias de fabricação (GARCIA-DOMINGUEZ; CLAVER; SEBASTIAN, 2020b). A concretização desses benefícios só poderá ser alcançada se os engenheiros mudarem o seu pensamento do projeto tradicional (que considera a manufatura subtrativa), o que é um desafio mesmo para projetistas experientes. Contrariamente às técnicas tradicionais de fabricação, onde o planejamento do processo é estabelecido, de forma razoável, na MA ainda faltam diretrizes formais e estruturadas para o processo que levem em conta os benefícios e as limitações da MA (DINAR; ROSEN, 2017).

Para utilizar amplamente a MA, os projetistas podem ser orientados pelos prós e contras da implementação desse processo de fabricação para atender às necessidades específicas do projeto e configurar parâmetros do processo, como orientação da peça e necessidades de suporte durante a produção. Algumas metodologias de DfAM permitem que os projetistas reconheçam que o projeto de um componente pode ser modificado para acomodar restrições do processo sem prejudicar a funcionalidade pretendida do projeto. Em outras situações, estabelece parâmetros do processo para atender aos parâmetros do projeto (DINAR; ROSEN, 2017).

3.1. METODOLOGIAS APRESENTADAS NA LITERATURA

O processo de desenvolvimento de um projeto para MA passa por um aglomerado de atividades que se baseiam nas necessidades de mercado, limitações e estratégias empresariais,

sempre com o objetivo de alcançar as especificações do projeto e seu processo de produção (ROZENFELD; AMARAL, 2006). Esse processo faz parte de uma estratégia orientada por produtos e sustentabilidade, que se inicia através da visão de uma oportunidade de mercado e finaliza com a fabricação, comercialização e entrega do produto (ULRICH; EPPINGER, 2011).

A norma ISO/ASTM 52910:2018 padroniza os requisitos, recomendações e diretrizes de projeto para manufatura aditiva. Esta publicação estabelece requisitos, diretrizes de projeto e recomendações para o desenvolvimento de produtos, que são responsáveis em determinar quais considerações de projeto podem ser usadas no desenvolvimento de produtos para aproveitar as capacidades do processo de fabricação aditiva sem especificar os detalhes específicos de cada processo.

A ISO/ASTM 52910:2018 inclui capacidades e limitações de processo, matrizes de decisão que indicam o uso com base nas propriedades do produto, considerações de design baseadas no ambiente de trabalho, sustentabilidade, geometria, propriedades do material e diversas considerações padronizadas que são específicas do processo. Além dessas considerações, foram publicados guias de projeto para pós-processamento, controle de qualidade e métodos de inspeção, bem como seções com precauções e advertências exclusivas para projetistas. O subcomitê F42.02 da ASTM é responsável pelos padrões na área DfAM. Os elementos em desenvolvimento definidos pelo subcomitê são mostrados na tabela 7.

Tabela 7 – Elementos definidos pelo subcomitê ASTM-F42.02 (ASTM, 2018)

Item em desenvolvimento	Definição
WK48549	Formato AMF para modelagem de sólidos: informações de voxel, representações construtivas de geometria sólida e texturização de sólidos
WK62867	Manufatura Aditiva - Princípios gerais - Guia de projeto para processos de extrusão de materiais
WK64190	Projeto para Manufatura Aditiva - Guia de Decisão
WK72938	Manufatura Aditiva - Projeto - Parte 3: Fusão de metais em leito de pó a base de feixe de elétrons
WK73444	Manufatura Aditiva - Projeto - Pós-processamento
WK74006	Manufatura Aditiva - Formatos de dados – Especificação para dados otimizados de imagens médicas

Com a finalidade de projetar componentes leves que possam ser customizados em grandes quantidades e fabricados por MA, Garcia-Dominguez, Claver e Sebastian (2020a) focaram na otimização topológica do volume inicial com base em restrições de projeto e condições contorno, e também na otimização estrutural através de elementos celulares para estabelecer o preenchimento interno e externo, com o objetivo de projetar peças funcionais utilizando a tecnologia FDM como método de fabricação.

A redução da quantidade de material da peça é alcançada através da otimização topológica, seguida do preenchimento interno através da geometria da célula realizado com a otimização estrutural, sendo a casca definida como um modelo de linhas. Por último, a otimização multiobjetivo da montagem em um fluxo de trabalho contínuo. Esse fluxo permite uma metodologia que estabelece cada parte do projeto paramétrico como uma variável ou objetivo em um fluxo contínuo de dados e gera automaticamente a solução mais acertada sem redefinir o modelo em fases intermediárias (GARCIA-DOMINGUEZ; CLAVER; SEBASTIAN, 2020b).

Para definir um processo de otimização contínua, a modelagem do volume inicial é fornecida de forma paramétrica e as otimizações que ocorrem durante o procedimento também são orientadas por parâmetros e metas estabelecidas pelo usuário, garantindo dessa forma, a flexibilidade de processo para acomodar a customização em massa. O processo definido inclui a combinação de três tecnologias: MA, otimização e modelagem paramétrica, aproveitando a maior liberdade geométrica oferecida pela fabricação aditiva e explorando as possibilidades desta tecnologia de produção (GARCIA-DOMINGUEZ; CLAVER; SEBASTIAN, 2020a).

Com base nas necessidades de redução de tempo e custos, melhoria da qualidade e flexibilidade na área de desenvolvimento de produtos, Yang, Tang e Zhao (2015) propuseram um método de desenvolvimento de produtos de MA baseado na integração de componentes. Os autores mostram que a liberdade proporcionada pela fabricação aditiva no formato das peças permite que duas peças sejam combinadas em uma, superando as limitações de projeto baseadas em métodos tradicionais, como moldagem por injeção e usinagem. Além de diminuir o número de peças no produto, reduzindo assim o número de processos, propicia também, uma diminuição no número de fixadores utilizados durante a montagem.

A metodologia de integração de componentes proposta por Yang, Tang e Zhao (2015) resume a adaptação aplicável e a Otimização Estrutural para alcançar melhor utilidade e desempenho em termos de requisitos funcionais e restrições de fabricação. A integração de peças consolidadas por MA é feita de uma perspectiva funcional, permitindo melhor

desempenho e realização de requisitos funcionais, permitindo encontrar melhores soluções de design. Essa metodologia possui cinco condições:

1. Utilização do mesmo material para o nível de montagem, permitindo a consolidação de componentes no processo;
2. Conveniente para diversos domínios de conhecimento. Como exemplo temos cálculos estruturais, transferência de calor, dinâmica estrutural e estética;
3. Inclusão de considerações de projeto, para contornar as dificuldades do processo e para melhorar desempenho da peça;
Baseado no processo de manufatura;
4. Inclusão de considerações de custo, tempo e outros aspectos como consumo de energia, que possibilite obter um design mais econômico.

A figura 22 apresenta a metodologia de integração de componentes.



Figura 22 - Metodologia de processo para consolidação de componentes – Adaptado Yang, Tang e Zhao (2015)

Nesta metodologia, uma especificação de projeto contendo informações sobre requisitos funcionais, requisitos de desempenho e um modelo CAD inicial são fornecidas como entrada

inicial. Posteriormente inicia-se o processo de integração das peças propostas. Na fase de integração funcional são analisadas superfícies funcionais e a combinação destas superfícies define um volume funcional. A partir dessas definições, estabelece-se soluções de projeto que atendam aos requisitos funcionais e de desempenho.

As limitações da metodologia proposta devem-se principalmente à falta de informações na publicação sobre a fase chamada de especificações de projeto. Apenas comentários são fornecidos em relação às etapas da análise funcional. Ao não realizar nenhum trabalho além da integração de peças, esta metodologia também se mostra incompleta, não ajuda durante a fase de projeto detalhado, indicando que restrições de fabricação devem ser aplicadas, apesar de não serem explicadas ou citadas detalhadamente.

Com o propósito direcionado para processos de MA com potencial para desenvolver produtos funcionais, Kumke, Watschke e Vietor (2016) publicaram um estudo com o objetivo de desenvolver um novo método DfAM que integre ferramentas existentes de Projeto de Produto e forneça suporte contínuo para projetistas explorarem potenciais específicos da MA. O estudo é baseado na estrutura padronizada pela norma alemã VDI2221, que é uma das metodologias mais conhecidas para definição do Projeto de Produto e amplamente reconhecida tanto na pesquisa quanto na indústria. Ela define as etapas gerais de um projeto, independente do processo de produção planejado. As publicações relacionadas aos métodos de projeto para MA são classificadas de acordo com a etapa de utilização, ou seja, identificação do problema ou projeto, arquitetura do produto e design detalhado. Sendo assim, a metodologia concebida por Kumke, Watschke e Vietor (2016), determina um processo totalmente interativo com as seguintes etapas:

1. Definição de problema;
2. Listagem de requerimentos;
3. Determinação de funções e estruturas funcionais;
4. Desenvolvimento de concepções;
5. Seleção de concepção;
6. Análise de viabilidade técnica e econômica;
7. Otimização de propriedades específicas do produto;
8. Análise de forma; e
9. Simulação de processo de fabricação.

Na etapa 1, a lista de requisitos do produto é estabelecida através de uma análise realizada como parte do planejamento. A fase de projeto conceitual (etapas 2 e 3) começa com a definição de arquiteturas funcionais baseadas nos requisitos do produto derivados da análise funcional. Na etapa 4, serão desenvolvidas ideias de soluções básicas, com foco no aproveitamento do potencial de projetos de MA. O resultado da fase de projeto conceitual é a definição de um ou mais conceitos de produto. Com base nos modelos conceituais, é desenvolvida a estrutura modular do produto. Este é o primeiro passo da porta de decisão integrando etapas 4 a 6. A divisão em etapas possíveis leva em consideração as restrições gerais de MA. Logo após, verifica-se a viabilidade técnica e econômica.

Durante a fase de definição arquitetônica e projeto detalhado (etapas 7 a 9), a solução de projeto foi concluída. Primeiro, as características específicas do produto são otimizadas. Logo depois, serão aplicados requisitos consistentes com as orientações do DfAM. A fase final contém extensões para simulação, verificação de projeto e análise de capacidade de fabricação. Múltiplas iterações podem ser necessárias para chegar a uma solução de projeto final. A barra lateral à direita da figura 23 apresenta a possibilidade de consolidação de componentes e integração funcional, demonstrando grande potencial para projetos de MA. A barra lateral esquerda presente na figura 23, permite a iteração entre estágios e etapas. Embora o caminho principal sugira um fluxo de processos linear, os relacionados ao projeto atual exigem muita flexibilidade. O fluxo de informações para a barra lateral esquerda contida na figura 23 é ativado durante a entrega em cada etapa. A figura 23 apresenta a metodologia desenvolvida pelos autores Kumke, Watschke e Vietor (2016).

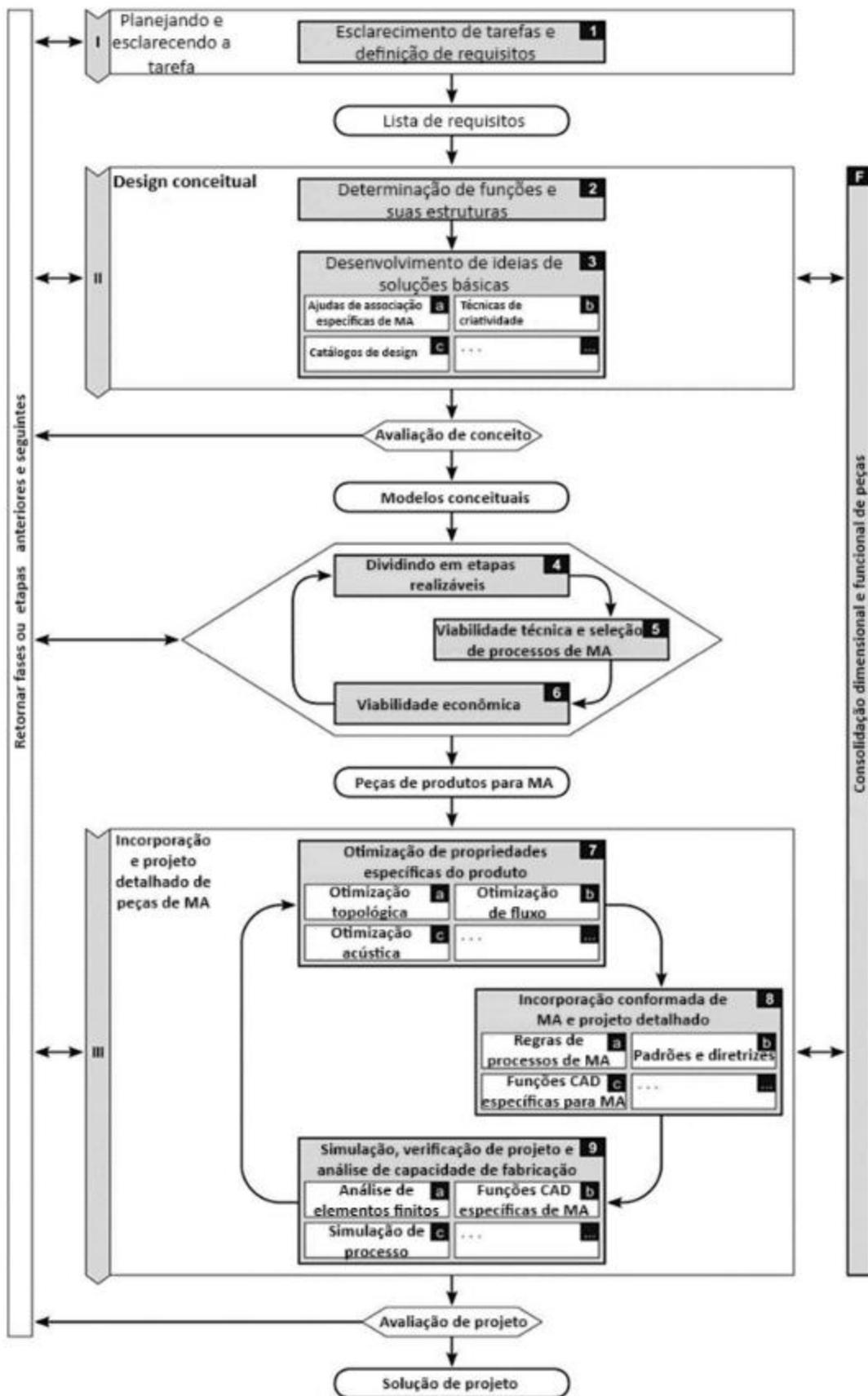


Figura 23 - PDP-MA – Adaptado de Kumke, Watschke e Vietor (2016)

A publicação discute o uso dessa metodologia para diferentes objetivos, níveis de inovação e experiências de usuários na MA, mostrando a complexidade de cada etapa e quais delas devem ser executadas em cada caso. Com o intuito de revisar publicações direcionadas ao DfAM com relação a metodologia, orientação de projetos e software de suporte, Wiberg, Persson e Olvander (2019) publicaram um artigo avaliando os métodos fornecidos nas publicações do setor DfAM e desenvolveram uma metodologia baseada no estado do conhecimento identificada após o processo de revisão.

Nessa revisão, os autores classificaram os métodos em projeto de sistemas, projeto de componentes e processo do projeto, em que a fase de aplicação das diretrizes e métodos de projeto determina a classificação de cada publicação. O projeto do sistema são os métodos pelos quais a decisão é tomada sobre a produção de uma peça por meio de MA ou não, o projeto de componentes são os métodos aplicados para determinar a forma e a complexidade das peças com foco nas características da MA e o projeto de processos são métodos que se concentram em parâmetros de fabricação. A metodologia definida por Wiberg, Persson e Olvander (2019) é exemplificada na figura 24.



Figura 24 - Metodologia de processo de projeto – Adaptado de Wiberg, Persson e Olvander (2019)

Segundo Wiberg, Persson e Olvander (2019), essa metodologia de processo de desenvolvimento de projeto é um esclarecimento dos métodos existentes através de uma comparação com demais processos com o objetivo de inserir todas as etapas que são necessárias para produção de uma peça até a análise da capacidade de MA. As etapas do processo foram exemplificadas através de uma atividade, possibilitando um grau de flexibilização no processo de desenvolvimento de projeto.

Por meio de publicações estudadas, Alves (2021) elaborou uma metodologia de desenvolvimento de produtos para MA a partir da divisão de cinco etapas:

1. Análise de viabilidade;
2. Projeto para funcionalidade;

3. Definições do Processo;
4. Fabricação e Validação de produto; e
5. Análise de Reprodutividade.

A aplicação da metodologia desenvolvida pelo autor é direcionada para a produção de produto. Como a principal contribuição deste estudo se destina ao desenvolvimento de um processo de projeto para MA, serão detalhadas as 3 primeiras etapas, a fim de ilustrar a sistemática que implica na automatização da etapa de projeto conceitual, buscando geometrias otimizadas desde a concepção.

3.2. ANÁLISE DE VIABILIDADE

A metodologia de desenvolvimento apresenta na sua primeira etapa duas tarefas relacionadas à fase de pré-desenvolvimento do produto, responsáveis por determinar o problema e executar estimativas de fabricação da peça ou produto. Essas tarefas se originam da fase de pré-desenvolvimento incorporada nas teorias clássicas de desenvolvimento e devem ser realizadas durante o processo de projeto do produto, independentemente do direcionamento da MA, como um processo de produção. São identificadas como as primeiras atividades do sistema com foco na MA porque nesta fase de desenvolvimento é possível estimar se a mesma será vantajosa na produção do produto.

Segundo Ponche, et al. (2014), a utilização da MA baseia-se na valorização de suas vantagens, pois sua escolha não se justifica em relação aos métodos tradicionais devido ao custo e à produtividade. Essa característica vem da análise da estimativa do produto com base nos principais benefícios de design que ela traz. Sistemicamente, esta etapa será uma adaptação da norma ISO:ASTM 52910:2018 que compreende capacidades, limitações de processo e matrizes de decisão que indicam o uso com base nas propriedades do produto, com modificações identificadas em trabalhos relacionados. A matriz integra a descrição e exemplos de aplicação de cada item que justificam a utilização da MA conforme os fatores apresentados a seguir:

- Customização em massa: O fluxo de trabalho digital da MA e a liberdade de geometria podem ser combinados para fabricar objetos com qualquer grau de personalização.
- Otimização de peso: A MA permite a otimização de peso de peças a partir da liberdade de fabricação de geometrias.

- Complexidade de estruturas internas: O método aditivo de fabricação proporciona a manufatura de canais e estruturas internas que aumentam a funcionalidade e performance de componentes.
- Integração funcional e consolidação de partes: A MA permite que projetistas incorporem partes e reduzam etapas de montagem de componentes.
- Superfícies estruturais: Processos da MA, com resolução em micro ou nanoescala, podem criar superfícies, texturas e porosidades personalizadas.
- Complexidade de materiais: Alguns processos de MA podem produzir peças com diferentes materiais ou propriedades materiais em regiões controladas do objeto.
- Fabricação sob demanda: Devido a cadeia digital de fabricação da MA, componentes podem ser fabricados somente quando necessário, sem restrições para fabricação unitária.

Caso pelo menos uma dessas características do produto a ser desenvolvido não possa ser observada, o projetista deverá optar pelos métodos tradicionais de fabricação. A figura 25 apresenta o fluxograma da etapa de análise de viabilidade da metodologia de desenvolvimento de produtos para MA proposto por Alves (2021).

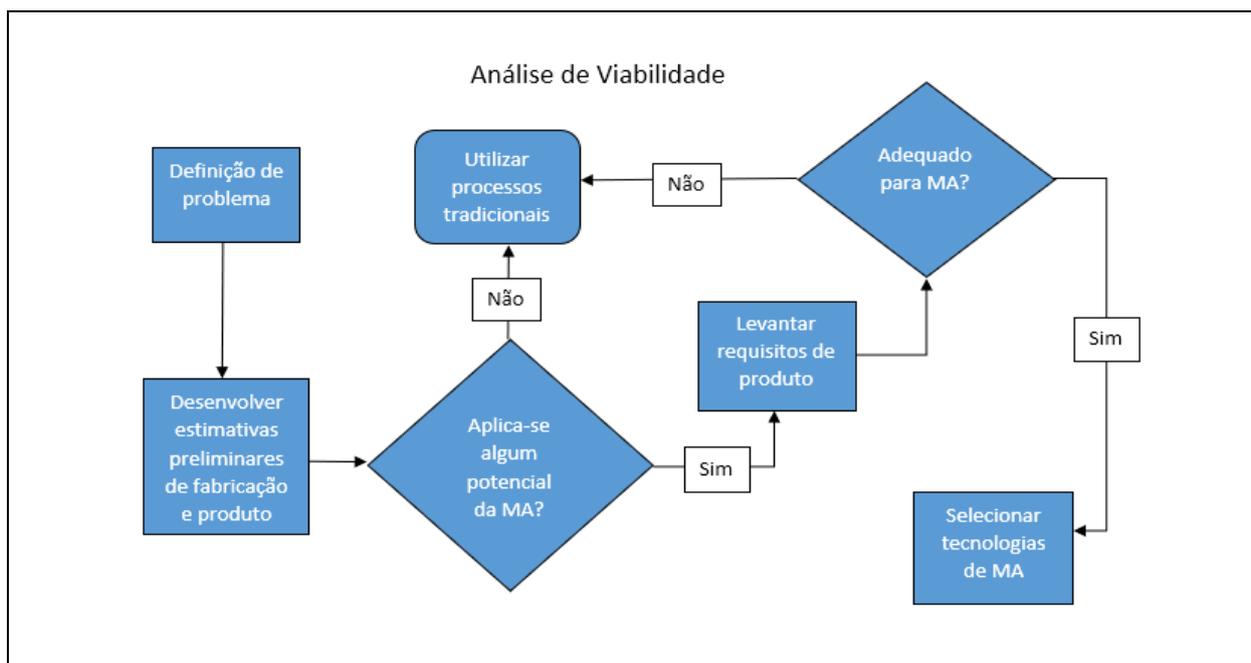


Figura 25 – Fluxograma da etapa de análise de viabilidade do projeto para MA – Adaptado de Alves (2021)

A primeira decisão sendo tomada a favor do uso da MA, então os requisitos do produto relacionados ao problema a ser resolvido precisam ser determinados. Esta atividade demonstra os resultados esperados ao final da fase de design de informação, seguindo teorias de desenvolvimento de produto. As informações sobre as atividades do projeto não mudam devido à adaptação para MA, portanto, não são representadas no sistema além dos requisitos de uso do produto. Coletar os requisitos do produto e estabelecer os valores-alvo dos requisitos é uma etapa fundamental no processo de desenvolvimento do produto. As características identificadas nesta fase orientarão o desenvolvimento futuro.

A segunda tomada de decisão nesta fase diz respeito à viabilidade dos processos de fabricação aditiva para satisfazer os requisitos do produto. Avalia-se se algum processo de MA atende aos requisitos e às especificações alvo. Esta segunda tomada de decisão começa a orientar o desenvolvimento na direção de uma tecnologia de MA específica, uma vez que os requisitos do produto muitas vezes incluem a identificação de possíveis materiais, requisitos de durabilidade, condições de utilização, acabamento, etc.

Os requisitos do produto são especificados para cada projeto de produto através da avaliação das condições de uso e incluem restrições geométricas, requisitos de acabamento, tolerâncias, limitações impostas pelo ambiente de uso e possíveis requisitos de normas. As restrições geométricas referem-se às dimensões máximas e mínimas do produto, podendo ser globais ou aplicadas a contornos e blocos funcionais. Os requisitos de acabamento são expressos por área ou produto que requer controle de rugosidade ou características superficiais específicas. Os requisitos de tolerância aplicam-se a produtos que requerem controle de dispersão de medição e estão envolvidos em etapas de montagem, seja para todo o produto ou para uma área específica. Os requisitos normativos variam dependendo da aplicação do produto. As aplicações podem exigir, por exemplo, limitações na vedação e dimensionamento de fatores de segurança.

Esta segunda tomada de decisão é fortemente influenciada pelo tipo de produto que está sendo desenvolvido. Um passo importante que deve ser dado ao final do processo de teste de viabilidade técnica é reavaliar os custos envolvidos no desenvolvimento e fabricação do produto. A tomada de decisão é a base para determinar o processo de fabricação aditiva que será utilizado para produzir o produto, a estimativa de custos de fabricação pode ser atualizada com base na tecnologia de MA escolhida, considerando que a diferença de custos entre os processos é notável.

3.3. PROJETO PARA FUNCIONALIDADE

A segunda etapa é responsável por orientar a identificação dos conceitos do produto, com base nos requisitos do produto, na análise funcional e nas restrições do processo, que são aqui detalhadas após a seleção das tecnologias de fabricação, feita na atividade final da fase de análise de viabilidade. A figura 26 apresenta o fluxograma da etapa do projeto para funcionalidade da metodologia de desenvolvimento de produtos para MA proposto por Alves (2021).

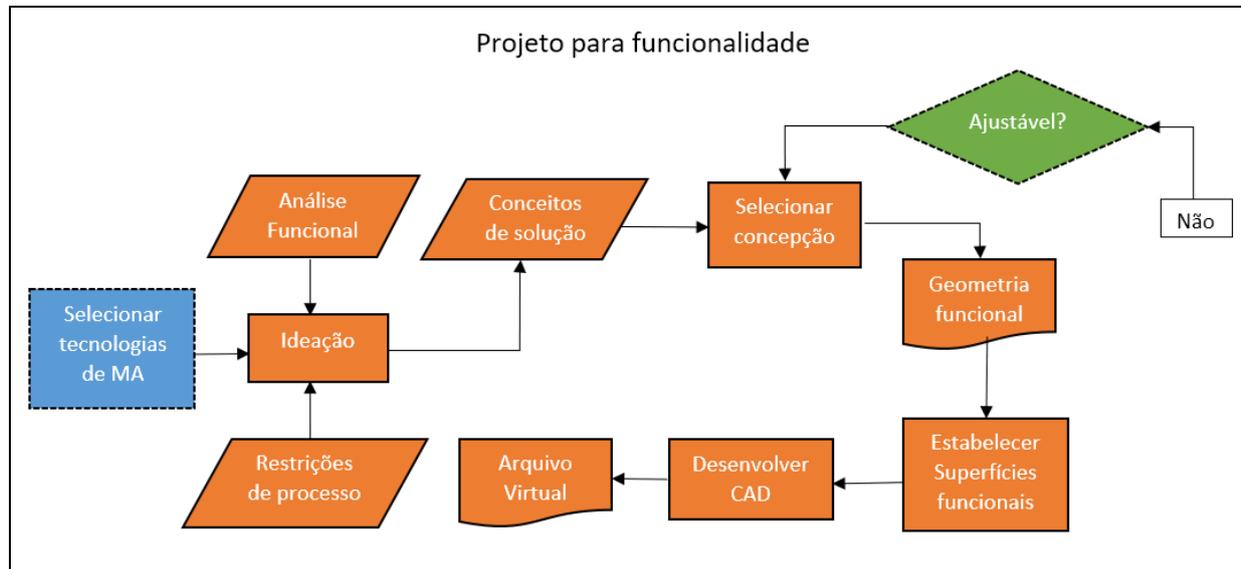


Figura 26 - Fluxograma da etapa de análise de viabilidade do projeto para MA – Adaptado de Alves (2021)

A primeira entrada para a fase de projeto para funcionalidade é a análise funcional. Conforme estabelecido, a análise funcional é representada pela definição do principal atributo do produto, denominado função global, que é então analisada até o nível das funções básicas. Definir a arquitetura funcional do produto ajuda a determinar como o produto funcionará para resolver o problema identificado. Função refere-se ao que foi projetado para fazer, enquanto desempenho refere-se a como a função é executada. Normalmente, os requisitos de desempenho possuem tolerâncias, enquanto os requisitos funcionais não (YANG; TANG; ZHAO, 2015).

A atividade “ideação” (mostrada no fluxograma da figura 30) utiliza um guia de projeto baseado na capacidade do processo para orientar o desenvolvimento de conceitos e, junto com uma análise dos requisitos do produto, define a seleção de concepções para desenvolvimento posterior. A criação de modelos virtuais de todas as concepções ou apenas das selecionadas depende da complexidade do projeto e da capacidade de modelagem do designer.

A fase de ideação é onde prevalece o pensamento divergente. Se a fase de convergência da resolução de problemas é o que nos leva às soluções, então o objetivo do pensamento divergente é multiplicar opções para criar opções. Podem ser diferentes percepções sobre o comportamento do consumidor, diferentes perspectivas sobre o funcionamento de um produto ou escolhas entre diferentes formas de criar experiências interativas. Quando ideias concorrentes são testadas entre si, os resultados tendem a ser mais ousados, mais criativos e mais convincentes. Mais opções significam mais complexidade, o que pode dificultar o desenvolvimento, principalmente pelos custos e prazos.

A tendência natural da maioria das empresas é minimizar os problemas e restringir as opções em favor do óbvio e incremental. Embora esta tendência possa ser mais eficaz a curto prazo, a longo prazo tende a tornar-se uma organização conservadora e inflexível, vulnerável a ideias revolucionárias vindas do exterior. O pensamento diferente é o caminho, não o obstáculo, para a inovação (BROWN; KATZ, 2019).

As ferramentas para ideação são diversas, das quais três são apresentadas e avaliadas na publicação de Daly, et al. (2016), brainstorming, matrizes morfológicas e métodos heurísticos. Identificar as ferramentas para criar uma solução não é o objetivo desse projeto de graduação e, portanto, a fase de ideação será restringida apenas à definição teórica. Outra tarefa que pode ser realizada através de diferentes ferramentas é a seleção de uma concepção, nesse sentido, a mais disseminada é a matriz morfológica. Com base nos requisitos funcionais, a matriz morfológica aplica pontuações aos projetos dos produtos idealizados, com base na pontuação total e tendo em conta o peso relativo da pontuação, será feita a seleção da concepção. Para acomodar a MA, as restrições e requisitos do processo de fabricação devem ser adicionados aos critérios da matriz morfológica.

A concepção escolhida é então analisada para determinar as suas superfícies funcionais e, portanto, os seus volumes funcionais, sabendo que esses volumes são representações do preenchimento das superfícies funcionais. Superfícies funcionais são definidas como regiões ou faces da geometria do produto que executam uma função dentro de uma estrutura funcional definida. Estabelecer requisitos e restrições para áreas funcionais é essencial para garantir que os requisitos do produto sejam atendidos. A seguir, o arquivo virtual do produto deve ser criado. Considere que os processos de MA possuem uma cadeia de fabricação digital a partir da determinação da geometria da peça, obtida através da modelagem em software CAD.

3.4. DEFINIÇÕES DO PROCESSO

A terceira fase está relacionada ao desenvolvimento do processo de fabricação, iniciando através do procedimento de otimização da peça com base no processo de fabricação, estabelecendo diretrizes de seleção de parâmetros, orientando a avaliação do processo antes da produção e determinando a linguagem de programação que deve ser utilizada para enviar informações às máquinas.

O procedimento inicia a partir da aplicação no nível do componente, portanto é necessário decompor o projeto até este nível. Com base na análise de faturação e consolidação dos elementos, são previamente determinados quais componentes serão utilizados no produto. Nesta análise, o conceito de projeto de montagem é utilizado para otimizar o processo de montagem do produto e reduzir custos de fabricação. A definição de modularidade de componentes baseia-se na premissa de que a consolidação dos elementos é sempre desejável em qualquer projeto porque otimiza etapas de montagem e reduz custos. Para realizar esta etapa, utilizamos a ferramenta matriz de indicadores de módulos, que realiza uma avaliação preliminar das funções que podem ser adicionadas e identifica os módulos do produto. A figura 27 apresenta o fluxograma da etapa de definições do processo da metodologia de desenvolvimento de produtos para MA proposto por Alves (2021).

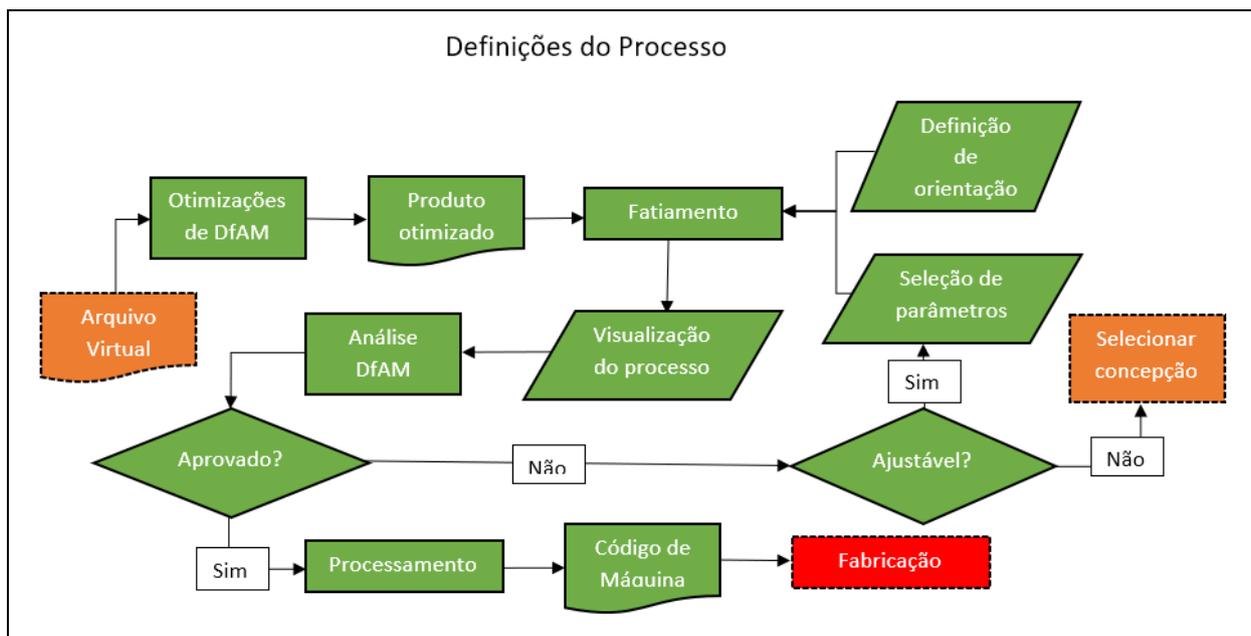


Figura 27 - Fluxograma da etapa de definições do processo do projeto para MA – Adaptado de Alves (2021)

Segundo Yang, Tang e Zhao (2015), não existe uma estrutura clara para alcançar a consolidação de elementos, o grau de sucesso depende em grande parte da experiência do projetista e da sua compreensão dos requisitos funcionais. Portanto, a busca pela multifuncionalidade dos componentes muitas vezes orienta a busca pela composição reduzida de um produto. Os aspectos construtivos da MA permitem que os projetistas explorem possibilidades de projeto mais ambiciosas, como utilizar múltiplos materiais em uma única peça sem a necessidade de montagem (GIBSON et al., 2014).

A consolidação de elementos é a primeira otimização de produto identificada na atividade de otimização de DfAM. Depois de realizar uma análise de redução de componentes, a otimização algorítmica e a análise computacional podem ser realizadas. Essas otimizações são baseadas em CAE e software de programação. Para o desenvolvimento de produtos, a principal ferramenta de apoio à otimização é o MEF. Devido à cadeia de desenvolvimento de modelos virtuais para a MA, os recursos CAD/CAE podem ser amplamente utilizados para análise de modelos virtuais.

Os métodos de otimização buscam melhorar o design de uma peça ajustando os valores das variáveis de projeto para atingir um objetivo desejado, muitas vezes relacionado ao desempenho ou ao peso estrutural, da melhor maneira possível e sem violar restrições (GIBSON, et al. 2014). Em geral, os métodos de otimização estrutural são mais direcionados para objetivos específicos. Os métodos de otimização de projeto estrutural relacionados à MA podem ser classificados de acordo com diferentes objetivos, como otimização de rigidez e resistência, deformação e capacidade de fabricação (YANG; ZHAO, 2015).

Devido à capacidade da MA de criar peças com formas e composições de materiais muito complexas, os projetistas têm se interessado em desenvolver métodos que lhes permitam projetar peças complexas (ROSEN, 2016). Em relação à área de otimização, Yang e Zhao (2015) desenvolvem uma classificação baseada na capacidade de prever o preenchimento das peças, separando os métodos em passivos e ativos. Se o preenchimento das peças otimizadas for imprevisível, o método de otimização é definido como passivo, do contrário, falamos de otimização ativa. Os métodos de otimização passiva incluem otimização de forma, otimização dimensional e otimização topológica. Como a otimização topológica não apenas otimiza o formato do limite, mas também altera a topologia interna, ela fornece uma solução melhor para a maioria dos requisitos.

Para elementos otimizados ativamente, sua topologia normalmente consiste em um padrão hierárquico, como uma estrutura celular. Este tipo de otimização requer mais intervenção humana e conhecimento para interpretar objetivos como requisitos de proliferação

celular ao projetar estruturas celulares. Mais importante ainda, ao contrário da forma generativa de otimização topológica, os resultados da otimização positiva são altamente dependentes do padrão escolhido, ou seja, de uma estrutura homogênea ou não uniforme (YANG; ZHAO, 2015).

Não é possível criar um projeto de MA sem imaginar a orientação de impressão. A qualidade da peça no processo de MA depende diretamente da orientação de impressão. No projeto, deve-se pensar a orientação de impressão, pois ela determina a direção da anisotropia, que será sempre na direção Z, ou direção de impressão vertical. Assim, se a anisotropia for um fator importante, a peça deve ser orientada de forma a ter as características que exigem resistência máxima para ser impressa horizontalmente. A maioria das tecnologias de MA precisam de material de suporte. O projetista deve sempre minimizar o material de suporte, pois sua colocação, somado com a quantidade de material necessária para ele, afeta muito a qualidade da peça e o custo pós-processamento. Dessa forma, seu uso deve ser cuidadosamente levado em consideração durante o processo de projeto (DIEGEL; NORDIN; MOTTE, 2019).

A tarefa de fatiamento é responsável por dividir a geometria da peça em fatias finas, criando assim uma divisão em camadas. Nesta fase, os parâmetros do processo são determinados, os parâmetros são muito dependentes da tecnologia de MA utilizada. O princípio de adição de material utilizado pela tecnologia tende a dominar os parâmetros principais. Por exemplo, para a tecnologia laser, a intensidade do feixe, a velocidade de varredura e o tempo de exposição são parâmetros de processo comuns. Para realizar o fatiamento, além de determinar os parâmetros, também é necessário determinar a orientação da peça durante o processo de fabricação. Esta etapa pode ser realizada automaticamente por software, que normalmente analisa o número de suportes ou apoios necessários para a produção com base na análise da inclinação da parede e na disposição da superfície do produto. Além da quantidade de apoios, a orientação deve ser feita através dos requisitos funcionais da superfície, pois a direção de fabricação afeta diretamente a resistência e rugosidade da peça.

Os softwares disponíveis para efetuarem o fatiamento geométrico fornecem ferramentas de visualização de processos baseadas em camadas. Dessa forma, antes da fabricação é possível visualizar como ficará cada camada produzida no processo. Esta ferramenta é essencial para analisar processos utilizando a tecnologia de DfAM. Ao visualizar o processo, deve-se primeiro prestar atenção à formação de paredes em camadas. É importante observar quaisquer descontinuidades na parede que possam levar à falha prematura. É possível especificar a parcela do material das camadas que pode ser sobreposto em toda a área a ser completada dentro dos

parâmetros do processo, e com este parâmetro é possível obter uma forma contínua e prolongar a vida útil do componente através de um programa.

Na visualização do processo, inicialmente é preciso atenção para a formação das paredes da camada, pois é necessário observar se existem pontos de descontinuidade de parede que podem gerar falhas prematuras. Dentro dos parâmetros de processo é possível indicar para o software responsável pelo fatiamento, a proporção de material que pode ser sobreposto para completar regiões. Esse parâmetro permite obter geometrias contínuas e prorrogar a vida útil de uma peça. A análise de visualização do processo é chamada de análise DfAM na sistemática. As análises necessárias e possíveis variam muito dependendo do processo de MA e muito pouco dependendo do software utilizado. Portanto, não será totalmente definido, cabendo que sua adição seja realizada individualmente para cada processo de MA. O processo de tomada de decisão para aprovar um processo de fabricação definido virtualmente deve levar em consideração se existem defeitos identificáveis precocemente que podem ser mitigados pela alteração de parâmetros ou mudanças da geometria da peça. Isso levará à etapa de seleção de concepções, passando pelo ajuste da forma ou mesmo de concepção dependendo do processo.

Se não houver falhas perceptíveis na visualização do processo, deverão ser executadas etapas de processamento que levem a um código interpretável por máquina. Esta fase diz respeito principalmente às máquinas utilizadas para fabricar as peças. A grande parte das máquinas operam em código G padronizado pela ISO 1056. No entanto, alguns fabricantes optam por usar seu próprio firmware, e dessa forma, o comportamento e a codificação de ativação podem variar.

4. APLICAÇÃO DA PROPOSTA PARA MODELAGEM DE DEPOSIÇÃO FUNDIDA (FDM)

Definir uma sistemática de projeto focado na tecnologia de MA é o primeiro passo para usar a fabricação aditiva na produção de produtos finais. O objetivo de formalizar as etapas do projeto para aproveitar as vantagens da MA no desenvolvimento de produtos foi estabelecido com o desenvolvimento da tecnologia de DfAM, permitindo a utilização de detalhes e requisitos específicos do processo desde os primeiros estágios de desenvolvimento e garantindo uma abordagem flexível e iterativa, determinada a partir da investigação das necessidades desse sistema.

Certas etapas e atividades sistemáticas são descritas como particulares do processo de MA escolhido. Para demonstrar como o processo afeta as tarefas e definir um sistema completo de desenvolvimento de projeto para, pelo menos, uma tecnologia de fabricação aditiva, foi desenvolvida uma aplicação de processo de modelagem de deposição fundida FDM. Para um projeto voltado à produção pelo FDM, determinados parâmetros do processo produtivo devem ser analisados desde a fase de concepção, para superar as limitações e características intrínsecas do processo produtivo e identificar as características que precisam ser levadas em consideração no desenvolvimento de produtos.

Os procedimentos de otimização foram adicionados de forma genérica para fornecer uma natureza didática do procedimento, pois a otimização envolve conhecimento avançado de algoritmos de seleção de programação e métodos de caracterização de peças. O MEF usando algoritmos de seleção e otimização é o método mais popular nesse sentido. Como uma das propostas deste método é facilitar o ensino do DfAM em peças obtidas por otimização topológica, o uso de ferramentas complexas de otimização dificultará a compreensão do processo de projeto. Sendo assim, será apresentado a metodologia associada a projetos de peças já otimizada, objetivo principal desse estudo. Desta forma, o processo funcionará como os conceitos de projetos por FDM publicados na literatura.

Para completar o sistema com informações específicas sobre a tecnologia FDM, a primeira atividade é caracterizar os processos que ocorrem durante a produção, identificando as etapas e transformações. Esta análise ajuda a descobrir parâmetros que influenciam o processo de fabricação e a compreender as restrições do projeto. Posterior a caracterização, a apresentação das novidades e conceitos da tecnologia FDM é sequenciada de acordo com o sistema de desenvolvimento do produto desenvolvido.

Segundo Ngo, et al, (2018), o método FDM da MA é um dos mais comuns. Possui várias vantagens como baixo custo, simplicidade no processo e alta velocidade de produção da peça. Devido a popularização desse método, fácil acesso a seus recursos e validação da sistemática, a tecnologia FDM foi escolhida para o desenvolvimento do presente estudo.

4.1. ANÁLISE DO PROCESSO DE FDM

Na tecnologia de modelagem de deposição fundida (FDM), o processo começa através de um filamento de polímero termoplástico que alimenta um bocal que se encontra na temperatura de trabalho do material, que passa por um estado semilíquido e é extrudado em camadas sobre uma base até que a peça 3D seja criada. A termoplasticidade dos materiais poliméricos é uma propriedade fundamental que garante que os filamentos depositados em camadas se fundam durante o processo de impressão e solidifiquem ao entrar em contato com a temperatura ambiente (LEE et al., 2019).

A matéria prima principal é o polímero termoplástico. As peças a serem construídas geralmente necessitam de estruturas de suporte para as partes salientes. Na maioria das vezes é utilizado um suporte feito do mesmo material que o material de impressão, em outras ocasiões utilizam um segundo material separado que é mais fácil de remover com força mecânica, e ainda tem os que utilizam um segundo material solúvel.

4.2. SISTEMÁTICA DO PROCESSO

Nesta etapa, incluem-se o estudo de viabilidade, projeto para funcionalidade e definições do processo. Nesta seção estão as análises do processo FDM, e de seus requisitos e parâmetros, o estudo das características de projeto e a escolha da alternativa mais adequada ao projeto.

4.2.1 Análise de Viabilidade

Os processos de MA só devem ser usados quando a peça não puder ser facilmente fabricada usando outra tecnologia de fabricação. A principal motivo é a rapidez, que se reflete no custo. Comparada com quase todas as outras tecnologias de produção, a MA é relativamente lenta. Portanto, na maioria dos casos é quase sempre mais econômico produzir peças de geometria simples através da fabricação tradicional quando sua velocidade é superior ao do processo de MA. Mas quando as peças atingem um nível de complexidade que não pode ser

fabricado utilizando métodos convencionais, a MA é a melhor opção (DIEGEL; NORDIN; MOTTE, 2019). A figura 28 apresenta um exemplo de filtro de seleção de complexidade de peças.

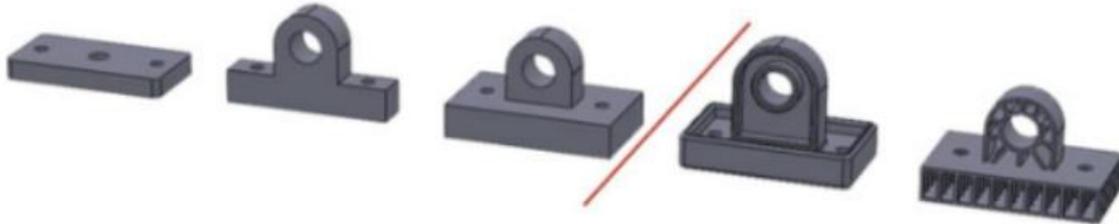


Figura 28 – Filtro de seleção complexidade – Adaptado de Diegel, Nordin e Motte (2019)

Na etapa de validação preliminar, depois de levantar os requisitos necessários para que o produto seja adequado para MA, agregando assim valor ao produto em comparação com algumas tecnologias de fabricação convencionais, podemos começar a definir o processo específico de MA, selecionando a tecnologia de fabricação aditiva que possa atender as restrições de projeto. Isso terá um impacto na estrutura do produto e na configuração das peças.

Ao analisar tecnologias de MA, devem ser verificados os requisitos e características preliminares do processo. As propriedades do material das peças dependem das matérias-primas utilizadas para impressão, tipo de equipamento e parâmetros do procedimento. O fornecedor do material propicia estimativas das propriedades do material, como módulo de elasticidade, índice de Poisson, limite de escoamento e alongamento na ruptura em várias direções. Contudo, a geometria, os parâmetros do processo e as propriedades de cada tipo de equipamento também influenciam as propriedades do material resultante.

A anisotropia afeta as propriedades mecânicas de uma peça. Mesmo com o avanço da MA, existe sempre uma determinada quantidade de anisotropia na direção vertical entre camadas. Isso acontece porque a resistência mecânica da ligação entre cada camada é um pouco mais fraca do que a resistência mecânica dentro da própria camada (DIEGEL; NORDIN; MOTTE, 2019). Conforme a tecnologia de MA empregada, essa anisotropia pode ser irrisória ou mitigada através de pós-processamento. O efeito da anisotropia deve sempre ser levado em consideração ao projetar algum produto no processo FFF. Nesse processo, a resistência na adesão entre camadas é significativamente inferior em relação a resistência no plano de deposição, assim as peças possuem resistência a tração maior ao longo do eixo X-Y, que é

horizontal a direção de deposição. A resistência a tração no eixo Z é comparativamente baixa, porém a resistência a compressão do eixo Z é normalmente aceitável (SMYTH, 2017).

Foram listados na tabela 4.1 algumas das principais características do processo FDM e do material TPU e PETG, por serem os mais utilizados na engenharia.

Tabela 8 – Características do FDM e dos materiais TPU e PETG - Adaptado de Diegel, Nordin e Motte (2019)

Características	Valor
Espessura da camada	0,1 – 0,3 mm
Precisão	$\pm 0,1$ ou $\pm 0,3$ mm por 25 mm
Tolerância	Normalmente 0,25 mm
Menor tamanho de recurso	Cerca de 1 mm
Ângulo de apoio	Inferior ou igual a 45° precisa de suporte
Espessura mínima de parede	1 mm
Espessura mínima de parede para aplicações industriais	3 mm
Resistência à tração	39,0 Mpa (TPU) / 29,4 Mpa (PETG)
Módulo de elasticidade	78,7 Mpa (TPU) / 2070,0 Mpa (PETG)

4.2.2 Projeto para Funcionalidade

Ao projetar, é sempre importante ter em mente quais as funções se desejam alcançar e que tipo de configuração mais simples possa ser utilizada para que peças possam ser impressas em uma orientação que evite anisotropia. Esse pensamento geralmente leva a boas oportunidades para integrar peças. A integração de peças envolve a conversão de um produto composto de muitas peças simples em um produto composto de menos peças, porém mais complexo. Um produto composto por 10 componentes ao conseguir uma redução de 10% nas peças tem diminuição importante, porém se ele for composto por 10.000 componentes ou mais por exemplo, uma redução de 10% nas peças tem um impacto significativo na redução. As diretrizes a seguir fornecem um processo de pensamento geral para ajudar engenheiros e projetistas a decidir se a integração de peças é aplicável. Uma redução de peças maior ainda como 30% ou mais de 50% pode significar vários fatores como:

- Horas de engenharia reduzidas para desenhos de montagem e instalação.

- Redução das horas de planejamento de materiais para carregar e colocar as peças na fila de compra.
- Menos peças para comprar proporcionando menos despesas gerais da cadeia de fornecimento.
- Menos peças para receber/inspecionar, ou seja, recebimento de O/H e horas de qualidade.
- Redução da carga de estoque (overhead).
- Horas reduzidas para retirada de peças do estoque e montagem de kits.
- Redução da mão de obra de fabricação nas horas de montagem.
- Redução das etapas de inspeção e certificação.

Essas melhorias citadas podem melhorar o resultado de um potencial aumento do custo do estabelecimento do método de MA.

Com a fabricação subtrativa tradicional, tentamos fazer com que a máquina execute o mínimo de trabalho de corte possível para reter qualquer material em nosso projeto sem afetar o desempenho da peça, pois sua remoção custará tempo e dinheiro. No entanto, com a MA é o oposto. Quanto mais materiais desnecessários, mais trabalho o sistema de fabricação aditiva terá que realizar, mais tempo a peça demorará e mais cara ela será (DIEGEL; NORDIN; MOTTE, 2019).

Durante a fase de projeto para funcionalidade, os ajustes relacionados ao processo de MA selecionado referem-se à entrada de restrições do processo. A tabela 8 apresenta as principais restrições observadas na literatura para o processo FDM.

Tabela 9 – Restrições de projeto para FDM – (ALVES, 2021)

Características de projeto	Recomendação
Folga horizontal entre partes móveis	~ 2x altura de camada
Folga vertical entre partes móveis	~ altura de camada
Folga para furos verticais	+ 0,3 mm
Folga para furos horizontais	+ 0,15 mm
Diâmetro mínimo para pinos	2 mm
Diâmetro roscado mínimo	5 mm
Angulação sugerida para grandes áreas planas	10°
Espessura mínima de parede para aplicações leves	1 – 2,5 mm

Continuação da Tabela 9 - Restrições de projeto para FDM – (ALVES, 2021)

Espessura mínima de parede para aplicações industriais	3 - 5 mm
Regiões vazias	Desenvolver volume vazio sempre que possível
Conexões de superfícies	Sempre que possível arredondar cantos da peça

4.2.3 Definições do Processo

Na fase de definições do projeto, a tecnologia de MA no processo FDM é abordado dentro da sistemática, através das atividades “Otimizações DfAM”, “Fatiamento” e “Análise DfAM”.

4.2.3.1. Otimizações DfAM

O projeto de MA deve ser pensado desde os estágios iniciais de desenvolvimento com a ideia de unir as partes, e adicioná-lo como uma etapa de otimização é uma redundância intencional que obriga o projetista a reduzir ao máximo a lista de componentes do produto. Depois da verificação da capacidade de agrupamento de peças e módulos, o sistema passa para a otimização orientada por softwares e algoritmos de análise (HUTTON, 2004).

Ao realizar a análise através do método de elementos finitos (MEF), uma das partes importantes do processo é criar uma malha na geometria que tenha o comportamento desejado sob certas condições iniciais. O processo representa uma área física que contém elementos finitos que são chamados de malha. O resultado desse conjunto de elementos é chamado de malha de elementos finitos. Geralmente, as geometrias simuladas apresentam elementos com lados retos que permitem que todo o domínio físico esteja na malha do elemento, mas em alguns casos em que o domínio inclui limites curvos, esse domínio não é totalmente considerado na malha (HUTTON, 2004). A figura 29a apresenta uma representação de um domínio de limite curvo, numa malha grossa com 41 elementos quadrados e na figura 29b ao lado, uma malha melhorada de elementos finitos para o mesmo domínio, que mostra a redução da área não incluída e um total de 192 elementos menores.

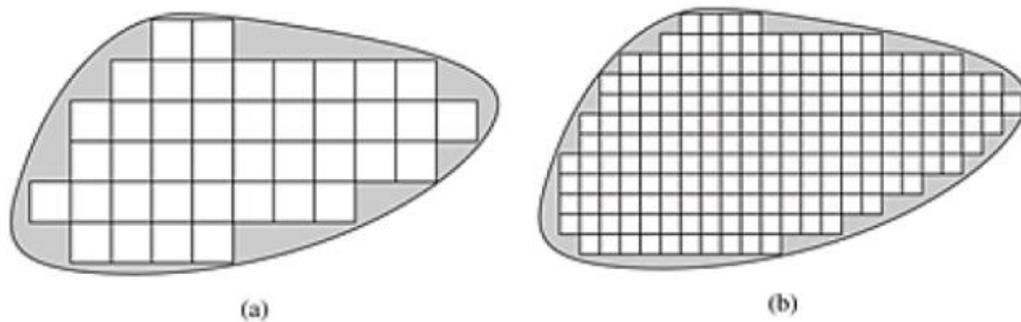


Figura 29 - Domínio com 41 elementos quadrados e (b) domínio com 192 elementos – Adaptado de Hutton (2004)

A malha melhorada permite uma área maior de domínio físico na representação de elementos finitos. Nos domínios físicos de limites curvos, há a possibilidade da utilização de elementos triangulares, permitindo assim uma aproximação nos limites de curvos do domínio (HUTTON, 2004). A confiabilidade dos resultados da análise de elementos finitos para a geometria depende da geração da malha, ou seja, se a função de interpolação satisfizer os critérios matemáticos, a solução para o problema dos elementos finitos convergirá, fornecendo soluções exatas. Os resultados dos elementos finitos tendem a aumentar gradualmente à medida que o número total aumenta e a dimensão do elemento diminui. O processo de refinamento da malha reduz as mudanças incrementais e aproxima-se assintoticamente da solução exata (OLM; BADIA; MARTÍN, 2019).

Após a realização da análise através do MEF em uma determinada geometria, é indispensável realizar uma interpretação dos resultados obtidos. O MEF oferece vários resultados, como deformação máxima, deslocamento, tensão de Von Mises, fator de segurança e tensão. Com essas informações é possível observar que tensões e deformações tridimensionais são geradas por tensões em diferentes direções, ou seja, são multidirecionais, resumida em uma tensão equivalente, também chamada de tensão de Von Mises (OLM; BADIA; MARTÍN, 2019). A figura 30 apresenta um ensaio por elementos finitos de peça discretizada por trajetórias.

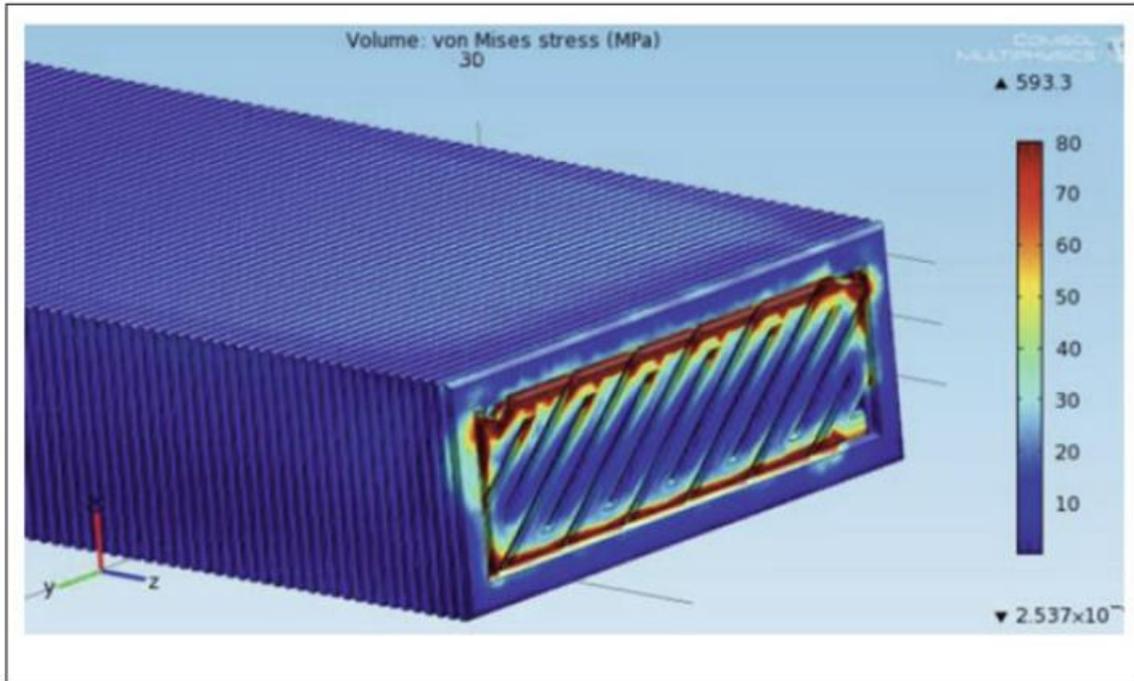


Figura 30 – Ensaio por elementos finitos de peça discretizada por trajetórias (GÓRSKI, KUCZKO, HAMROL, 2015).

O critério de falha de Von Mises é chamado de teoria da energia de distorção máxima. Essa teoria estabelece que um material dúctil começa a se deformar em um determinado ponto quando a tensão de Von Mises atinge o valor do limite elástico do material.

4.2.3.2. Fatiamento

A atividade de fatiamento estabelece o processo de fabricação da peça. Nela são inseridos os parâmetros do processo que somado a geometria caracteriza toda a produção da peça. São definidos o conjunto de configurações e a orientação da geometria na fabricação.

O método de impressão por FDM, de forma geral é lento. Mas é possível controlar o parâmetro de quantidade de preenchimento de partes sólidas de forma a reduzir o tempo de impressão. Dessa forma, é obtido uma peça aparentemente sólida, porém com o interior preenchido apenas por uma estrutura quadriculada. As propriedades mecânicas de um plástico comum, como o ABS e o PLA, são bem conhecidas, mas suas propriedades gerais não podem ser utilizadas para o projeto de peças pelo processo de FDM devido principalmente à anisotropia mecânica criada pelo sistema de formação por deposição em fios e camadas, o que reduz em muito a resistência da peça obtida, principalmente no sentido de deposição das camadas (LEE; HUANG, 2013) (IVANOVA; WILLIAMS; CAMPBELL, 2013).

A forma para resolver os problemas da anisotropia própria do FDM está na escolha do parâmetro relacionado a orientação da peça na impressão, pois sua resistência pode ser regulada depositando-se o filamento em diferentes direções e densidades. Dessa forma, a solução mais eficiente para resolver a questão da resistência causada pela anisotropia tem sido o aumento da densidade em regiões críticas, porém, em alguns casos não elimina o problema, além de aumentar a quantidade de material e o tempo de impressão (ZHANG, 2015).

Apesar de AHN et al., 2002 e outros autores tenham estudado a influência e associações entre os parâmetros da impressão por FDM e as propriedades relacionadas à resistência mecânica como tração, compressão, flexão, cisalhamento, os resultados envolvem apenas a resistência relacionada com o sentido de deposição horizontal do material e são realizados principalmente com ABS.

As pesquisas relacionadas ao processo FDM são na área de desenvolvimento de novos materiais (compósitos, mistura de polímeros, adição de fibras, cores, texturas, plásticos metalizados e outros) ou em novas tecnologias para a deposição destes materiais. Entretanto, apesar de pesquisas terem sido feitas por diversos estudiosos, levantando as diversas propriedades de processo da fabricação por FDM e as características mecânica das peças obtidas, ainda não foi sugerido uma metodologia segura para diminuir a fragilidade das peças fabricadas, em especial em relação ao sentido vertical de deposição. Os trabalhos efetuados neste campo, normalmente estudam apenas a resistência no sentido de deposição do filamento extrudado.

Autores como Sood, et al (2009) pesquisaram os efeitos de parâmetros como altura da camada, orientação do objeto durante a impressão, ângulo e largura de varredura na precisão dimensional de peças ABS. A precisão dimensional foi determinada com base na taxa de mudança de largura, comprimento e espessura da peça impressa e assim propuseram um modelo de previsão não linear. Isso demonstra a importância da força de ligação entre fibras e do controle de disformidade no processo de fabricação.

Ziemian et al, (2012) analisou de forma quantitativa o potencial do FDM como ferramenta completa de fabricação, verificando a capacidade das peças produzidas em preservar suas integridades mecânicas quando submetidas a cargas. O estudo se baseou na dependência de propriedades mecânicas em função dos parâmetros relacionados a orientação e varredura da impressão, tendo sido realizados ensaios como tensão, compressão, flexão e impacto.

Segundo Yardimci et al., 1996, modelos matemáticos associados a transferência e difusão de calor em fios depositados através de FDM sugerem que o esfriamento do fio

depositado possui grande influência na qualidade da ligação entre as camadas e qualidade final da impressão.

Giannatsis et. al. (2012) pesquisaram a influência de diversos parâmetros de processo nas propriedades mecânicas de peças produzidas por FDM. A pesquisa contou com uma impressora industrial e uma impressora do tipo fonte aberta educacional baseada em projeto de baixo custo e o ABS como matéria prima. O resultado obtido foi que a impressora de baixo custo gerou peças de resistência mecânica comparável ao equipamento industrial, uma vez que os parâmetros foram selecionados e ajustados adequadamente.

A escolha dos parâmetros é realizada através dos softwares de fatiamento que varia conforme a versão utilizada. Esses programas possibilitam o preenchimento da parte interna de uma peça com padrões geométricos diferentes que vão desde linhas retas ou cruzadas até desenhos como favo de abelha, estrelas, etc. Conforme o padrão de preenchimento selecionado, o resultado pode ter diferentes propriedades estruturais à compressão e resistência a tração em uma peça impressa (FERNANDEZ-VICENTE et al., 2016), (GOPSILL; HICKS, 2016), (SAJJAD et al., 2019), e diferentes valores de custo no que se refere ao material gasto e tempo de impressão (BAICH; MANOGHARAN; MARIE, 2015).

Como uma das principais funções de um preenchimento é suportar a camada superior da peça, alguns programas de fatiamento criam a possibilidade de um preenchimento de árvore onde as ramificações são derivadas de colunas internas que suportam a camada superior. Porém, este tipo de enchimento não contribui ou contribui muito pouco para a resistência à tração e compressão da peça. A figura 31 apresenta o exemplo de alguns padrões de preenchimento utilizados pelos programas de fatiamento.

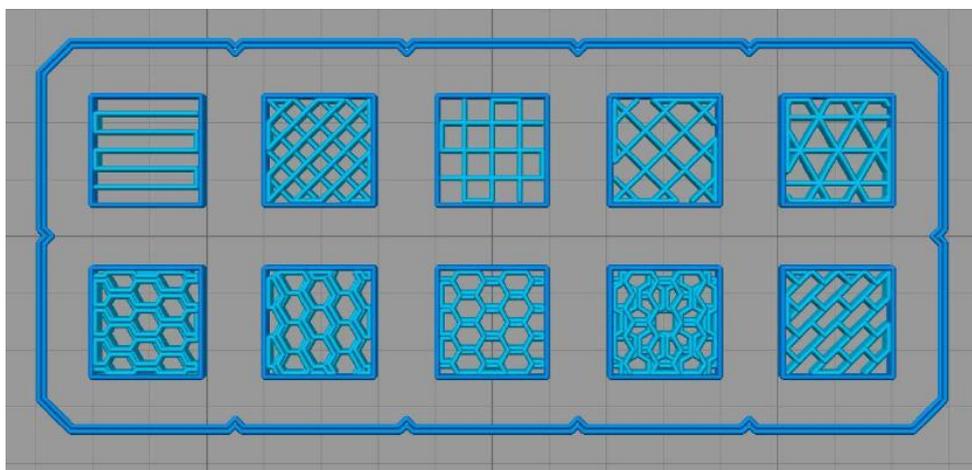


Figura 31 – Padrões de preenchimento – (CAVALCANTE, 2022)

De acordo com a pesquisa de diversos autores é possível apresentar vários parâmetros que mais tem influência no processo de FDM. São eles, espessura da camada, percentual de preenchimento, ângulo de preenchimento, largura da deposição, temperatura do filamento, número de perímetros, diâmetro do bico, material, velocidade de extrusão, temperatura da peça, orientação da peça, geometria da peça, representação da peça, temperatura do envelope de impressão, cor do material, velocidade de fluxo do material, velocidade da plataforma de construção, caminho do impressão, pós-processamento e outros (ALI; CHOWDARY; MAHARAJ, 2014; BRAHMBHATT; PATEL; BRAHMBHATT, 2015; CHRISTIYAN; CHANDRASEKHAR; VENKATESWARLU, 2016; GONABADI; YADAV; BULL, 2020; LANZOTTI et al., 2015; SANTHANABHARATHI; VENKATRAMANAN, 2017; SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2009; SREEDHAR; MATHIKUMARMANIKANDAN; JOTHI, 2012; TORRES et al., 2016; WANG et al., 2019). A figura 32 apresenta os principais parâmetros do FDM analisados em publicações.

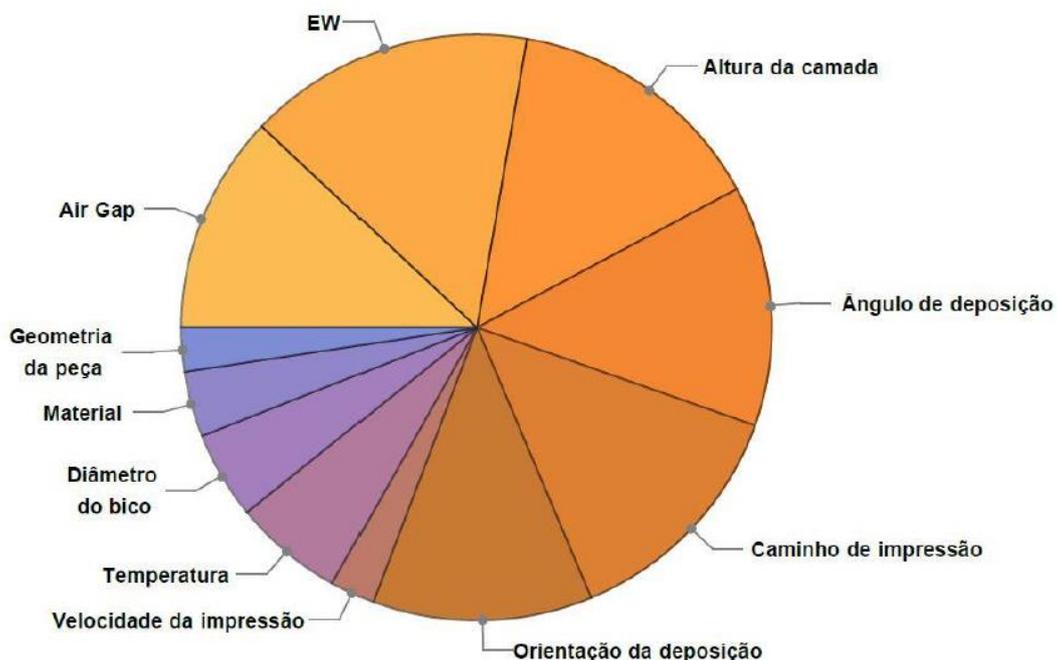


Figura 32 – Parâmetros de impressão de FDM investigados em publicações (CAVALCANTE, 2022)

Grande parte dessas pesquisas foram realizadas com ABS e através peças impressas no plano X-Y. Muitos parâmetros são relacionados a outras pesquisas como propriedades mecânicas, rugosidade superficial, precisão dimensional e tempo de impressão. Com relação a deposição de camadas, os parâmetros mais importantes para resistência a tração no sentido vertical de deposição são os relacionados aos perímetros, percentual de preenchimento, altura

das camadas e temperatura de extrusão. A orientação de deposição está ligada ao sentido de colocação da peça no plano X-Y, o ângulo de deposição tem a ver com o preenchimento e com as camadas de fechamento da peça.

4.2.3.3. Análise DfAM

A análise DfAM faz parte da sistemática como ferramenta para antecipar possíveis erros, além de ajustar a geometria da peça e parâmetros do processo. No FDM, os principais erros a serem reconhecidos estão ligados à suportes da peça. A figura 33 apresenta a ilustração da percepção de falhas e distorções da peça sendo depositada sem substrato.

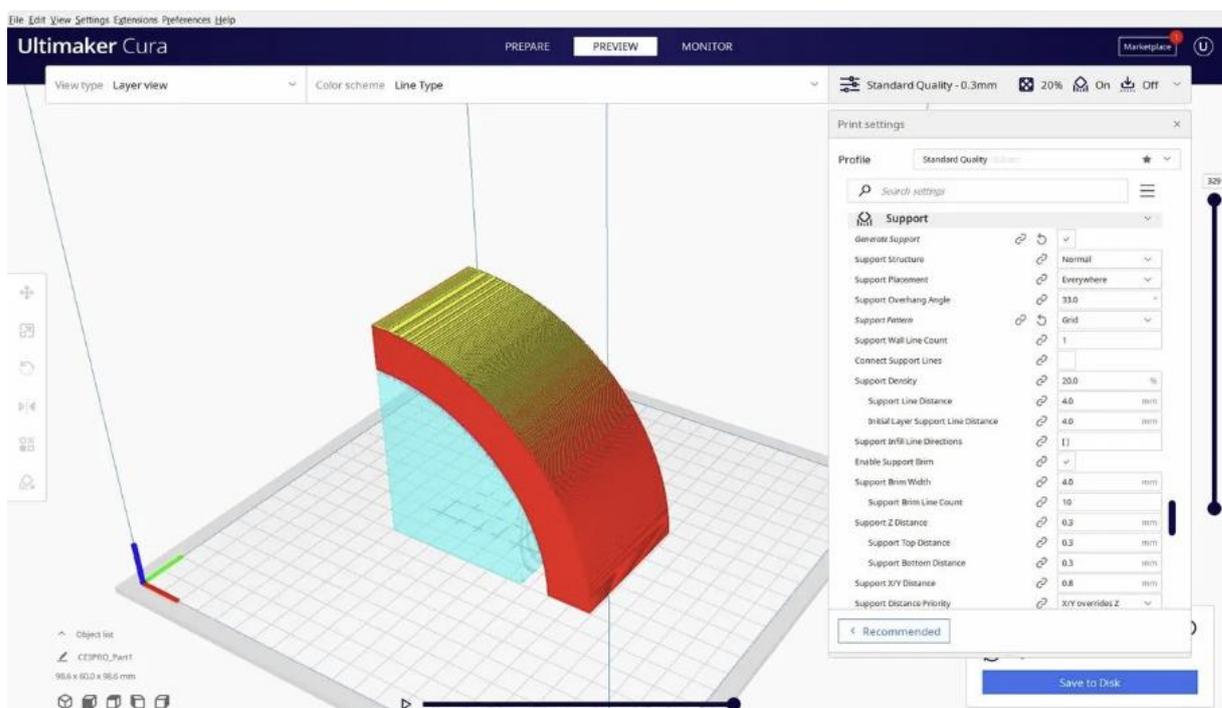


Figura 33 – Ilustração da percepção de falhas e distorções na peça – (ALL3DP, 2023)

O ângulo de balanço influencia a quantidade de material de suporte adicionado. Um ângulo menor leva a mais suporte. Por exemplo, a um valor de 0° todas as saliências são suportadas, enquanto a 90° nenhum material de suporte é adicionado. A figura 34 apresenta um modelo de peça mostrando a necessidade de suporte. No modelo à esquerda mostrado no modo sólido, a área em vermelho indica a área saliente que necessita de suporte, pois possui um ângulo de balanço inferior a 45° . No modelo da direita é mostrado o fatiamento da peça com suporte.

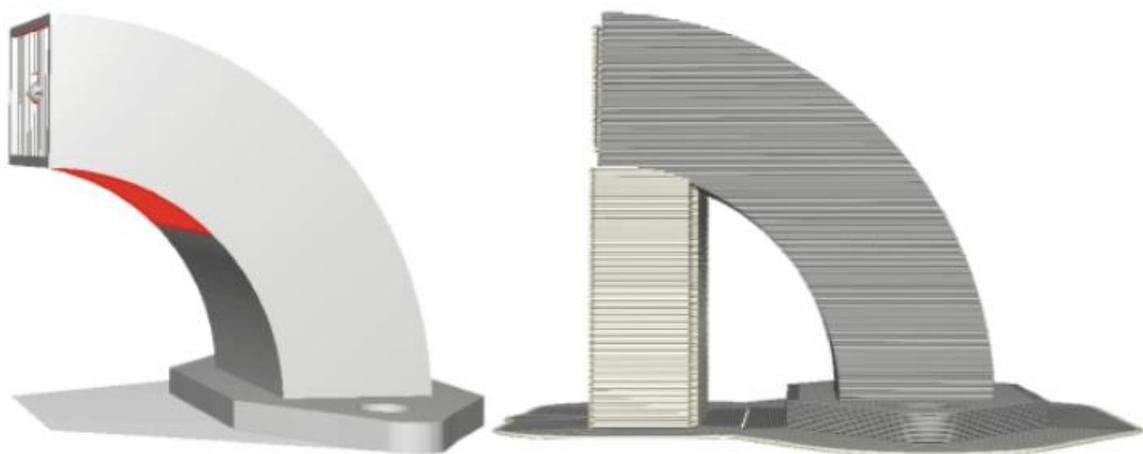


Figura 34 – Análise da verificação da necessidade de suportes – (ULTIMAKER, 2022)

5. ESTUDO DE CASO

O objetivo do estudo de caso é analisar e avaliar o melhor projeto voltado às vantagens da manufatura aditiva, que apresente o máximo aproveitamento de suas propriedades e, ao mesmo tempo, economize na quantidade de material a ser utilizado, garantindo assim sua aplicação. O modelo de drone utilizado nesse estudo participou da competição “*The Generate Quadcopter Challenge*”, (GRADCAB, 2017) onde o objetivo era utilizar software de otimização topológica para criar um projeto de fuselagem de quadricóptero usando uma metodologia baseada em restrições técnicas. Esse modelo foi retirado do portal GRADCAB que conta com uma biblioteca de arquivos 3D. Não foi disponibilizado pelo portal mais informações detalhadas (como um desenho técnico da estrutura), mas com base nas referências disponibilizadas foram desenvolvidos 3 modelos de geometria de carcaça de drone que possuem propriedades mecânicas capazes de atender as demandas estruturais do projeto. O projeto conta com uma cavidade (caixa) para proteger a eletrônica e bateria de colisões, também foi adicionado ganchos nas laterais da estrutura para prender a carga usando tiras. A figura 35 apresenta o fluxograma de execução do estudo de caso realizado.

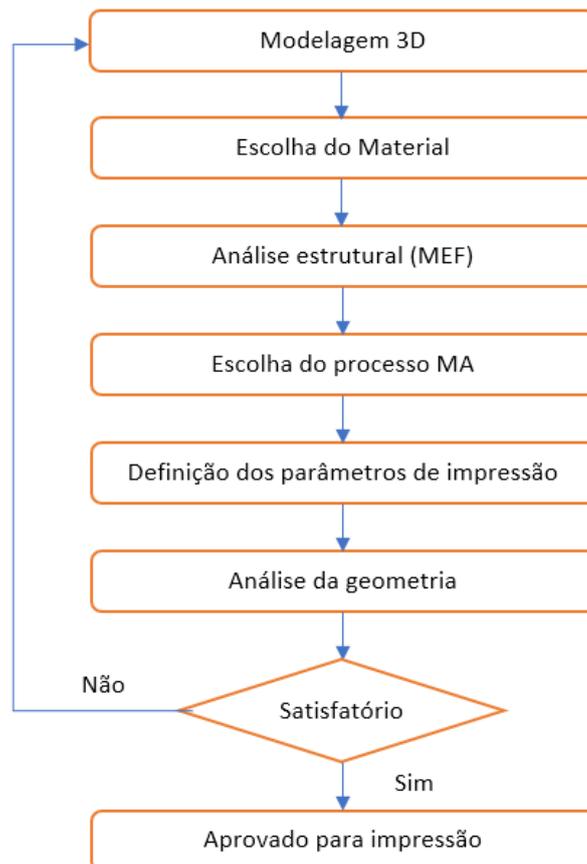


Figura 35 – Fluxograma de execução do trabalho – Autoria própria

Custos operacionais e materiais de impressão são caros, o que pode aumentar quando se utiliza tentativa e erro para resolver problemas. Nesse estudo de caso será apresentada simulação computacional para realizar o fluxo de trabalho mais rápido, de baixo custo e suas respectivas validações, demonstrando os desafios e limitações aplicadas ao processo de MA. A compreensão física dos processos de MA pode fornecer uma visão panorâmica sobre as sensibilidades aos parâmetros de processo. Já a simulação computacional destes processos não só fornece uma visão importante dos fenômenos físicos que levam a geometria final do material, como massa, volume e a qualidade do produto, mas também a escala de horas necessárias para fabricação da peça, visando criar produtos funcionais e de baixo custo.

5.1. GEOMETRIAS DO PROJETO

A viga I é projetada de forma a suportar uma carga máxima de flexão usando a menor quantidade de material, nesse sentido, foram adotados modelos inspirados no projeto baseado na estrutura de viga I, que estão apresentadas na figura 36 abaixo.

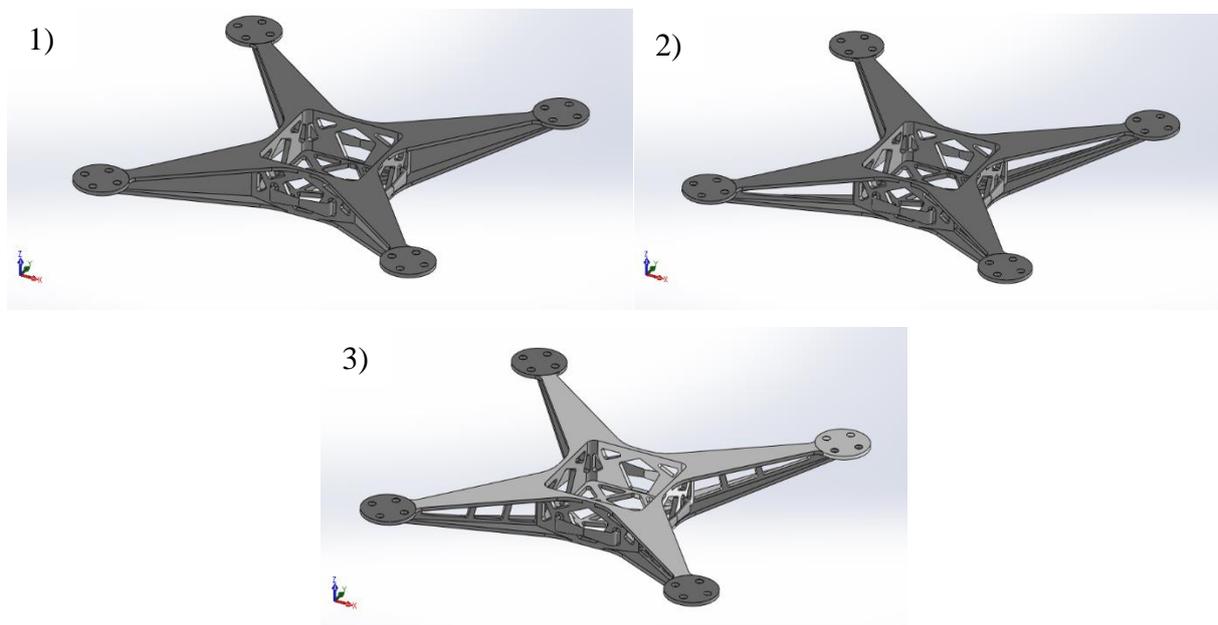


Figura 36 – Opções de modelo de carcaça de drone - Autoria própria a partir de Gradcab (2017)

Os modelos estão definidos conforme a seguir:

1. Modelo com braços maciços;
2. Modelo com braços vazados;
3. Modelo com braços vazados e reforçados.

5.1.1 Decisões de projeto

Para execução da análise foi adotado o método de Deposição de Material Fundido (FDM) da MA, por ser o processo com menor custo e, portanto, o mais utilizado. O material empregado no filamento foi o Polietileno Tereftalato com Glicol (PETG) muito conhecido por sua fácil adesão a plataforma de construção e variedade de cores. O filamento PETG é semirrígido e possui alto nível de resistência mecânica. Esse material também possui boas características térmicas, o que permite que o plástico esfrie de forma eficiente com empenamento quase insignificante, além de oferecer resistência a degradação por raio UV. Outras vantagens do PETG são: alta resistência a química e umidade, reciclável, possui boa resistência a abrasão e pode ser pós processado com lixa e tinta acrílica. A tabela 10 apresenta as características do material PETG.

Tabela 10 – Características do material PETG

Propriedade do PETG	Valor
Módulo de Flexão (MPa)	2160
Resistência à Tração (MPa)	28,0
Alongamento na Ruptura (%)	130
Resistência ao Impacto IZOD (J/m)	4,5
Limite de escoamento (N/m ²)	5,3x10 ⁷

5.2. ANÁLISE ESTRUTURAL

Neste trabalho, para a análise por elementos finitos, foi utilizado o software de simulação SolidWorks® na obtenção dos campos de tensão e deformação dos modelos 3D. Foi utilizado o módulo de análise de estruturas estáticas, uma vez que serão aplicadas somente cargas estáticas. Para análise foi estabelecido um valor de carga acima da restrição do desafio organizada pela GRABCAD, que era de 1,17 N por motor do modelo de drone utilizado nesse estudo, que foi produzido para uma competição de otimização generativa em nuvem. Dessa forma, foram definidas as condições de contorno e carregamento: para o apoio fixo foi definido as faces da caixa, representado pela cor verde; já as forças na cor magenta representam os esforços aplicados à estrutura pelos motores. A carga aplicada é de 2,5 N, distribuída na ponta dos quatro braços totalizando uma carga de 10 N na direção do eixo Y. Na Figura 37 é possível

observar os apoios fixos aplicados as faces da caixa em verde e as faces em que foram aplicadas a carga de 2,5 N na direção do eixo Y em magenta.

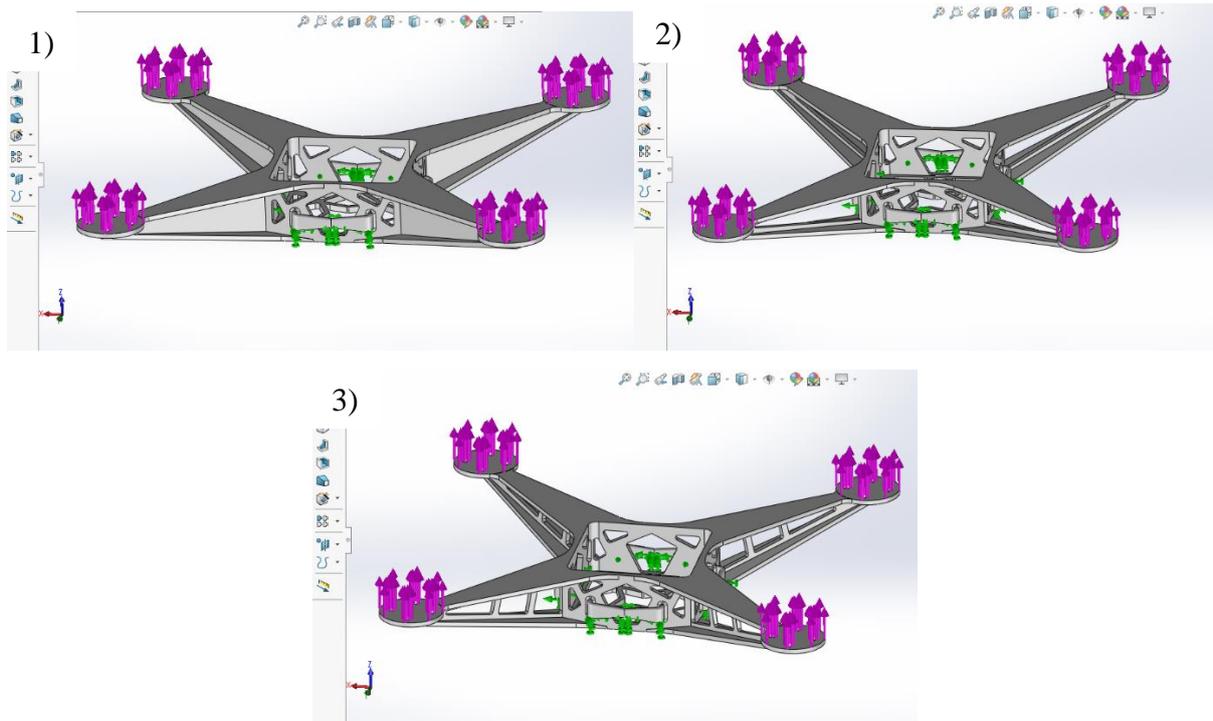


Figura 37 – Condições de contorno aplicados as estruturas dos modelos 1, 2 e 3 – Autoria própria

Ainda na parte de pré-processamento, é necessário gerar a malha do modelo 3D. A geração da malha é realizado automaticamente pelo software SolidWorks®, onde refinamentos devem ser feitos na malha para alcançar uma convergência dos resultados. Nas figuras 38, 39 e 40, podem ser observados os resultados das malhas nas geometrias dos modelos 1, 2 e 3 respectivamente

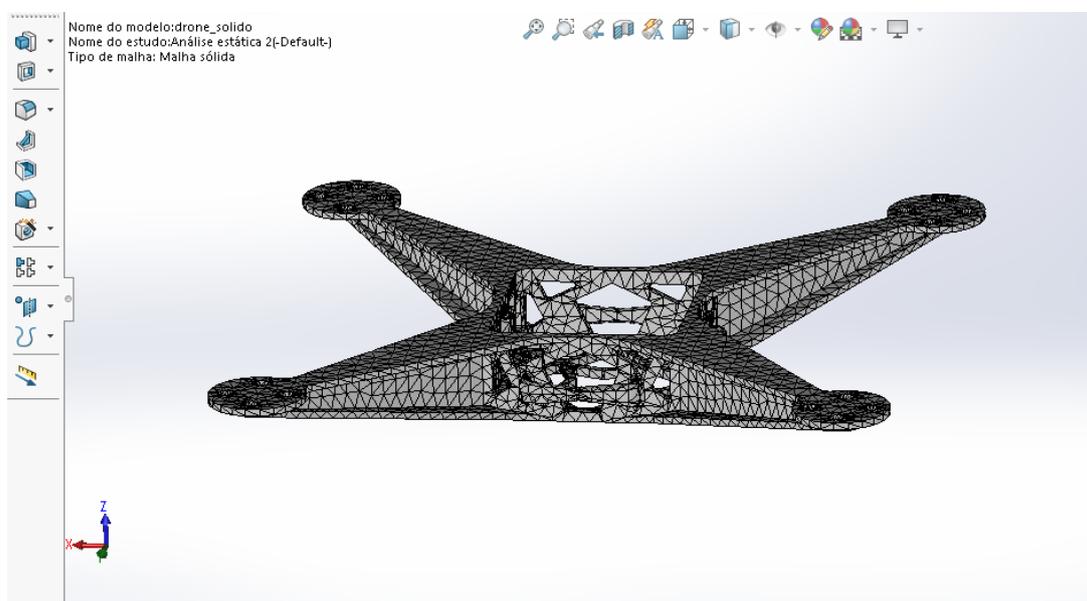


Figura 38 - Malha do modelo 1 gerada no software SolidWorks® – Autoria própria

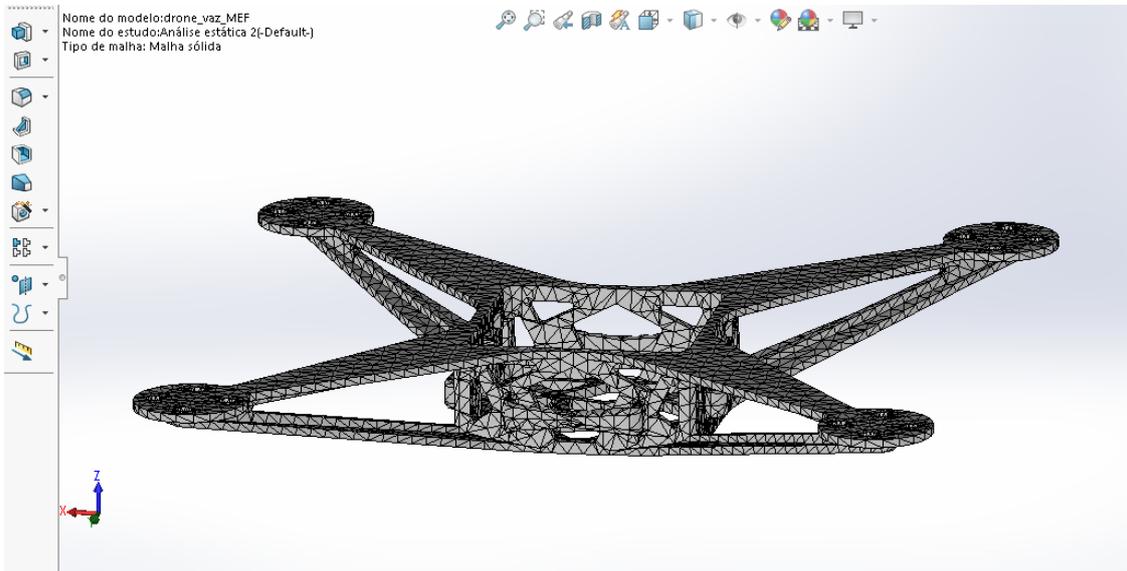


Figura 39 – Malha do modelo 2 gerada no software SolidWorks® – Autoria própria

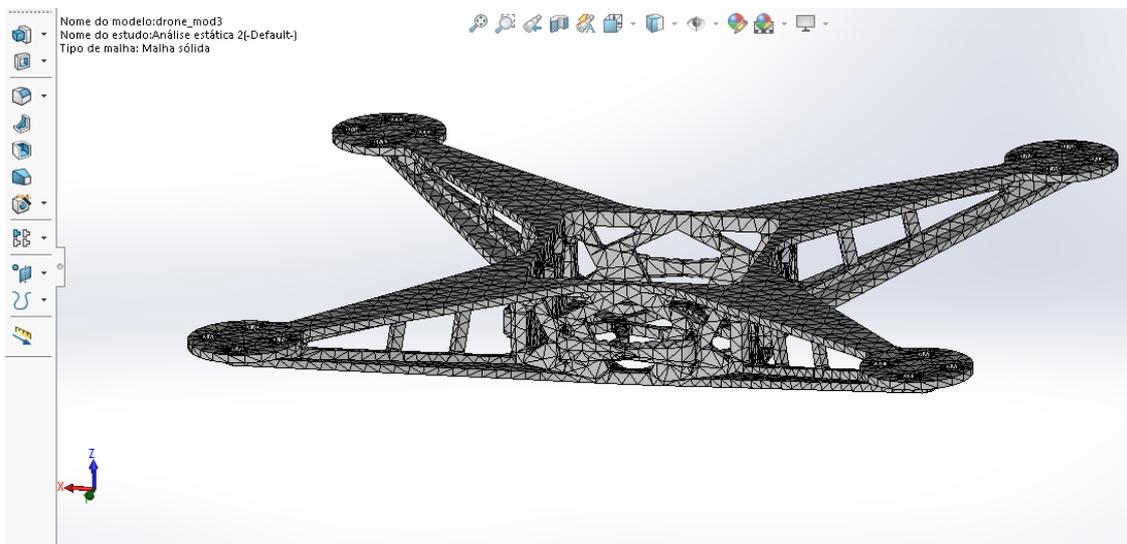


Figura 40 – Malha do modelo 3 gerada no software SolidWorks® – Autoria própria

As Figuras 41, 42 e 43 apresentam o resultado da análise de tensão equivalente de von Mises para os três modelos respectivamente com o objetivo de verificar se as geometrias de carcaça de drone propostas atendem aos requisitos de resistência.

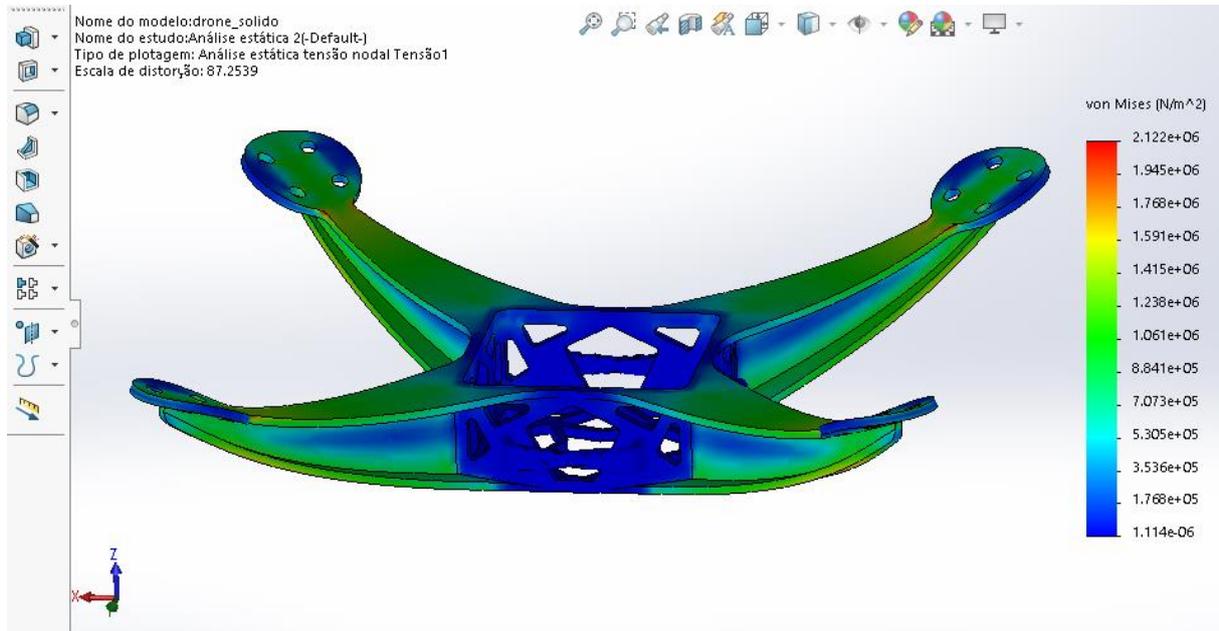


Figura 41 – Tensão equivalente de von Mises para o modelo 1 – Autoria própria

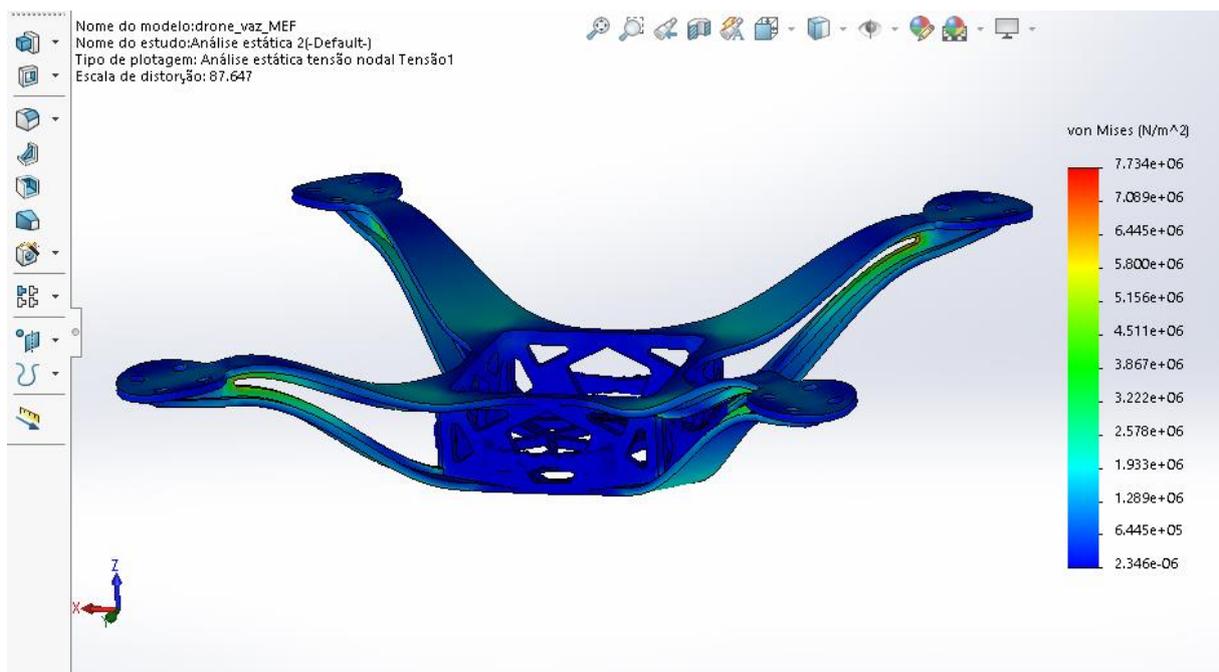


Figura 42 - Tensão equivalente de von Mises para o modelo 2 – Autoria própria

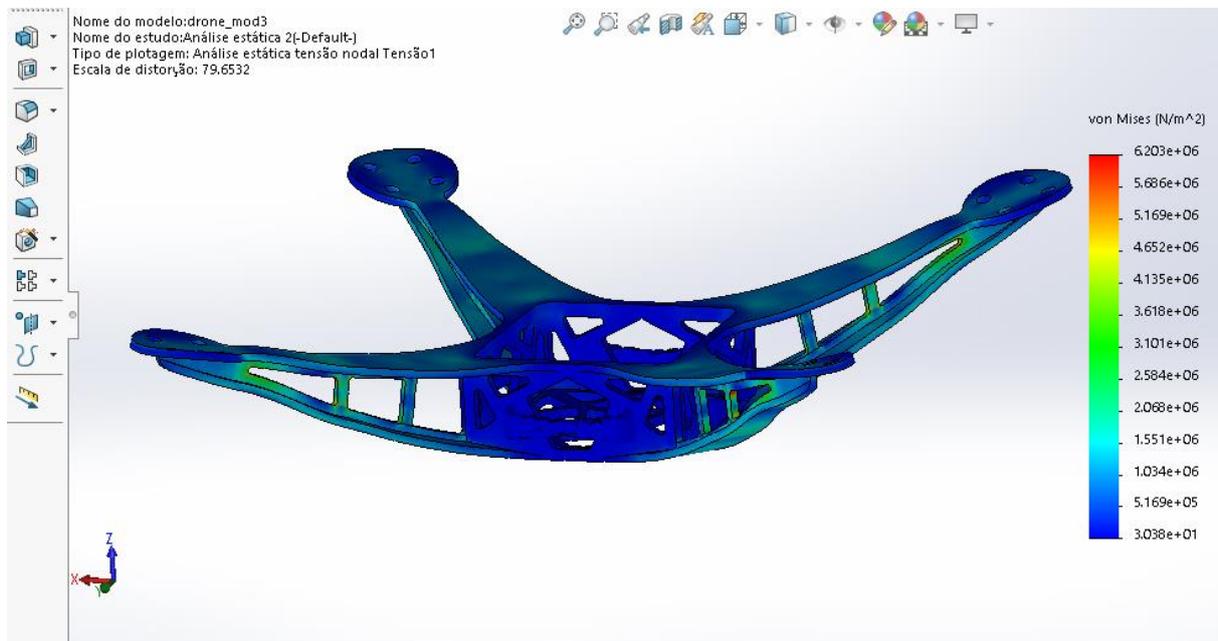


Figura 43 – Tensão equivalente de von Mises para o modelo 3 – Autoria própria

O resultado da tensão equivalente de von Mises fornecida pelo software SolidWorks® nos três modelos mostraram que as regiões de maior concentração de tensão obtida em cada um dos três são as regiões de variação geométrica, isto é, onde há uma mudança repentina de forma geométrica, como nos cantos. As tensões máximas obtidas pelo software para os três projetos estão abaixo da tensão de escoamento do material, que para o PETG é $5,3 \times 10^7$ N/m². Dentre os três modelos considerados a maior tensão máxima obtida refere-se ao modelo 2 e foi de $7,7 \times 10^6$ N/m², representando apenas 14,5% da tensão limite de escoamento do PETG. Dessa forma atende-se as recomendações de projeto pois a máxima tensão é inferior a 70% da tensão limite de escoamento.

O resultado da análise de deformação total para os três modelos respectivamente estão apresentadas nas figuras 44, 45 e 46.

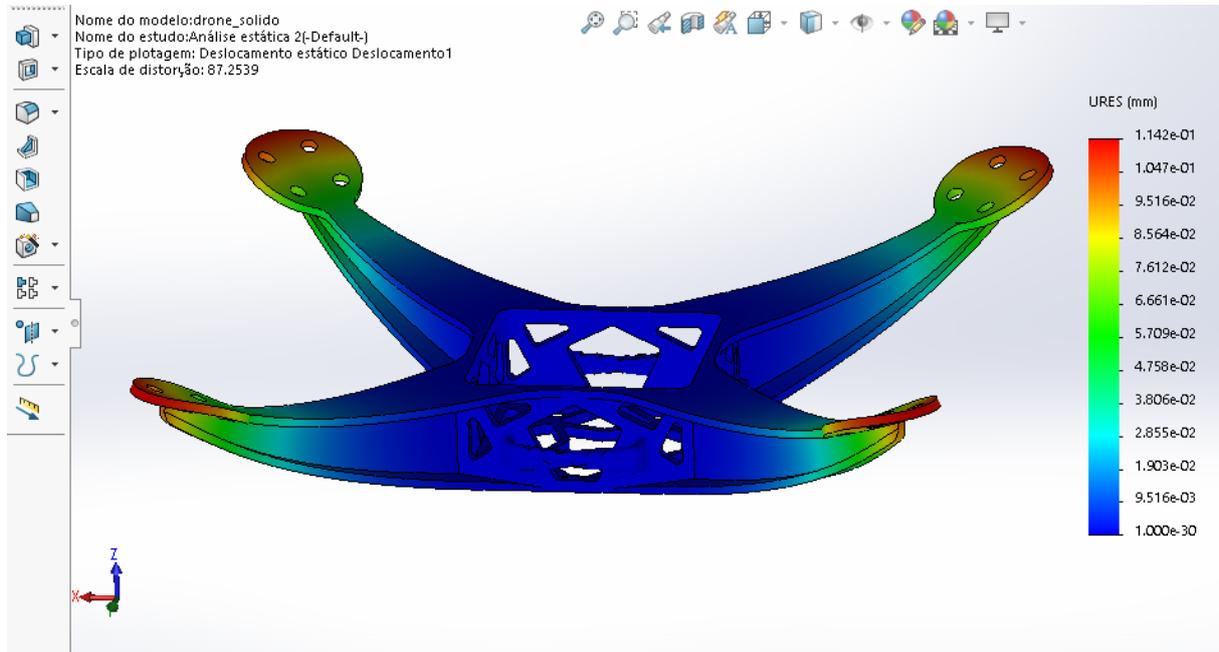


Figura 44 – Deformação máxima do modelo 1 – Autoria própria

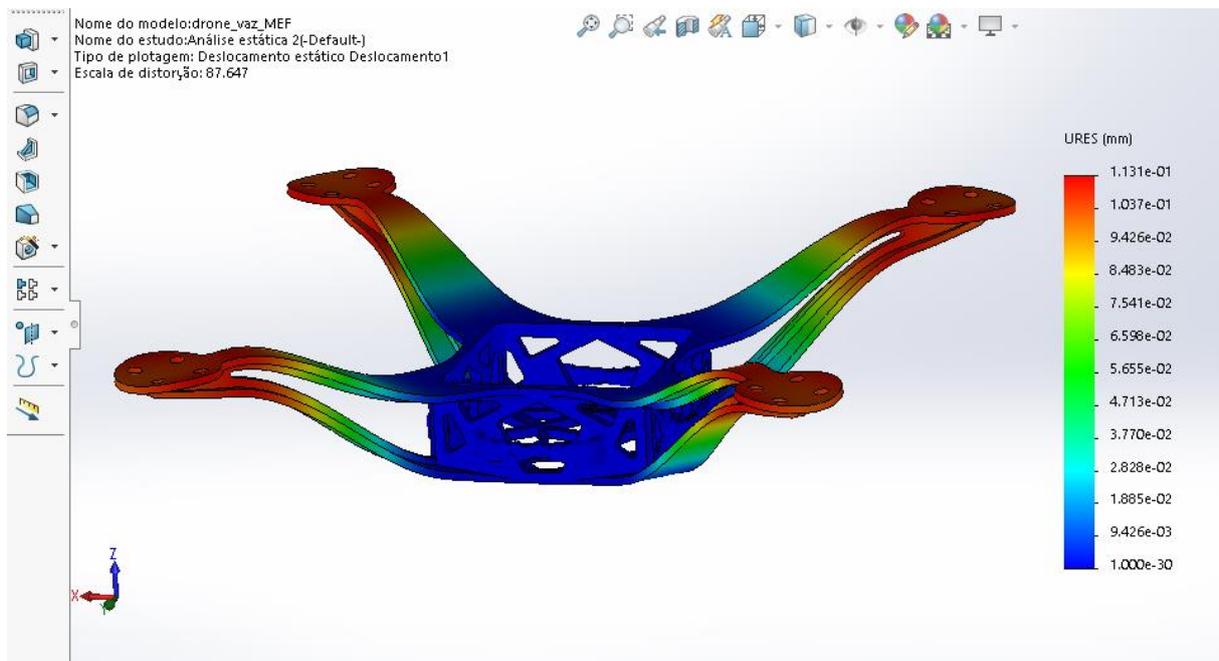


Figura 45 – Deformação máxima do modelo 2 – Autoria própria

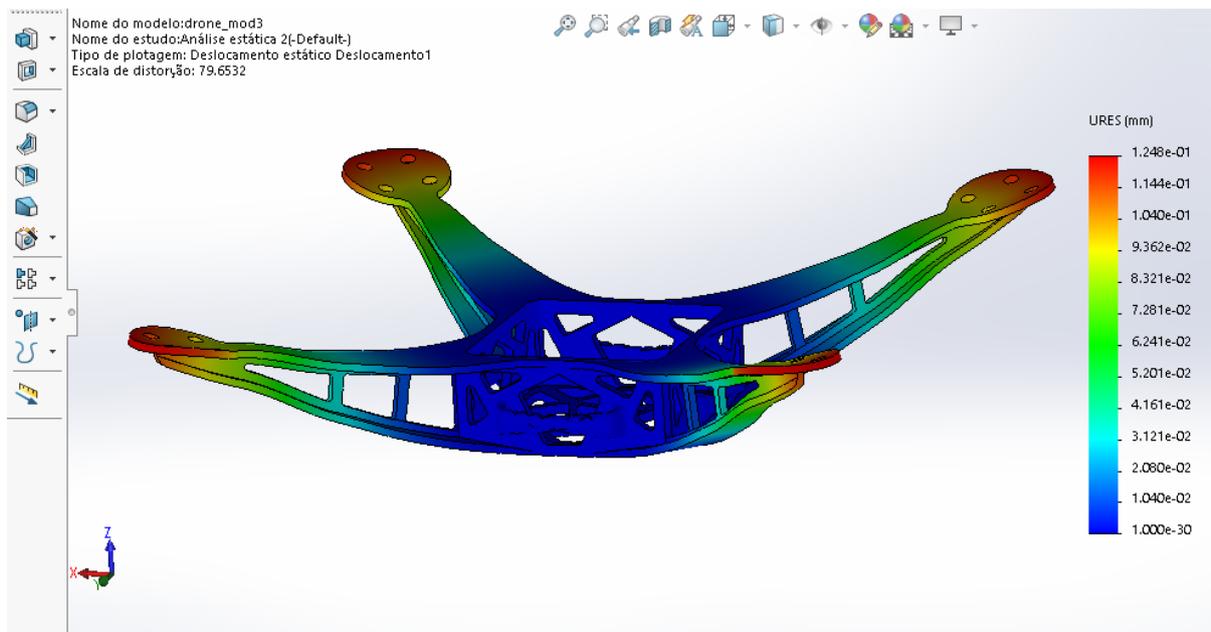


Figura 46 - Deformação máxima do modelo 3 – Autoria própria

É possível verificar pelas figuras 44, 45 e 46, que o deslocamento máximo obtido é de 0,12 mm. Isso indica que a estrutura apresenta boa rigidez, pois ao realizar a elevação de uma carga de 10 N o drone não se deforma nem ao menos 1 mm. As avaliações das geometrias apresentaram comportamentos semelhantes em relação a região onde a maior tensão foi concentrada, além de apresentarem resultados satisfatórios aos requisitos de resistência e deformações, garantindo uma estrutura que suporte as cargas sem o rompimento ou deformação devido às tensões máximas serem inferiores à tensão limite de escoamento do material.

As tensões mais altas aparecem em áreas com variações bruscas na geometria (regiões de bordas e cantos) que são concentradores de tensão, contudo é possível concluir que o arredondamento dessas áreas contribuiu para valores inferiores ao limite de escoamento, também inferimos que devido às baixas tensões encontradas, o modelo 1 está superdimensionado, sendo recomendado o uso da otimização topológica para redução de massa.

5.3. SIMULAÇÃO DA FABRICAÇÃO

O programa de fatiamento utilizado foi o UltiMaker Cura®. Esse é o mais utilizado em simulações de fatiamento para impressões da MA, onde é necessário prever o tempo de fabricação da peça e a quantidade do material a ser depositado. O software de simulação UltiMaker Cura®, apresenta ferramentas que integram parâmetros selecionados ao longo do fatiamento do modelo CAD 3D. Na interface do software na tela principal, definimos o modelo

da impressora e o tipo de material a ser usado, nas duas abas há opção já cadastradas disponível no sistema ou cadastro personalizado que possibilita a importação do modelo ou material desejado. Nas primeiras definições de preparação no UltiMaker Cura® foram selecionadas o modelo Creality Ender 3 de impressora 3D de tecnologia FDM e o PETG como material, como apresentado na figura 47.

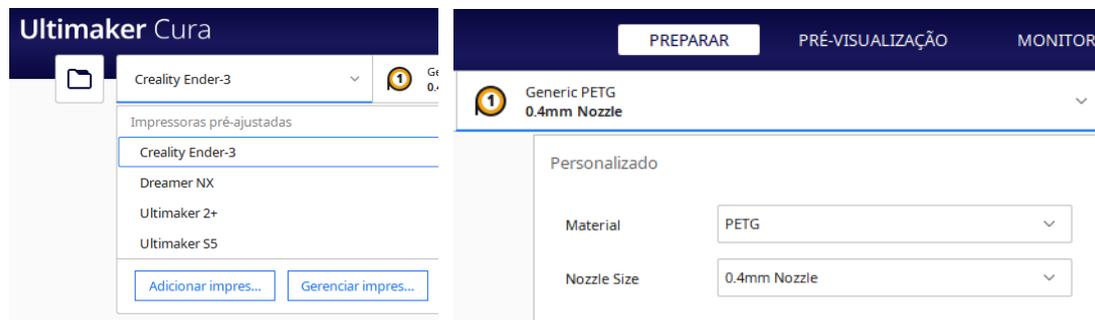


Figura 47 – Interface de seleção de impressora e material no software UltiMaker Cura® – Autoria própria

No painel principal de ajuste de impressão, usando o modo recomendado pelo Cura, são detalhadas as configurações utilizadas para realização das análises, apresentadas nas figuras 48 a 50. As configurações de impressão principais pertinentes nesse trabalho são:

- **Altura da camada:** Quanto menor a altura de cada camada, melhor a qualidade, no entanto, levará mais tempo para concluir uma peça. Isso se deve ao fato de que, quanto maior a altura da camada, maior é a espessura do filamento, e portanto, menos camadas será necessário imprimir. Dessa forma, o tempo também é reduzido. Em geral, quanto menor a altura da camada (ou seja, quanto mais fino for o filamento), maior é a resistência mecânica da peça. Um dos motivos é que, quanto mais fino o filamento, mais fácil será de aquecê-lo, facilitando a ligação entre o filamento já depositado e aquele que está por vir. Contudo, com relação a qualidade da peça, vale notar que quanto menor a altura da camada, mais tempo se leva para imprimi-la, aumentando a probabilidade de ocorrer algum erro na impressão.
- **Espessura da parede:** Define a espessura das paredes (contornos) da sua peça. A espessura tem uma variação diretamente proporcional ao tempo de fabricação, dado um fator de proporcionalidade. Uma possível razão é o fato de que, quanto maior a espessura que se deseja imprimir, maior será a quantidade de filamento necessária para fabricar a mesma peça. Por esse motivo, o tempo é maior conforme aumenta a

espessura da camada. Também quanto mais espessa for a parede, maior será a sua área de seção transversal. Sabendo que tensão é igual à força dividida pela área, nota-se que a tensão à qual a parede estará submetida é menor, conferindo melhores propriedades mecânicas à peça.

- **Preenchimento:** Confere resistência mecânica conforme sua densidade aumenta, no entanto, quanto maior for o preenchimento, mais demorada será a impressão. O motivo desse comportamento no tempo de fabricação se deve ao fato de que, quanto mais próximo ao maciço, maior é a quantidade de filamento que precisa ser extrudada para garantir o preenchimento do material.
- **Velocidade:** Esse parâmetro se refere à velocidade do bico do extrusor ao depositar as camadas de filamento. Em geral, quanto menor a velocidade, mais preciso será a impressão. Contudo, o tempo de fabricação também aumenta. E, por outro lado, velocidades mais altas garantem um tempo de execução menor, porém podem comprometer o nível de detalhamento da peça.
- **Suporte:** O uso de suportes é recomendado quando há “braços” suspensos, como em peças com geometria que possua ângulos de balanço, que há ramificações sem uma base sólida abaixo. Nesses casos, há risco de o filamento cair ou romper, sendo necessário o uso de suportes para sustentá-los. Porém quando habilitada esta opção irá consumir mais material.
- **Aderência à mesa:** Esse fator pode afetar a peça no caso de o filamento não aderir completamente à base, podendo gerar uma peça empenada e menos compacta (devido à possível dificuldade de adesão entre uma camada e outra).

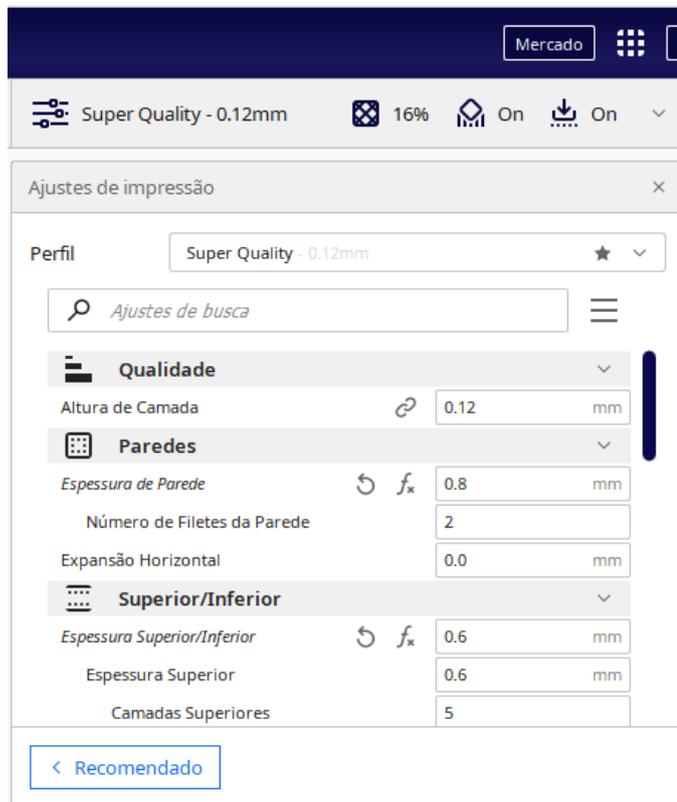


Figura 48 - Interface de seleção de altura e espessura da camada no software UltiMaker Cura® – Autoria própria

Os parâmetros de preenchimento e velocidade forma mantidos como padrão de configuração da máquina selecionada.

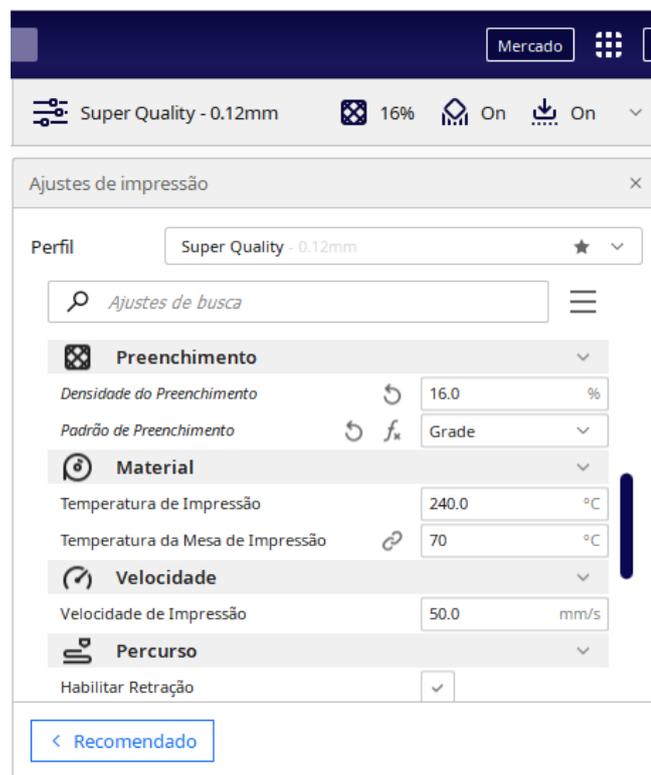


Figura 49 - Interface de seleção de preenchimento e velocidade no software UltiMaker Cura® – Autoria própria

O parâmetro responsável pela configuração do suporte tem grande importância. O projetista deve atentar ao ângulo de balanço do modelo projetado e a necessidade de apoio para que o resultado da fabricação da peça seja aceitável. A seleção de aderência a mesa permite o uso de contorno na primeira camada garantindo uma melhor adesão a superfície da plataforma de construção.

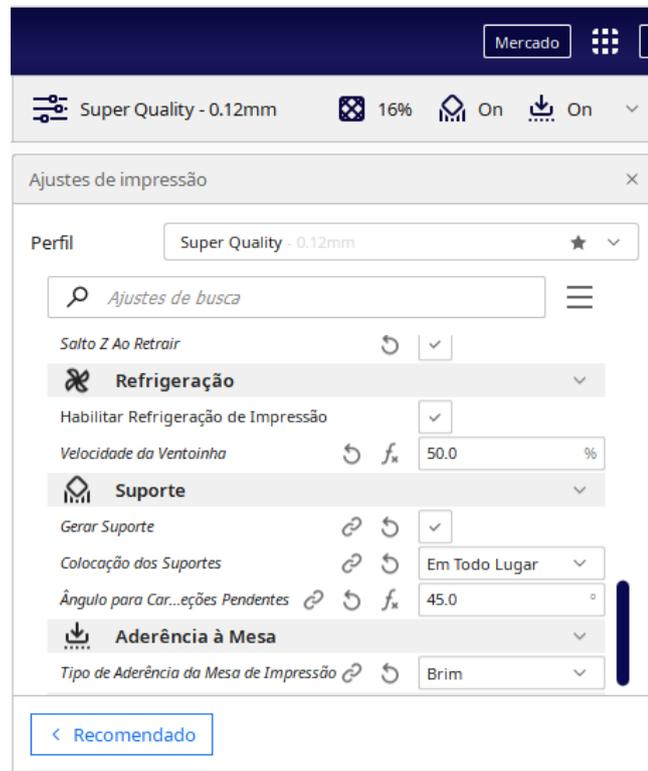


Figura 50 - Interface de seleção de suporte e aderência a mesa no software Ultimaker Cura® – Autoria própria

Nas considerações sobre a melhor posição da peça para fazer a prototipagem, é recomendável que se escolha a posição com a maior área de contato, pois é a posição em que a peça vai aderir melhor a mesa. Normalmente a posição com maior área de contato é a que vai implicar no menor uso de suportes para a fabricação da peça, mas esse aspecto pode não ser verdadeiro para peças com muitos detalhes internos. Nesse caso pode-se considerar a posição em que menos suportes serão utilizados. Contudo deve-se sempre considerar os custos de fabricação. Deve-se também considerar aspectos de resistência mecânica esperada para a peça. Considerando que a peça fabricada em camadas deve-se avaliar a influência dessas e a distribuição de esforços, escolhendo uma posição que não comprometa a distribuição de esforços.

Para que não haja influência dos parâmetros no tempo de impressão, foram utilizados os mesmos parâmetros padrão da ferramenta de simulação UltiMaker Cura® nos três modelos. A tabela 11 elenca os parâmetros de impressão a serem fixados em todos os casos.

Tabela 11 – Parâmetros de impressão a serem inseridos

Modelo da máquina de impressão 3D		Creality Ender 3	
Tamanho do bico de extrusão (nozzle)		0,4 mm	
Preenchimento		16 %	
Qualidade		Material	
Altura da camada	0,12 mm	Temperatura de impressão	240°C
Paredes		Temperatura da mesa de impressão	70°C
Espessura da parede	0,8 mm	Velocidade	
Nº de filete	2	Velocidade de impressão	50,0 mm/s
Superior/Inferior		Percurso	
Espessura	0,6 mm	Habilitar retração	ON
Camadas	5	Salto Z ao retrain	ON
Preenchimento		Refrigeração	
Densidade	16,0	Habilitar refrigeração de impressão	ON
Padrão	Grade	Velocidade da ventoinha	50%
Aderência à mesa		Suporte	
Tipo de aderência	Brim	Ângulo para suporte	45°

5.4. ESTUDO DE VIABILIDADE

Nesta seção estão as análises do problema apresentado, e de seus requisitos, o estudo das possíveis soluções e a escolha da alternativa mais adequada ao projeto. Essa comparação foi realizada em função da complexidade da geometria analisada e determinar as suas superfícies funcionais e, portanto, os seus volumes funcionais, sabendo que esses volumes são representações do preenchimento das superfícies funcionais, para realizar as simulações necessárias para a determinação do tempo e o custo.

5.4.1. Modelo com braços maciços

O modelo CAD foi desenvolvido partindo de uma geometria simples, considerando todas as restrições de projeto DfAM, que possibilitasse a avaliação da geometria projetada utilizando o software de fatiamento UltiMaker Cura® para o processo FDM. A viabilidade levou em consideração as superfícies funcionais impostas pelos requisitos do produto, assim como, o acabamento superficial da peça, além da redução do tempo de impressão e consequentemente o custo de fabricação. O modelo 3D da peça é apresentado na figura 51.

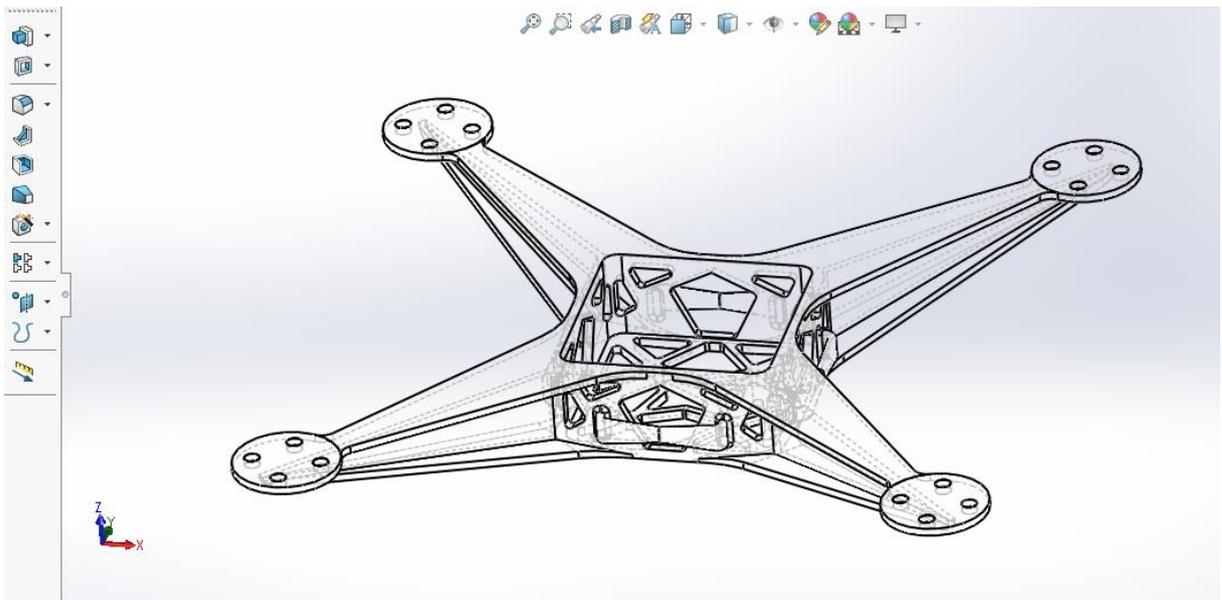


Figura 51 – Modelagem do drone com braços maciços – Autoria própria

As propriedades de massa atribuídas ao modelo supracitado são as informadas na tabela 12.

Tabela 12 – Propriedades de massa do modelo 1

Propriedade	Valor
Massa (g)	7,91
Volume (mm^3)	5567,24
Área de superfície (mm^2)	11831,10

O fatiamento do modelo seguiu os parâmetros de processo já pré-estabelecidos na seção 5.3. A escolha da orientação da peça na plataforma de construção da máquina, juntamente com

parâmetros otimizados e a influência da direção de deposição, extensamente abordada pela literatura acadêmica, não serão abordadas nessa seção. A preparação do modelo na mesa de impressão é apresentada na figura 52.

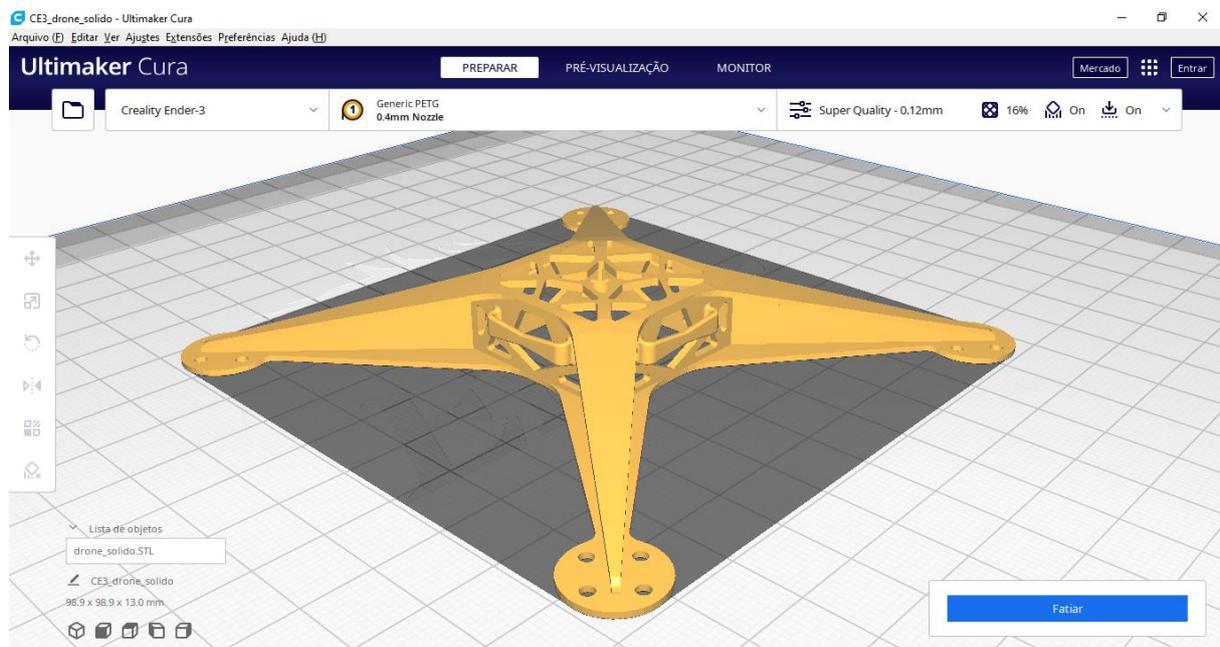


Figura 52 – Modelo sendo preparado no software de fatiamento UltiMaker Cura® - Autoria própria

Na etapa de simulação do modelo 1, foi realizado o fatiamento das camadas. Os suportes foram criados pelo algoritmo de geração de suportes que faz parte do software de impressão, minimizando a quantidade de material necessária para a fabricação dos suportes e a possibilidade de erro no estabelecimento de suas posições. A otimização de suportes, garante acabamento superficial melhor, pois haverá menos superfície de material em contato com o suporte, reduzindo a necessidade de pós-processamento para ficarem lisas. Na figura 53 podemos visualizar a simulação das camadas pelo software de fatiamento UltiMaker Cura®.

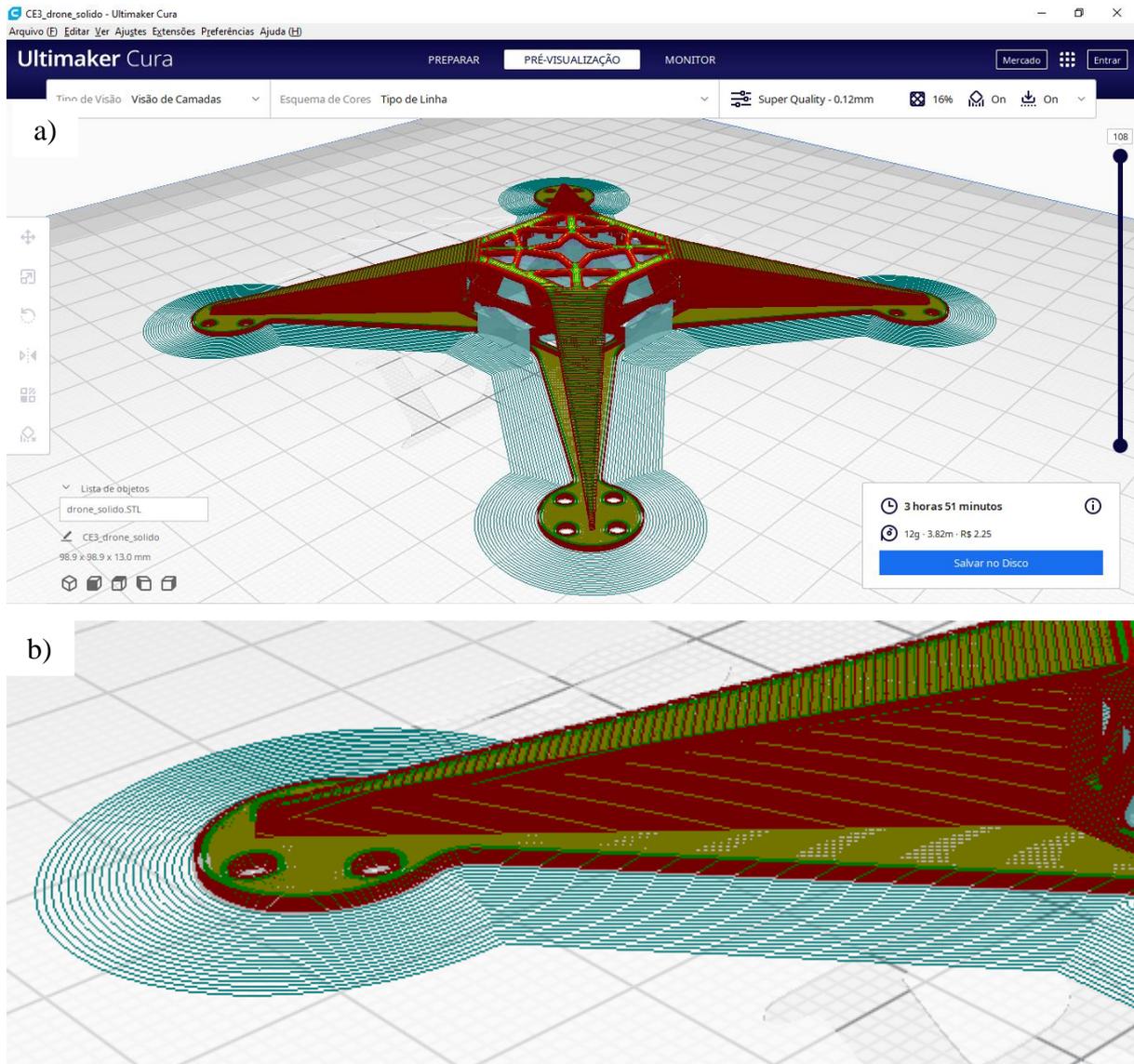


Figura 53 – Simulação do modelo no software de fatiamento - Autoria própria

No fatiamento podemos observar que as regiões de maior complexidade do modelo, representadas pelas superfícies inclinadas e áreas suspensas, necessitaram de suportes para a deposição de camada. O tempo de fabricação obtido na simulação foi de 3 horas e 51 minutos. Isso se deve ao fato de que, quanto mais próximo ao maciço, maior é a quantidade de filamento que precisa ser extrudado para garantir o preenchimento do material. Também podemos observar, que a geometria dos braços maciços pode gerar eventuais detrimetos, desfavorecendo na escolha desse tipo de modelo, tal como resistência aerodinâmica, por haver um aumento na área de atrito devido o acréscimo de material, elevando a força de arrasto. A equação que descreve a força que faz resistência ao movimento de um objeto sólido através de um fluido é apresentada abaixo:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$$

em que F_d é o arrasto, ρ é a densidade do fluido, v é a velocidade do objeto em relação ao fluido, C_d é o coeficiente de arrasto e A é a área.

Pela equação é possível verificar que o arrasto é proporcional a área de superfície e que o aumento da área, necessariamente aumenta a força de arrasto.

Este tipo de modelo aeronáutico não traz preocupação em relação à força de sustentação, que será compensada pelas hélices horizontais, mas visa pela redução da espessura da geometria que levará uma diminuição no consumo e aumento no desempenho do drone, além da redução no custo de produção. Vale também ressaltar que a área preenchida não traz melhoria na estabilidade do drone.

5.4.2. Modelo com braços vazados

Uma nova geometria foi projetada a partir do modelo anterior, para esse novo desenho foram adotados os braços vazados, a fim de alcançar uma geometria próxima a que seria gerada por otimização topológica, possibilitando a redução de massa e assim alcançar o design ideal. Nesse caso 2, também foi considerado todas as restrições de projeto DfAM para o processo FDM. Após a implementação da melhoria proposta foi utilizado o software de fatiamento UltiMaker Cura® para a avaliação da nova geometria projetada. O modelo CAD 3D com braços vazados é apresentado na Figura 54.

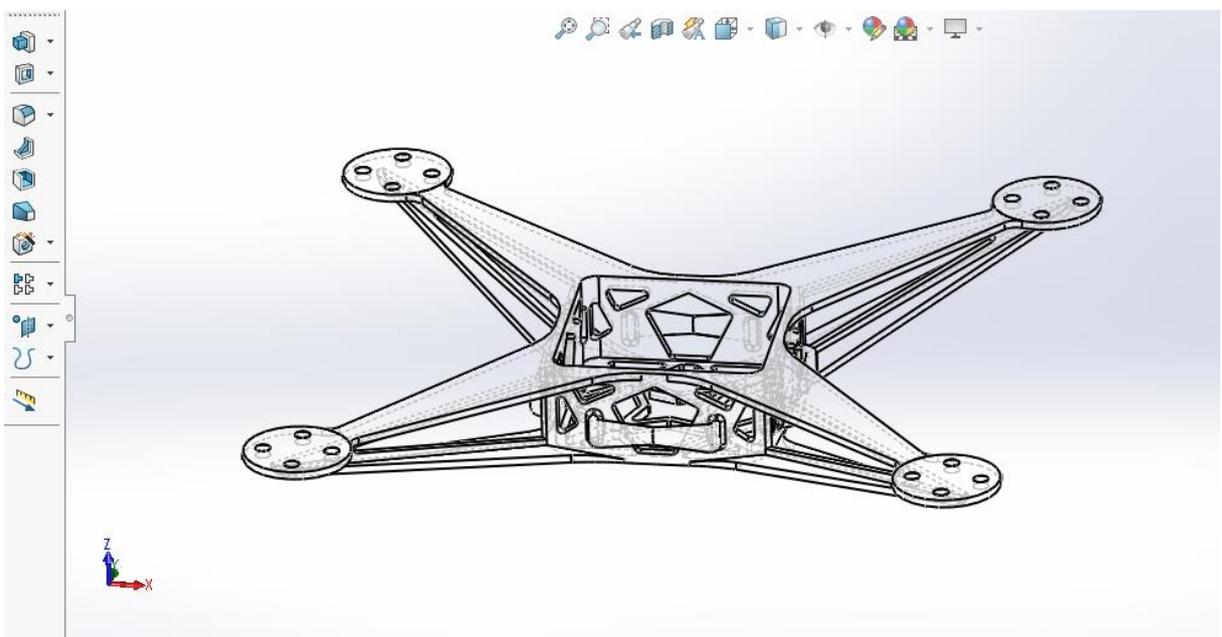


Figura 54 - Modelagem do drone com braços vazados - Autoria própria

As propriedades de massa atribuídas ao modelo supracitado são as informadas na tabela 13.

Tabela 13 – Propriedades de massa do modelo 2

Propriedade	Valor
Massa (g)	6,58
Volume (mm^3)	5022,60
Área de superfície (mm^2)	11025,53

O fatiamento do modelo seguiu os parâmetros de processo similares, assumidos no início do estudo de caso. A orientação da peça na plataforma de construção da máquina seguiu a mesma orientação do caso anterior para não interferir no resultado da análise. Como foi adotado parâmetros padrão, não é possível avaliar a variação dos parâmetros na análise da peça, e assim, não serão abordadas nessa seção. O intuito dessa análise é verificar a variação no tempo de fabricação e avaliar se será vantajoso (em termos de tempo). A preparação do modelo na mesa de impressão é apresentada na figura 55.

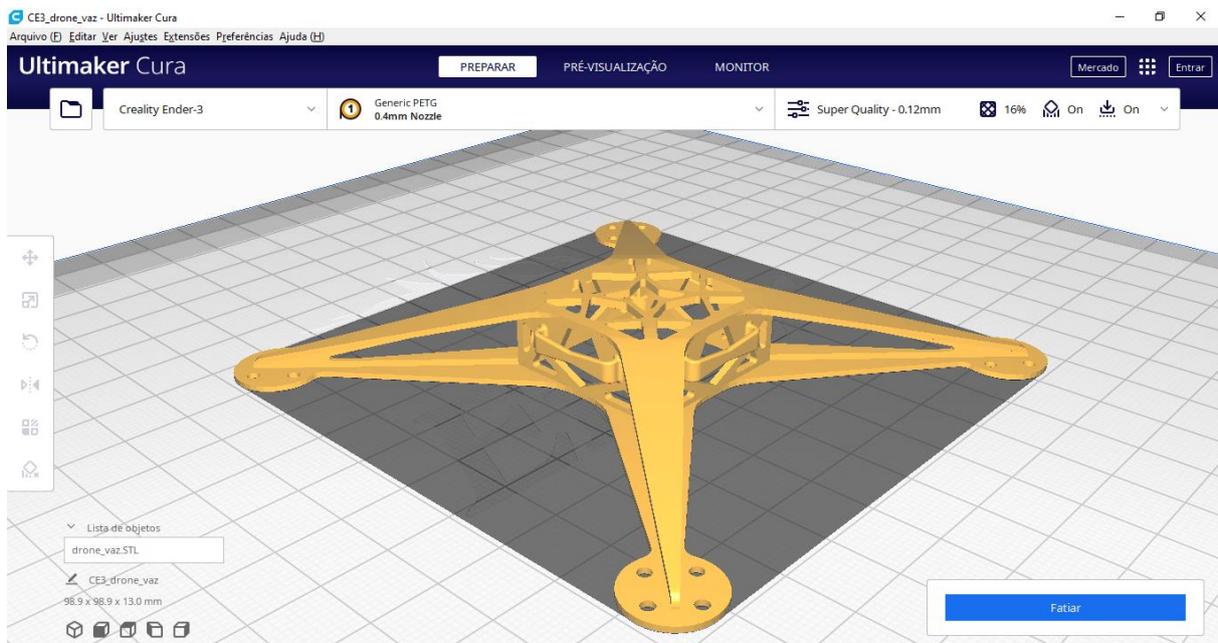


Figura 55 - Modelo sendo preparado no software de fatiamento UltiMaker Cura® - Autoria própria

A simulação gerada pelo software de fatiamento do modelo 2 é apresentada na figura 56. Foram utilizados os parâmetros padrão da máquina e na sua pré-visualização do fatiamento das camadas da peça, foram criados suportes de sustentação nas camadas com ângulos de balanço inferior a 45° e bordas (estrutura Brim), que é o aumento do raio do contorno da peça. Esse contorno é basicamente colocado na primeira camada da peça, proporcionando uma melhor aderência a superfície de impressão.

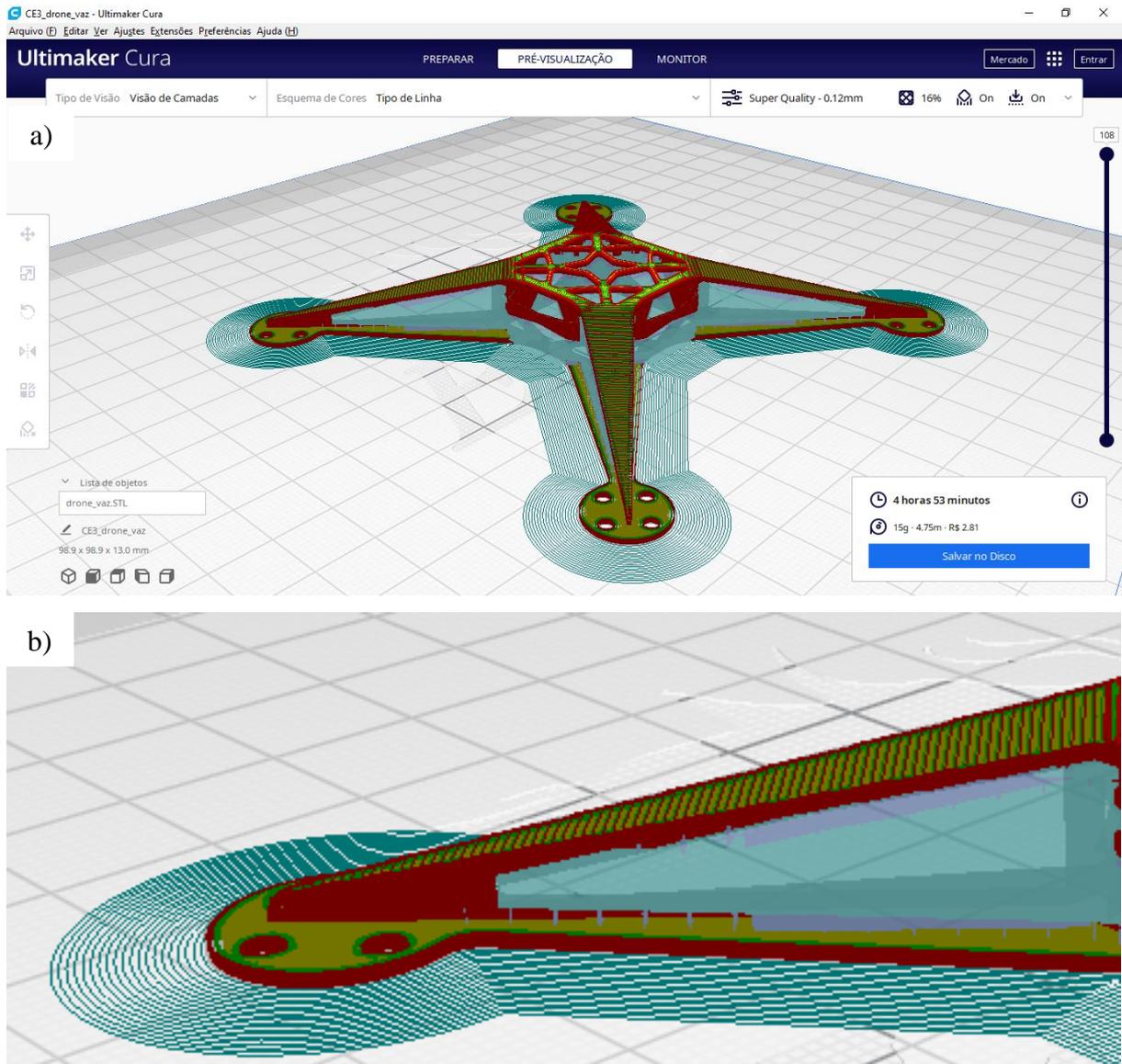


Figura 56 - Simulação do modelo no software de fatiamento - Autoria própria

Alguns pontos podem ser destacados sobre o modelo 2, ressaltando suas vantagens e limitações. Adotou-se esse segundo caso como uma possibilidade de solução de problema, a fim de encontrar a melhor distribuição de material na estrutura do drone. Essa nova geometria

aplicada foi pensada na mudança que a otimização topológica conduziria, nela apresenta uma suposta vantagem da redução de material na fabricação, no entanto, a implementação de braços vazados para geometria não é vantajosa. A redução de material no modelo é inadequada em termos de custo-benefício, devido a necessidade de aumentar a quantidade de suporte na produção da peça gerando mais custos. Conforme podemos visualizar no fatiamento do modelo 2, as regiões de maiores complexibilidades cresceram, gerando assim a necessidade de um aumento de material para suportes. Apesar do modelo possuir propriedades de massas inferior ao modelo 1, o tempo de fabricação gerado foi superior de 4 horas e 53 minutos.

5.4.3. Modelo com braços vazados reforçados

Nesse modelo adotou-se otimização em toda a geometria, reduzindo a quantidade de massa, não somente nos braços como o modelo anterior. Nessa geometria foram adotados reforços em seus rasgos, além da redução na cavidade central, diminuindo o peso e a massa no modelo CAD projetado. Também foi considerado todas as restrições de projeto DfAM, que possibilitasse a avaliação da geometria projetada utilizando o software de fatiamento UltiMaker Cura® para o processo FDM. A viabilidade levou em consideração as superfícies funcionais impostas pelos requisitos do produto, assim como o acabamento superficial da peça, além da redução do tempo de impressão e conseqüentemente o custo de fabricação. O modelo 3D da peça é apresentado na figura 57.

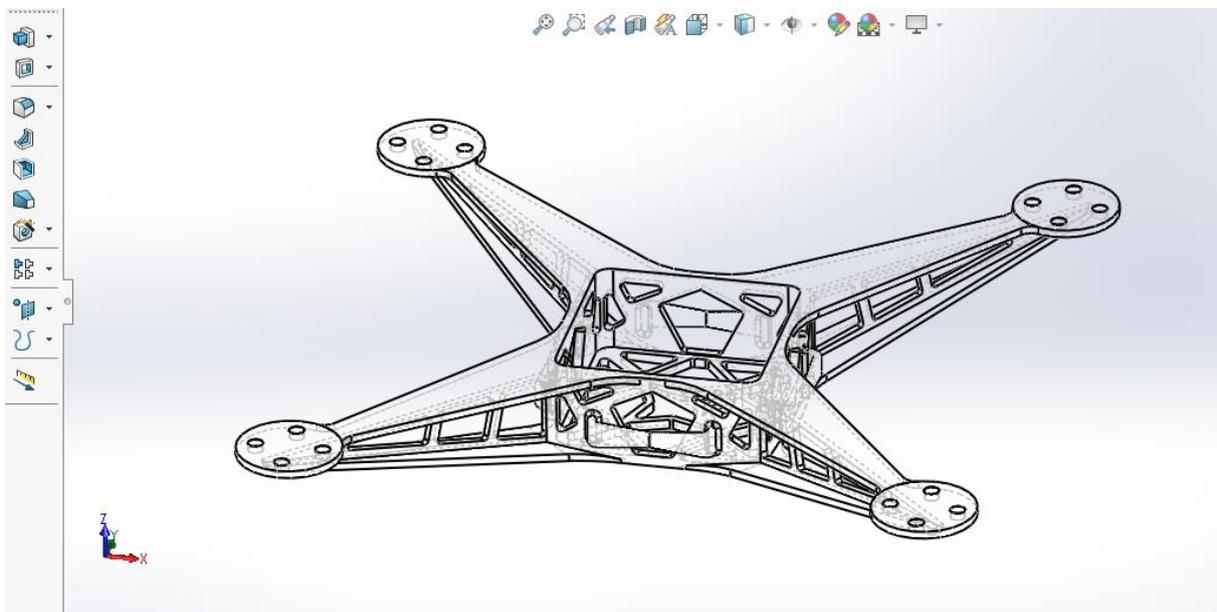


Figura 57 - Modelagem do drone com braços vazados reforçados (GRADCAB, 2017)

As propriedades de massa atribuídas ao modelo com braços vazados reforçados são as informadas na tabela 14.

Tabela 14 – Propriedades de massa do modelo 3

Propriedade	Valor
Massa (g)	6,66
Volume (mm^3)	5086,36
Área de superfície (mm^2)	11201,12

O fatiamento do modelo seguiu os parâmetros de processo já pré-estabelecidos, conforme realizado nos modelos anteriores. Após a importação do arquivo STL da peça, foi realizada o posicionamento da peça na plataforma de impressão seguindo a recomendação de adotar a maior área de contato entre a plataforma e a peça a ser impressa para melhor aderência, garantindo uma melhor compactação entre cada filamento. Na figura 58 é apresentada a preparação do modelo na mesa de impressão.

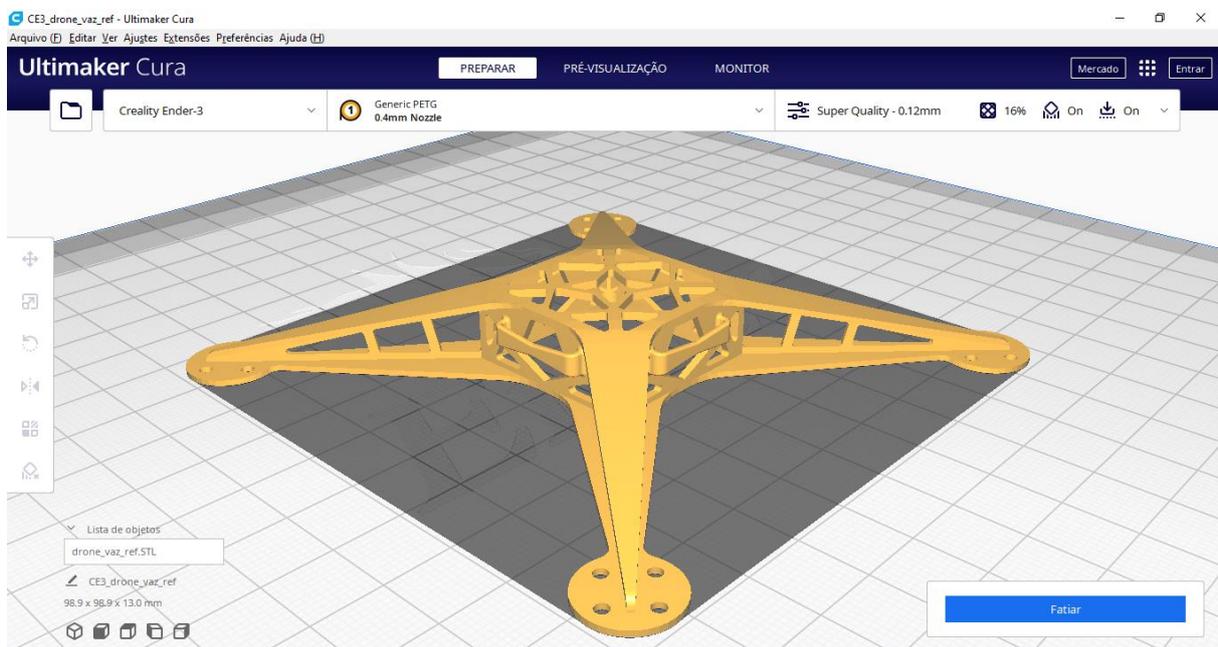


Figura 58 - Modelo sendo preparado no software de fatiamento UltiMaker Cura® - Autoria própria

A orientação de posicionamento da peça já foi definida na etapa anterior conforme apresentado na figura 58. Na realização do fatiamento das camadas, foram gerados suportes de forma automática pelo software de fatiamento UltiMaker Cura®. Além disso, o software gerou

a deposição de camadas de material entre a plataforma e a peça, para adesão da peça a plataforma, aumentando a confiabilidade do processo de fabricação. Esse processo de fatiamento pelo software Cura pode ser visualizado na figura 59.

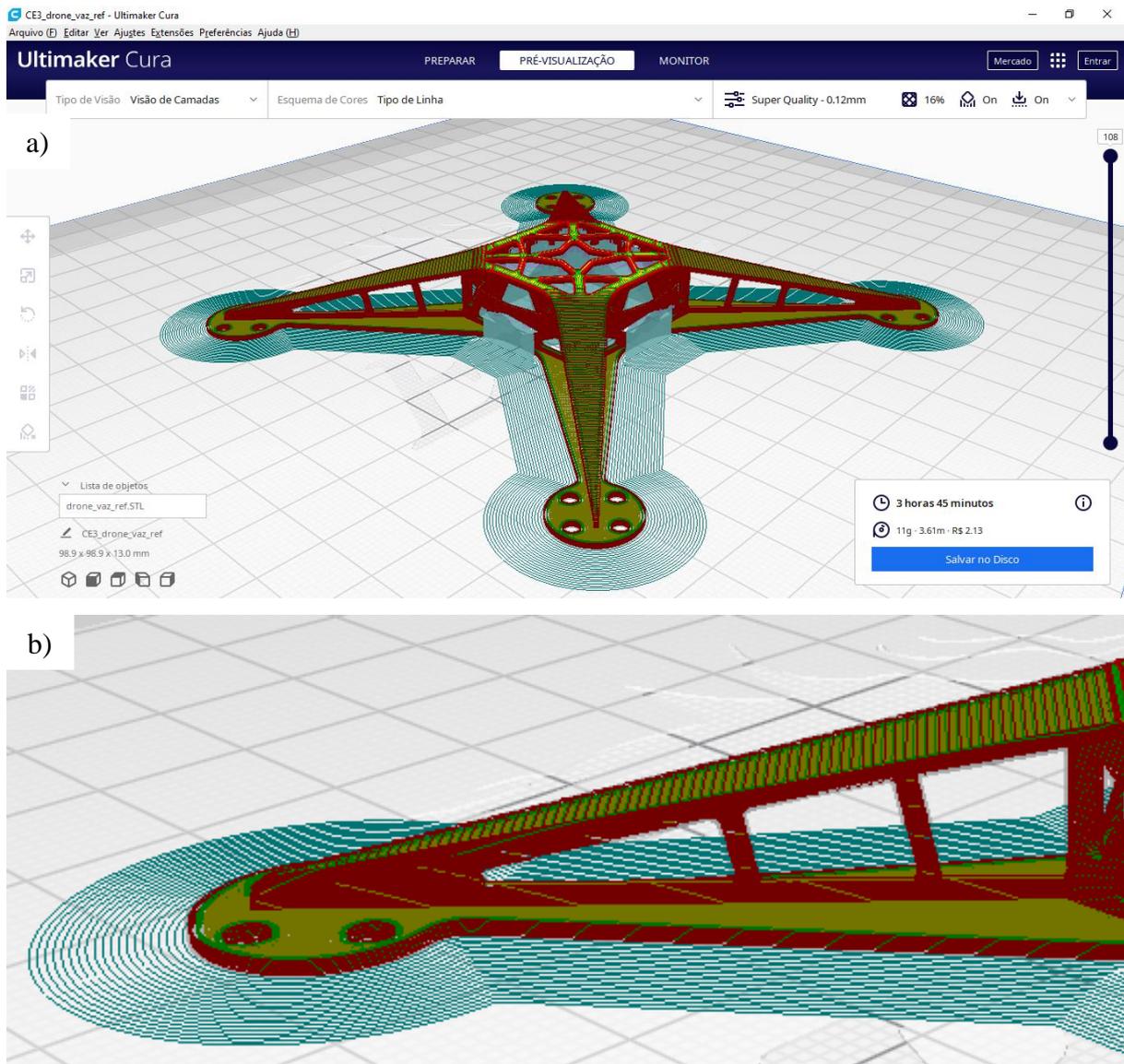


Figura 59 - Simulação do modelo no software de fatiamento - Autoria própria

O modelo 3 otimizado obtido na biblioteca GrabCAD (2017), apresentou vantagens em relação aos outros modelos anteriores para DfAM. Pela figura 59b é possível observar que as adaptações na modelagem dos braços aperfeiçoaram o projeto do modelo 3, devido aos reforços construídos entre os rasgos apresentados nesse modelo, dessa forma, a fatia inferior é capaz de suportar a fatia superior até uma distância de sua borda (largura máxima de autossuporte). Isso faz com que seja reduzida a necessidade de suporte durante a simulação de cada par de fatias, realizando a remoção da região de autossuporte entre elas, gerando economia e melhor

qualidade superficial. O fatiamento do modelo 3 reduziu as regiões de maior complexibilidade, obtendo um tempo de impressão inferior 2,6% em relação ao modelo 1 e 23% em comparação ao modelo 2 e apresentando um tempo de fabricação de 3 horas e 45 minutos.

5.4.4. Análise e discussões

Através dos fatiamentos realizados no software de simulação UltiMaker Cura®, obteve-se as respostas para os 3 modelos submetidos ao processo de Deposição de Material Fundido. A realização da análise de otimização de material no projeto para Manufatura Aditiva por simulação, apresentou resultado satisfatório, atestando a melhor escolha do modelo CAD adequado para MA, garantindo a viabilidade da peça, com a redução de pós-processamento, estruturas de suporte e custos gerais de fabricação. Os resultados da análise dos modelos de drone estão dispostos na tabela 15.

Tabela 15 – Resultados obtidos

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Massa (g)	7,91	6,58	6,66
Volume (mm ³)	5567,24	5022,60	5086,36
Área de superfície (mm ²)	11831,10	11025,53	11201,12
Tempo de fabricação (minutos)	231	293	225
Comprimento do filamento (m)	3,82	4,75	3,61
Quantidade de material necessária para fabricação (g)	12	15	11

Conforme podemos observar na tabela 15, apesar do modelo 3 originar uma peça com geometria de maior massa em relação ao modelo 2, ele obteve melhor resultado por precisar de menos material de suporte e por conseguinte, menos material e tempo necessário para sua fabricação.

6. CONCLUSÕES

O estudo abordou o projeto para manufatura aditiva de peças complexas como forma de melhorar a eficiência da peça a ser fabricada. Aprimoramentos como redução de quantidade de material a ser impresso e aumento da qualidade da superfície das peças são exemplos das vantagens do uso dessa técnica. A metodologia de projeto tem um importante potencial de auxiliar no processo de criação de estruturas que demandem melhor distribuição de material, conseqüentemente menos material, para uma mesma resistência, proporcionando um bom investimento para quem busca por soluções mais eficientes e econômicas.

A sinergia entre a otimização topológica e as tecnologias de manufatura aditiva demonstram como podemos aproveitar o potencial dessas duas tecnologias, a fim de criar estruturas inovadoras.

Mesmo sendo uma metodologia consolidada para fabricação de protótipos, a MA ainda não possui muita aplicação na produção final de peças. Isso se deve, por ser um processo que apresenta desvantagens em relação a outros processos tradicionais como baixa produtividade e alto custo, ou seja, sua aplicação é atualmente limitada a peças otimizadas e de alto valor agregado por apresentar grandes vantagens.

A otimização de parâmetros do equipamento foi apresentada nesse estudo como primordial para a produção eficiente através do processo de MA. O conhecimento desses parâmetros pelo engenheiro vai definir o sucesso do projeto e o melhor protótipo a ser produzido. Ele deve planejar conforme o processo e modelo de equipamento de MA. O uso de uma metodologia para a fabricação também é necessário, sua aplicação permite antecipar falhas e promover soluções adequadas a cada tipo de processo de acordo com a tecnologia de MA empregada.

A criação de estrutura de suporte para a produção de peças é uma etapa indispensável para várias tecnologias de fabricação aditiva. Essas estruturas permitem a sustentação para a construção adequada de uma peça, tendo grande impacto na eficiência e qualidade do produto final, principalmente no que se refere as propriedades mecânicas e quantidade de material utilizado, o que contribui para uma relação custo-benefício adequada conforme a opção de modelo selecionado. Devido a sua importância, a geração de estruturas de suporte é o propósito de vários estudos de otimização do processo de MA.

O software de fatiamento UltiMaker Cura® possibilita realizar inúmeras configurações de parâmetros. O domínio dos parâmetros da máquina faz com que otimize os perfis da melhor forma possível, com menor tempo e utilizando a menor quantidade de material com máxima

qualidade, contudo o foco do estudo de caso foi somente nas configurações geométricas das peças, mas novamente vale mencionar que, o conhecimento dos parâmetros do modelo de máquina utilizada é essencial na qualidade da peça, além de ganhar tempo melhorando o desempenho.

Em conclusão podemos perceber que existe uma relação entre as metodologias que tem maior liberdade em aplicar aspectos mais amplos da configuração do objeto possibilitando maiores reduções de massa, e as metodologias DfAM para atender essa liberdade de geometrias, porém com restrições que as tecnologias podem oferecer. Abrangendo as vantagens que a MA pode oferecer. O desenvolvimento da metodologia DfAM é importante para aumentar a assertividade, porém alguns pontos devem ser cuidadosamente verificados para que a metodologia se torne uma ferramenta que facilite o seu emprego na fabricação de peças otimizadas, e não apenas um trâmite a mais no desenvolvimento de novos projetos.

Também é possível observar neste trabalho, alguns indicadores no estudo de caso que possam vir a serem utilizados como forma de avaliação de projetos e auxílio na análise de viabilidade de cada peça. Dentre esses indicadores, pode-se medir com maior precisão através de softwares de fatiamento os tempos de fabricação, e ainda atingir uma melhor assertividade nas análises dos custos de projeto.

A metodologia apresentada para tecnologia FDM, mostrou-se satisfatória na aplicação, no entanto, para que ela tenha sucesso é fundamental que seja ajustada a cada caso e considerando as tecnologias de manufatura disponíveis. Por fim, é interessante expressar que o DfAM aplicado de forma incoerente, pode trazer complicações e conseqüentemente uma grande perda de tempo na concepção de peças, principalmente nas fases de projeto.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de simulações avançadas pelo método dos elementos finitos, a fim de avaliar as propriedades mecânicas da carcaça de drone como fadiga, flambagem, além de estabelecer o ciclo de vida da peça e as tensões que poderiam ser geradas pelos movimentos repetitivos feitos pelo drone.

Ainda no ramo da simulação, o software de fatiamento UltiMaker Cura®, assim como outros, realizam vários padrões de preenchimento: linear, casa de abelha, cruzado entre outros. Sendo assim, propõe-se uma análise para determinar qual o preenchimento tem a melhor relação de custo-benefício entre esses padrões e qual oferece a melhor resistência ou propriedades mecânicas que atendam os requisitos do projeto.

Outra sugestão é a aplicação de uma metodologia de sistemática para outros processos de manufatura aditiva, desenvolvendo especificações de projetos para mais tecnologias de MA.

REFERÊNCIAS

Durante desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas diferentes fontes, totalizando 130, divididas por ano, na tabela 16 e subdivididas em categorias na tabela 17:

Tabela 16 – Divisão por ano das fontes de pesquisa.

Ano	1975-1999	2000-2009	2010-2019	2020	2021	2022	2023
Fontes	9 (7%)	22 (17%)	81 (62%)	5 (4%)	6 (4,5%)	6 (4,5%)	1 (1%)

Tabela 17 – Divisão por categoria das fontes de pesquisa.

Fonte	Quantidade	Porcentagem
Artigos Científicos	54	41,5%
Catálogos, Manuais, Apostilas/Revistas e Normas	9	7%
Livros	48	37%
Teses, Dissertações e TCCs	6	4,5%
Notícias e Sites	13	10%

ADACHI, T; OSAKO, Y; TANAKA, M; HOJO, M; HOLLISTER, S.J. *Framework for optimal design of porous scaffold microstructure by computational simulation of bone regeneration*, 2006.

AHN, S. MONTERO, M; ODELL, D; ROUNDY, S; WRIGHT, P.K. *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. *Rapid Prototyping Journal*, v. 8, n. 4, p. 248–257, 2002.

ALI, F; CHOWDARY, B. V; MAHARAJ, J. *Influence of Some Process Parameters on Build Time, Material Consumption, and Surface Roughness of FDM Processed Parts: Inferences Based on the Taguchi Design of Experiments*. *Proceedings of The 2014 IACJ/ISAM Joint International Conference*, 2014.

ALKHATIB, F; MAHDI, E; CABIBIHAN, J. *Design and Analysis of Flexible Joints for a Robust 3D Printed Prosthetic Hand*, 2019.

ALL3DP. *Fusão Seletiva a Laser (SLM 3D Printing) – The Ultimate Guide*, 2022. Disponível em <https://all3dp.com/1/selective-laser-melting-guide/>

ALL3DP. *Suporte no Cura: como otimizar as configurações*, 2023. Disponível em: <https://all3dp.com/pt/2/cura-suporte-configuracao/>

ALMEIDA, V.S.; SIMONETTI, H.L.; NEVES, F. *Seleção de topologias ótimas de estruturas elásticas 2D com restrição de tensão*. 2014.

ALVES, T. C. *Dissertação de Mestrado - Proposta de uma Sistemática do Projeto para Manufatura Aditiva (DfAM) no Contexto de Desenvolvimento de Produtos*. Faculdade de Tecnologia – UnB, 2021.

AMFG. *Industrial Applications of 3D Printing: The Ultimate Guide*, 2020. Disponível em: <https://amfg.ai/industrial-applications-of-3d-printing-the-ultimateguide/>

ARC ADVISORY GROUP, *Siemens Additive Manufacturing at Hannover Fair*, 2018. Disponível em: <https://www.arcweb.com/blog/siemens-additive-manufacturinghannover-fair>

ASADOLLAHI-YAZDI, E.; GARDAN, J.; LAFON, P. *Integrated design for additive manufacturing based on skin-skeleton approach*. *Procedia CIRP, Elsevier*, v. 60, p.217–222, 2017.

- ATTARAN, M. *The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing*. *Business Horizons*, v. 60, n. 5, p. 677-688, 2017
- BAICH, L.; MANOGHARAN, G.; MARIE, H. *Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts*. *International Journal of Rapid Manufacturing*, v. 5, n. 3/4, p. 308, 2015
- BENDSOE, M. P. *Optimization of Structural Topology, Shape and Material*, 1995.
- BENDSOE, M. P.; SIGMUND, O. *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, 2004.
- BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHRYSOLOURIS, G. *Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 83, p. 389-405, 2016
- BORGES, M. M.; NAVEIRO, R. M. A projeção e as formas de representação do projeto. *Graf & Tec, Florianópolis*, v. 2, n. 1, p. 2, 1998.
- BOOTH, J. W; ALPEROVICH, J; CHAWLA, P; MA, J; REID, T. N; RAMANI, K. *The design for additive manufacturing worksheet*. *Journal of Mechanical Design, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, v. 139, n. 10, 2017.
- BOOTHROYD, G. *Product design for manufacture and assembly*. *Computer-Aided Design, Elsevier*, v. 26, n. 7, p. 505-520, 1994.
- BRAHMBHATT, N. P.; PATEL, V. V; BRAHMBHATT, M. P. *Optimization of Process Parameters of ABS Material Made by Fused Deposition Modeling - A Review*. *International Journal for Scientific Research & Development*, v. 3, n. 01, p. 230-233, 2015.
- BROMBERGER J.; KELLY R. *Additive Manufacturing: A long-term game change for manufacturers*, *Mckinsey Global Institute*, 2017.
- BROOKS, R. *GE, Siemens Invest, Re-Commit to Metal Manufacturing*. *Foundry*, 2016. Disponível em: <https://www.foundrymag.com/melt-pour/article/21928887/gesiemens-invest-recommit-to-metal-manufacturing>.
- BROWN, T.; KATZ, B. *Design Thinking: uma metodologia poderosa para decretar o fim das velhas ideias*. [S.l.]: Harper Business, 2019.
- CAVALCANTE, A. A; OLIVEIRA, N. B; ALFONZO, J. A. M; LIMA, M. V. E; PEPE, I. M. *Low Cost Tensile Testing Machine for FDM Parts Mechanical Behavior Characterization*. *ABCMI International Congress of Mechanical Engineering*. Curitiba, PR-Brazil: 2017.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. *Métodos numéricos para engenharia*. 7. ed. São Paulo, SP: McGraw-Hill, Inc., 2016. ISBN 9780073101569.
- CHEN, J; RUNGSIYAKULL, C; LI, W; CHEN, Y; SWAIN, M; LI, Q. *Multiscale design of surface morphological gradient for osseointegration*, 2013.
- CHOWDHURY, S; YADAVIAH, N; PRAKASH, C; RAMAKRISHNA, S; DIXIT, S; GUPTA, L; BUDDHI, D. *Laser Fusão de Leito em Pó: a state-of-the-art review of the technology, materials, properties & defects, and numerical modelling*, 2022.
- CHRISTIYAN, K. G. J.; CHANDRASEKHAR, U.; VENKATESWARLU, K. *A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 114, p. 012109, 2016.

CHRISTENSEN, P. W.; KLARBRING, A. *An Introduction to Structural Optimization*. Springer Science, 2009.

CHU, C.; GRAF, G.; ROSEN, D. W. *Design for additive manufacturing of cellular structures. Computer-Aided Design and Applications, Taylor & Francis*, v. 5, n. 5, p. 686–696, 2008.

CUSTOMPART.NET. *Fused Deposition Modeling (FDM)*. Disponível em: <https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>

DALY, S. R. et al. *Comparing ideation techniques for beginning designers. Journal of Mechanical Design, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, v. 138, n. 10, 2016.

DELGADO CAMACHO, D.; CLAYTON, P.; O'BRIEN, W. J.; SEEPERSAD, C.; JUENGER, M.; FERRON, R.; SALAMONE, S. *Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review. Automation in Construction*, vol. 89, p. 110–119, 2018.

DIEGEL, O.; NORDIN, A.; MOTTE, D. *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. [S.l.]: Springer, 2019.

DINAR, M.; ROSEN, D.W. *A design for additive manufacturing ontology. Journal of Computing and Information Science in Engineering, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, v. 17, n. 2, 2017.

EOS. *Ariane Group Future Ariane Propulsion Module Simplified*, 2021. Disponível em: <https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/all-3dprinting-applications/aerospace-additive-manufacturing-for-ariane-injection-nozzles>.

EXONE. *The Ultimate Guide: Binder Jet 3D Printing Metal for Manufacturing*, 2021. Disponível em <https://www.exone.com/de-DE/ExOne-Binder-Jet-3D-Printing-White-Paper>

FERNANDEZ-VICENTE, M; CALLE, W; FERRANDIZ, S; CONEJERO, A. *Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. 3D Printing and Additive Manufacturing*, v. 3, n. 3, p. 183–192, 2016

GARCIA-DOMINGUEZ, A.; CLAVER, J.; SEBASTIA´N, M. A. *Integration of additive manufacturing, parametric design, and optimization of parts obtained by fused deposition modeling (fdm). a methodological approach. Polymers, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 12, n. 9, p. 1993, 2020a.

GARCIA-DOMINGUEZ, A.; CLAVER, J.; SEBASTIA´N, M. A. *Optimization methodology for additive manufacturing of customized parts by fused deposition modeling (fdm). application to a shoe heel. Polymers, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 12, n. 9, p. 2119, 2020b.

GARCIA-COLOMO, A.; WOOD, D.; MARTINA, F.; WILLIAMS, S. *A comparison framework to support the selection of the best additive manufacturing process for specific aerospace applications. International Journal of Rapid Manufacturing, Underscience Publishers, UK*, p. 2, 2019

GEBHARDT, A; HÖTTER J.S. *Additive Manufacturing: 3D printing for Prototyping and Manufacturing*, Hanser Publish Munich 2016.

GIANNATIS, J; SOFOS, K; CANELLIDIS, V. KARALEKAS, D; DEDOISSIS, V. *Investigating the influence of build parameters on the mechanical properties of FDM parts, In proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping*, 525–529. 2012.

- GIBSON, I. et al. *Additive manufacturing technologies*. Springer, 2014.
- GIBSON, I. G. I. *Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. (S.l.): Springer, p. 4 e 205, 2015.
- GIBSON, I. G. I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2. ed. Nova Iorque: Springer, 2015
- GONABADI, H.; YADAV, A.; BULL, S. J. *The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 111, n. 3–4, p. 695–709, 2020.
- GOPSILL, J. A.; HICKS, B. J. *Deriving infill design of fused deposition modelled parts from predicted stress profiles*. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, v. 2A-2016.
- GÓRSKI, F; KUCZKO, W; HAMROL, A. *Computation of mechanical properties of parts manufactured by fused deposition modeling using finite element method*. In: SPRINGER. *10th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications*. [S.l.], 2015
- GRADCAD. *Library – Quadcopter Frame*. 2017. Disponível em: <https://gradcab.com/library/quadcopter-frame-10>
- GRADL, P. *Principles of Deposição por Energia Direta for Aerospace Applications*, 2021. Disponível em https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210000449/downloads/UTEP-Course%20-%20Principles%20of%20DED_Gradl_Jan2021.pdf
- GROOVER, M.; *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*, 4th ed. JOHN WILEY & SONS, INC., p.7, 2010.
- GUO, N; LEU, M; *Additive manufacturing: technology, applications and research needs*, P.216, 2013.
- HAFTKA, R.; GÜRDAL, Z. *Elements of Structural Optimization*. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- HASSANI, B; HINTON, E. *Homogenization and Structural Topology Optimization*. Theory, Practice and Software, Springer, London, 1999.
- HERZOG, D.; SEYDA, V; WYCISK, E; EMMELMANN, C; *Additive manufacturing of metals*, p. 371, 2016.
- HUTTON, D.V, *Fundamental of Finite Element Analysis*. McGraw Hill Companies, New York, 2004
- ISO/ASTM 17296-2:2015, *Additive manufacturing — General principles — Part 2: Overview of process categories and feedstock*.
- ISO 1056:1975. *International Organization for Standardization,: Numerically controlled machines*, ISO, 1975
- ISO/ASTM 52900:2015. *I. Additive Manufacturing - General Principles - Terminology*.
- ISO/ASTM 52910:2018. *Additive manufacturing Design Requirements, guidelines and recommendations*.

IVANOVA, O.; WILLIAMS, C.; CAMPBELL, T. *Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: Promises and challenges*. *Rapid Prototyping Journal*, v. 19, n. 5, p. 353–364, 2013.

KANG, H; LONG, J.P; GOLDNER, G.D.U; GOLDSTEIN, S.A; HOLLISTER, S.J. *A paradigm for the development and evaluation of novel implant topologies for bone fixation: implant design and fabrication*, 2012.

KIRSCH, U. *Structural optimization: fundamentals and applications*. Berlin: Springer, 1993.

KROG, L; TUCKER, A; ROLLEMA, G. *Application of Topology, Sizing and Shape Optimization Methods to Optimal Design of Aircraft Components*, 2002.

KRUEGER, H. *Standardization for Additive Manufacturing in Aerospace*, 2017.

KUMKE, M.; WATSCHKE, H.; VIETOR, T. *A new methodological framework for design for additive manufacturing*. *Virtual and Physical Prototyping*, Taylor & Francis, v. 11, p. 3–19, 2016.

LANES, R. M; GRECO, M. *Application of a topological evolutionary optimization method developed through python script*. *Ciência & Engenharia*: (Science & Engineering Journal, v. 22). ISSN 1983-4071, p. 11. 11 jun. 2013.

LANZOTTI, A; GRASSO, M; STAIANO, G; MARTORELLI, M. *The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer*. *Rapid Prototyping Journal*, v. 21, n. 5, p. 604–617, 2015.

LAVERNE, F.; SEGONDS, F; ANWER, N; LE COQ, M. *Assembly based methods to support product innovation in design for additive manufacturing: an exploratory case study*. *Journal of Mechanical Design, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, v. 137, 2015.

LEE, J.; HUANG, A. *Fatigue analysis of FDM materials*. *Rapid Prototyping Journal*, v. 19, n. 4, p. 291–299, 2013.

LEE, K; PARK, H; KIM, J; CHUN, D. *Fabrication of a superhydrophobic surface using a fused deposition modeling (FDM) 3D printer with poly lactic acid (PLA) filament and dip coating with silica nanoparticles*. *Applied Surface Science*, 2019.

LETTORI, J; RAFFAELI, R; PERUZZINI, M; SCHMIDT, J; PELLICIARI, M. *Additive manufacturing adoption in product design: an overview from literature and industry*. *Procedia Manufacturing*, 2020.

LIANG, Q.Q. *Performance-based Optimization of Structures: Theory and applications*, 2005, Spon Press, Londres.

LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. F. *Introdução A Otimização Estrutural*. Programa de Pós-graduação, 2013

LOTTI, R.S; MACHADO, W.M, MAZZIEIRO, E.T, JÚNIOR, J.L. *Aplicabilidade Científica do Método dos Elementos Finitos*, 2006.

MEHRPOUYA, M.; DEGHANGHADIKOLAEI, A.; FOTOVVATI, B.; VOSOOGHNIA, A.; EMAMIAN, S.; GISARIO, A. *The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: A review*. *Applied Sciences*, v. 9, p. 3865, 09 2019

MELO, L. M.; MERINO, E. A. D.; MERINO, G. S. A. D. *Uma revisão sistemática sobre design for X*. *Revista GEPROS*, v. 12, n. 4, p. 78, 2017.

METALAM. *Multi-axis metal Additive Manufacturing without support structures*, 2022. Disponível em <https://www.metal-am.com/multi-axis-metal-additive-manufacturing-without-support-structures/>

MOLITCH-HOU, M. *Overview of additive manufacturing process*, 2018.

MOREIRA, R. *Conceiving a non-contact Measurement System for the Polymer Temperature at the Nozzle Exit of a FDM 3D Printer*. Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, 2016.

NAVEIRO, R, M; OLIVEIRA, V, F. *Evolução e atualidade do projeto – O projeto de engenharia, arquitetura e desenho industrial: conceitos, reflexões, aplicações e formação profissional*. Juiz de Fora: Ed. UFJF, 2001.

NGO, D.T; KASHANI, A; IMBALZANO, G; NGUYEN, K. T. Q; HUI, D. *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. *Composites*, 2018.

NIETO, D.M; SÁNCHEZ, D.M. *Design for Additive Manufacturing: Tool Review and a Case Study*, 2021

NUNES, R. P.; BORGES, M. M. *Exercício acadêmico para o desenvolvimento de produtos de baixa complexidade*, Juiz de Fora, 2006.

OLIVEIRA, M. S. B; TEIXEIRA, M. S; MEDEIROS, K, P, F, M; REIS, R, B; BRAGA, I, P, C. *Projeto e desenvolvimento de um novo produto: anilha de encher*. XXXV Encontro Nacional De Engenharia De Produção: Perspectivas Globais para a Engenharia de Produção, Fortaleza, 2015

OLM, M; BADIA, S; MARTÍN, A. F. *On a general implementation of h- and p-adaptive curl-conforming finite elements*. *Advances in Engineering Software*, 2019.

PAKKANEN, J.A. *Design for additive manufacturing: Product and Process Driven Design for Metals and Polymers*. 2018.

PONCELET, F; FLEURY, C; REMOUCHAMPS, A; GRIHON, S. *TOPOL: a topological optimization tool for industrial design*, 2005.

PONCHE, R; KERBRAT, O; MOGNOL, P; HASCOET, J. *A novel methodology of design for additive manufacturing applied to additive laser manufacturing process*. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2014.

PRADEL, P. et al. *Investigation of design for additive manufacturing in professional design practice*. *Journal of Engineering Design*, Taylor & Francis, v. 29, n. 4-5, p. 165–200, 2018.

QUERIN, O; ALONSO, C; MARTÍ, P; VICTORIA, M; ANSOLA, R. *Topology Design Methods for Structural Optimization*. 2017.

REINHART, G; TEUFELHART, S. *Approach For Load-Adapted Optimization Of Generative Manufactured Lattice Structures*, 2011.

REINHART, G; TEUFELHART, S; OTT, M; SCHILP, J. *Potentials of Generative Manufactured Components for Gaining Resource Efficiency of Production Facilities*, 2010.

REZAIIE, R; BADROSSAMAY, M; GHAIE, A. *Topology Optimization for Fused Deposition Modeling Process*, 2013.

RODRIGUES, V. P.; ZANCUL, E. S.; MANÇANARES, C. G.; GIORDANO, C. M.; SALERNO, M. S. *Manufatura Aditiva: Estado da Arte e Framework de Aplicações*. GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Bauru, ano 12, nº 3, jul-set/2017, p. 1-34,2017.

ROSEN, D. W. *A review of synthesis methods for additive manufacturing*. *Virtual and Physical Prototyping*, Taylor & Francis, v. 11, n. 4, p. 305–317, 2016.

ROZENFELD, H; AMARAL, D.C. *Gestão de projetos em desenvolvimento de produtos*, 2006.

ROZVANY, G. I. N. *A critical review of established methods of structural topology optimization*, 2009, Hungary.

SAJJAD, R; BUTT, S.U; MAHMOOD, K; SAEED, H.A. *Investigating the Impacts of Heterogeneous Infills on Structural Strength of 3D Printed Parts*. *Key Engineering Materials*, v. 799, p. 276–281, 2019.

SANTHAKUMAR, J.; MOHAMMED IQBAL, U. M.; PRAKASH, M. *Investigation on the effect of tensile strength on fdm build parts using taguchi-grey relational based multiresponse optimization*. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, v. 8, n. 12, p. 53–60, 2017.

SMYTH, C. *Functional Design for 3D Printing. Designing Printed Things for Everyday Use Third Revised Edition*, 2017.

SHI, L; LI, H; FOK, A.S.L; UCER, C; DEVLIN, H; HORNER, K. *Shape optimization of dental implants*, 2007.

SHIGLEY, J. E., BUDYNAS, R. G., KEITH, J. N. *Elementos de máquinas*. 10 ed. McGraw Hill, 2016.

SIGMUND O. *Topology optimization: a tool for the tailoring of structures and materials*, 2000.

SIGMUND, O; BENDSOE, M.P. *Topology optimization from airplanes to nanooptics*, 2004.

SILVA, E.C.N. *Técnicas aplicadas ao projeto de peças mecânicas*. Máquinas e metais, 2002.

SIMONETTI, H. L.; ALMEIDA, V. S.; ASSIS, F. N.; NETO, L. O. *Otimização Topológica e uma nova abordagem de criação de cavidades*. XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE). Brasília, DF, Brasil. Novembro, 6-9, 2016.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. *Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method*. *Materials and Design*, v. 30, n. 10, p. 4243–4252, 2009.

SREEDHAR, P.; MATHIKUMARMANIKANDAN, C.; JOTHI, G. *Experimental Investigation of Surface Roughness for Fused Deposition Modeled Part with Different Angular Orientation*. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, v. 5, n. 3, p. 21–28, 2012.

STURM, S; ZHOU, S; MAI, Y; LI, Q. *On stiffness of scaffolds for bone tissue engineering—a numerical study*, 2010.

SUTRADHAR, A; PARK, J; CARRAU, D; NGUYEN, T.H; MILLER, M.J; PAULINO, G.H. *Designing patient-specific 3D printed craniofacial implants using a novel topology optimization method*, 2016.

SVETLIZKY, D; DAS, M; ZHENG, B; VYATSKIKH, A; BOSE, S; BANDYOPADHYAY, A; SCHOENUNG, J; LAVERNIA, E; ELIAZ, N. *Deposição por Energia Direta (DED) aditive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications*, 2021.

THOMPSON, M.K; MORONI, G; VANEKER, T; FADEL, G; CAMPBELL, R.I; GIBSON, I; BERNARD, A; SCHULZ, J; GRAF, P; AHUJA, B; MARTINA, F. *Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints*. 2016.

TOFAIL, S. A.; KOUMOULOS, E. P.; BANDYOPADHYAY, A.; BOSE, S; ODONOGHUE, L; CHARITIDIS, C. *Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities*. *Materials today*, v. 21, n. 1, p. 22-37, 2018

TORRES, J. COLE, M; OWJI, A; DEMASTRY, Z. *An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments*. *Rapid Prototyping Journal*, v. 22, n. 2, p. 387–404, 2016.

ULRICH, K.T; EPPINGER, S.D. *Product Design and Development*, 2011.

ULTIMAKER. *Support settings*. 2022. Disponível em: <https://support.ultimaker.com/s/article/1667417606331>

VAROTSIS, A.B. *Introduction to material jetting. 3D printing.Hubs*, 2022. Disponível em: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing>

VDI 2221. *Methodik zum entwickeln und konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1985.

VOLPATO, N. *Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*. Editora Blucher, 2007.

VOLPATO, N; MUNHOZ, A.L.J; COSTA, C.A; AHRENS, C.H. CARVALHO, J; SANTOS, J.R.; SILVA, J.V.L; FOGGIATTO, J.A; LIMA, M.S.F. *Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo: Blucher, 2017.

YANG, S.; TANG, Y.; ZHAO, Y. F. *A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing*. *Journal of Manufacturing Processes, Elsevier*, v. 20, p. 444–449, 2015.

YANG, S.; ZHAO, Y. F. *Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 80, n. 1-4, p. 327–342, 2015.

YARDIMCI, M.A; GUCERI, S.L; DANFORTH, S.C; AGARWALA, M. *Part Quality prediction tools for fused deposition processing – Proc. Of Solid Freeform Fabrication Symp, Aug. Austin.p539-548*. 1996.

WANG, J. Y; XU, D. D; SUN, W; DU, S. M; GUO, J. J; XU, G. J. *Effects of nozzle-bed distance on the surface quality and mechanical properties of fused filament fabrication parts*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 479, n. 1, 2019.

WIBERG, A.; PERSSON, J.; OLVANDER, J. *Design for additive manufacturing—a review of available design methods and software*. *Rapid Prototyping Journal, Emerald Publishing Limited*, 2019.

WU, W; YANG, D.Z; HUANG, Y.Y; QI, M; WANG, W.Q. *Topology optimization of a novel stent platform with drug reservoirs*, 2008.

ZHAI, Y.; LADOS, D. A.; LAGOY, J. L. *Additive manufacturing: making imagination the major limitation. Jom*, Springer, v. 66, n. 5, p. 808, 2014.

ZHANG, M. Y. *Understanding additive manufacturing part performance through modeling and laboratory experiments. 122nd ASEE Annual Conference & Exposition, n. December 2007*, 2015

ZHANG, Y; JAROSINKI, W; JUNG, Y; ZHANG, J. *Additive manufacturing processes and equipment*, 2018

ZHONG, Z; WEI, S; WANG, J; FENG, C; CHEN, C; YU, C. *Finite element analysis of the lumbar spine with a new cage using a topology optimization method*, 2006.

ZIEMIAN, C.; SHARMA, M.; ZIEMI, S. *Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling. In: Mechanical Engineering*. 2012.