



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PROPOSTA DE UMA SISTEMÁTICA DO PROJETO PARA
MANUFATURA ADITIVA (DFMA) NO CONTEXTO DE
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS**

TIAGO CAMARGO ALVES

Brasília, Abril de 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROPOSTA DE UMA SISTEMÁTICA DO PROJETO PARA
MANUFATURA ADITIVA (DFMA) NO CONTEXTO DE
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS**

TIAGO CAMARGO ALVES

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
SISTEMAS MECATRÔNICOS**

APROVADA POR:

Profa. Dra. Andréa C. dos Santos, PPMEC/UnB
Orientadora

Prof. Dr. Jones Yudi Mori Alves da Silva,
PPMEC/UnB
Membro Interno

Profa. Dra. Dianne Magalhães Vianna, ENM/UnB
Membro Externo

Brasília/DF, 14 de Abril de 2021

Alves, Tiago

Proposta de uma sistemática do projeto para manufatura aditiva (DfMA) no contexto de desenvolvimento de produtos / TIAGO CAMARGO ALVES. –Brasil, 2021.

289p.

Orientador: Andréa Cristina dos Santos

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade de Tecnologia – FT

Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos – PPMEC, 2021.

1. Manufatura Aditiva. 2. Desenvolvimento de Produto. 3. Projeto para Manufatura Aditiva. 4. Processo de Projeto de Produto. 5. Indústria 4.0. I. Andréa Cristina dos Santos, orientadora. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade de Tecnologia.

Dedicatória

Dedicado à meus pais, que sempre me apoiaram em todas decisões e me guiaram no meu caminho

TIAGO CAMARGO ALVES

Agradecimentos

Inicialmente à toda minha família que me apoia desde meus primeiros minutos de vida. Em seguida agradeço à Profa. Andrea C. dos Santos, que me ajudou durante o desenvolvimento de todo trabalho e demonstrou paciência e compreensão nos percalços do caminho. Por último agradeço à toda equipe da Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos LTDA, que me suportou durante todo estresse de desenvolvimento da dissertação, apoiando nos momentos difíceis e comemorando nas realizações. Em especial aos meus companheiros de desenvolvimento mecânico.

TIAGO CAMARGO ALVES

RESUMO

Esta dissertação trata do desenvolvimento de uma sistemática de projeto para adoção da Manufatura Aditiva (MA) como processo de fabricação de produtos finais. A MA é definida pela norma ISO/ASTM 52900:2015 como o processo de unir materiais para fabricar peças a partir de um modelo 3D, usualmente camada sobre camada. As diferentes oportunidades de projeto propiciadas pela MA oferecem vantagens em relação às tecnologias de fabricação existentes, porém, também cria barreiras na utilização da mesma, tendo em vista que novas formas de projetar e caracterizar peças devem acompanhar seu desenvolvimento. Apesar de ser estabelecida para o desenvolvimento de protótipos, a fabricação de produtos finais à partir da MA é ainda incipiente na indústria. A falta de um processo de desenvolvimento de produtos baseado nas características da MA é um dos principais motivos para a não adoção em ampla escala como meio de produção. Na área de desenvolvimento de produtos existem metodologias e normas para o processo de projeto, com fases e etapas de projeto definidas, que apesar de serem iterativas, demandam custos para alteração de decisões realizadas ao longo do desenvolvimento. As teorias clássicas de desenvolvimento de produto apresentam etapas e processos que não possuem sinergia com cadeias virtuais de desenvolvimento de produtos, intrínseca dos processos de MA, e a fabricação por camadas apresenta decisões de projeto que devem ser tomadas de forma preliminar quando comparada com processos tradicionais de fabricação. Abordando as deficiências de metodologias de desenvolvimento de produtos clássicas aplicadas para processos de MA propõem-se uma sistemática com etapas e fases adaptadas para otimizar o desenvolvimento voltado para fabricação aditiva. Explorando as vantagens de projeto propiciadas pela MA e propondo uma sistemática de desenvolvimento de produtos otimizada. Para tanto, uma análise dos processos é desenvolvida com objetivo de identificar decisões de projeto e boas práticas de modelagem e fabricação de peças, baseadas principalmente em análises de funcionalidade e otimização do processo de manufatura. Estudos de caso foram realizados para aplicação da MA na indústria automotiva, mais especificamente para veículos elétricos de duas rodas desenvolvidos para mobilidade urbana. O estudo de caso permitiu a avaliação da sistemática desenvolvida para produtos de uso final. A análise dos produtos desenvolvidos demonstrou as vantagens da aplicação da MA para produtos finais quando estabelecidas métricas de viabilidade desde etapas iniciais do desenvolvimento.

ABSTRACT

This work deals with the development of a project systematic for the adoption of Additive Manufacturing (MA) as a manufacturing process for final products. MA is defined by ISO / ASTM 52900: 2015 as the process of joining materials to manufacture parts from a 3D model, usually layer upon layer. The different design opportunities provided by MA offer advantages over existing manufacturing technologies, however, it also creates barriers in the use of it, considering that new ways of designing and characterizing parts must accompany its development. Despite being established for the development of prototypes, the manufacture of final products from MA is still incipient in the industry. The lack of a product development process based on the characteristics of MA is one of the main reasons for the non-adoption on a large scale as a means of production. In the product development area, there are methodologies and standards for the design process, with defined design phases and stages, which despite being iterative, demand costs for altering decisions made during development. The classic theories of product development present stages and processes that do not have synergy with virtual product development chains, intrinsic to the MA processes, and the layered manufacturing presents design decisions that must be made in a preliminary manner when compared to traditional manufacturing processes. Addressing the shortcomings of classic product development methodologies applied to MA processes, a system with steps and phases adapted to optimize the development aimed at additive manufacturing is proposed. Exploring the design advantages provided by MA and proposing an optimized product development system. For this purpose, an analysis of the processes is developed in order to identify design decisions and good practices for modeling and manufacturing parts, based mainly on functional analysis and optimization of the manufacturing process. Case studies were carried out for the application of MA in the automotive industry, more specifically for two-wheel electric vehicles developed for urban mobility. The case study allowed the evaluation of the system developed for end-use products. The analysis of the developed products demonstrated the advantages of applying the MA for final products when viability metrics were established from the initial stages of development.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIACÕES	x
1 Introdução	1
1.1 Objetivos da Dissertação	3
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos.....	3
1.2 Estrutura da Dissertação.....	3
2 Fundamentação Teórica	5
2.1 Manufatura Aditiva	5
2.1.1 Normas e Regulamentações	7
2.1.2 Tecnologias de MA	9
2.1.3 Cadeia Digital de Fabricação por MA.....	12
2.2 Processo de Desenvolvimento de Produtos	15
2.3 Projeto para X.....	21
2.3.1 Projeto para Manufatura e Montagem.....	22
2.4 Projeto para Manufatura Aditiva	24
3 Proposta de um Processo de Desenvolvimento de Produto para Manufatura Aditiva	30
3.1 Metodologia de pesquisa	30
3.2 Sistemáticas de projeto para Manufatura Aditiva	33
3.3 Análise dos processos de projeto	61
3.4 Desenvolvimento de Processo de Projeto de Produto para MA.....	64
3.4.1 Análise de Viabilidade	68
3.4.2 Projeto para Funcionalidade	72

3.4.3	Definições do Processo	74
3.4.4	Fabricação e Validação de Produto	77
3.4.5	Análise de reprodutibilidade.....	78
4	Aplicação de Sistemática para Fabricação por Filamento Fundido	81
4.1	Análise do processo de FFF	82
4.2	Avaliação por etapas da sistemática	89
4.2.1	Validação preliminar	89
4.2.2	Projeto para Funcionalidade	90
4.2.3	Definições do Processo	92
4.2.4	Fabricação e Avaliação de Produto	98
5	Estudo de Caso	101
5.1	Envólucro para bateria	102
5.1.1	Análise de Viabilidade	103
5.1.2	Projeto para funcionalidade.....	104
5.1.3	Definições do Processo	107
5.1.4	Fabricação e Validação de Produto	109
5.1.5	Análise de reprodutibilidade.....	110
5.2	Fixação da linha de freio	111
5.2.1	Análise de Viabilidade	111
5.2.2	Projeto para funcionalidade.....	112
5.2.3	Definições do Processo	115
5.2.4	Fabricação e Validação de Produto	116
5.2.5	Análise de reprodutibilidade.....	117
5.3	Envólucro de proteção para PCB.....	117
5.3.1	Definições do Processo	119
5.3.2	Análise de reprodutibilidade.....	123
6	Conclusões.....	125
6.1	Trabalhos futuros.....	128
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
7	ANEXO 1.....	135

LISTA DE FIGURAS

2.1	Classificação de Processos de MA. Fonte: Rodrigues et al. (2017)	10
2.2	Processos físicos e virtuais para manufatura aditiva. Fonte: (THOMPSON et al., 2016)	13
2.3	Célula de manufatura para MA. Fonte:Paritala, Manchikarla e Yarlagadda (2017) ..	15
2.4	Sistemática para desenvolvimento de produto - VDI 2221 Fonte:Kumke, Watschke e Vietor (2016)	18
2.5	Estrutura Funcional. Fonte:Rozenfeld e Amaral (2006)	20
2.6	Apresentação de entregas por fases do Processo de Desenvolvimento de Produtos. Fonte:Rozenfeld e Amaral (2006).....	21
2.7	Grupos de desenvolvimento de DfMA. Fonte:Kumke, Watschke e Vietor (2016), com adaptações	26
3.1	Relação entre processo, estrutura, propriedade e comportamento Fonte:Rosen (2007)	34
3.2	Processo de projeto de produto. Fonte:Rosen (2007).....	34
3.3	Processo de projeto de produto. Fonte:Ponche et al. (2012)	36
3.4	Processo de projeto de produto. Fonte: Boyard et al. (2014)	38
3.5	Análise funcional. Fonte: Boyard et al. (2014)	38
3.6	Metodologia de DfMA. Fonte: Ponche et al. (2014).....	40
3.7	Metodologia de otimização para trajetórias de fabricação. Fonte: Ponche et al. (2014)	41
3.8	Metodologia de processo para consolidação de componentes. Fonte: Yang, Tang e Zhao (2015).....	42
3.9	PDP-MA Fonte: Kumke, Watschke e Vietor (2016)	45
3.10	Lógica relacional de ontologia para DFMA (sentido de leitura à direita e acima). Fonte: Dinar e Rosen (2017)	47
3.11	Mapa de vantagens propiciadas pela MA. Fonte: Zaman et al. (2018).....	48
3.12	Metodologia de processo para manufatura aditiva. Fonte: Zaman et al. (2018)	49
3.13	Exemplo de processo de qualificação para MA. Fonte: Michopoulos, Steuben e Iliopoulos (2018)	50
3.14	Processo de projeto baseado em regiões características. Fonte: Li et al. (2019)	52

3.15	Processo de projeto baseado no estado da arte identificado pelos autores. Fonte: Wiberg, Persson e Ölvander (2019).....	52
3.16	Processo de projeto do início da etapa de projeto conceitual Fonte: Rohde et al. (2019)	54
3.17	Projeto detalhado adaptado para AM. Fonte:Rohde et al. (2019).....	55
3.18	Processo completo de projeto de componentes para AM. Fonte:Rohde et al. (2019)	57
3.19	Processo de projeto utilizando estruturas celulares não homogêneas. Fonte:Zhu et al. (2020)	57
3.20	Hierarquia de projeto. Fonte:Renjith, Park e Kremer (2020)	58
3.21	Sistemática de projeto para MA baseada na metodologia Agile. Fonte:Reichwein et al. (2020)	60
3.22	Sistemática de projeto para MA. Fonte:Vaneker et al. (2020)	62
3.23	Fases de desenvolvimento abarcadas nas publicações selecionadas. Fonte: Autoria própria	63
3.24	Ferramentas de desenvolvimento de produto utilizadas nas publicações selecionadas. Fonte: Autoria própria	66
3.25	Processo de desenvolvimento de produto voltado para MA. Fonte: Autoria Própria	69
4.1	Processo de FFF decomposto em etapas macro. Fonte: Autoria Própria	83
4.2	Etapa de processamento. Fonte: Autoria Própria	83
4.3	Processo de Extrusão. Fonte: Autoria Própria	84
4.4	Etapa de alimentação de filamento no processo de extrusão. Fonte: Autoria Própria	85
4.5	Etapa de aquecimento no processo de extrusão. Fonte: Autoria Própria	86
4.6	Etapa de conformação no processo de extrusão. Fonte: Autoria Própria	87
4.7	Etapa de movimentação e deposição no processamento. Fonte: Autoria Própria.....	88
4.8	Processo para análise por elementos finitos para processo de LENS. Fonte: Stender et al. (2018).	94
4.9	Exemplo de ensaio por Elementos Finitos de peça discretizada a partir de trajetórias. Fonte: Górski et al. (2015).....	95
4.10	Visualização de processo sem suportes. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos Ltda	97
4.11	Visualização de processo com suportes. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos Ltda	98
5.1	Análise funcional do envólucro de bateria. Fonte: Autoria Própria.....	104
5.2	CAD de case de bateria. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos LTDA.....	106
5.3	Otimizações do envólucro de bateria baseado no processo de FFF. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos LTDA.....	107

5.4	Visualização de processos de fabricação para envólucro de bateria. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos LTDA.	108
5.5	Detalhes de otimização do processo para envólucro de bateria. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos LTDA.	109
5.6	Tampa do envólucro impressa e acabada. Fonte: Autoria própria	109
5.7	Envólucro de bateria montado. Fonte: Autoria própria	110
5.8	Análise funcional do conjunto de fixação da linha de freio. Fonte: Autoria Própria.	113
5.9	Ilustração da utilização do conjunto de travas. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos LTDA.	113
5.10	Conceitos para presilhas de linha de freio. Fonte: Autoria Própria	114
5.11	Visualização dos processo para presilhas de freio Fonte: Autoria Própria.	115
5.12	Presilha de freio instalada no veículo. Fonte: Autoria Própria	117
5.13	Visualização de processo para cinco conjuntos de presilhas de freio Fonte: Autoria Própria	118
5.14	CAD para envólucro de PCB baseado nas restrições de projeto. Fonte: Autoria própria.....	119
5.15	Detalhe de batente para PCB. Fonte: Autoria Própria	120
5.16	Detalhe de trava para PCB. Fonte: Autoria Própria	120
5.17	CAD de modelo final de envólucro para PCB. Fonte: Autoria Própria	121
5.18	Ilustração da montagem do envólucro da PCB na motocicleta Fonte: Autoria Própria	122
5.19	Fatiamento de envólucro para PCB. Fonte: Autoria Própria.....	123
5.20	Modelo final do envólucro de PCB manufaturado. Fonte: Autoria Própria	123

LISTA DE QUADROS

3.1	Análise publicação Rosen (2007) e Chu, Graf e Rosen (2008)	35
3.2	Análise publicação Ponche et al. (2012)	37
3.3	Análise publicação Boyard et al. (2014)	39
3.4	Análise publicação Ponche et al. (2014)	42
3.5	Análise publicação Yang, Tang e Zhao (2015)	43
3.6	Análise publicação Kumke, Watschke e Vietor (2016)	46
3.7	Análise publicação Dinar e Rosen (2017)	47
3.8	Análise publicação Zaman et al. (2018)	50
3.9	Análise publicação Michopoulos, Steuben e Iliopoulos (2018)	51
3.10	Análise publicação Li et al. (2019)	53
3.11	Análise publicação Wiberg, Persson e Ölvander (2019)	53
3.12	Análise publicação Rohde et al. (2019)	56
3.13	Análise publicação Zhu et al. (2020)	56
3.14	Análise publicação Renjith, Park e Kremer (2020)	58
3.15	Análise publicação García-Dominguez, Claver e Sebastián (2020a) e García-Dominguez, Claver e Sebastián (2020b)	59
3.16	Análise publicação Reichwein et al. (2020)	60
3.17	Análise publicação Reichwein et al. (2020)	63
3.18	Vantagens e oportunidades da MA	71
3.19	Considerações de Projeto para MA	73
3.20	Fluxo de pós-processamento em função da categoria de MA. Fonte: Diegel, Nordin e Motte (2019) com adaptações	79
4.1	Características do processo para definição de viabilidade. Fonte: Diegel, Nordin e Motte (2019) com adaptações	90
4.2	Características de projeto para FFF. Fonte: Autoria própria	91
4.3	Referências de guias para resolução de problemas de fabricação por FFF. Fonte: Autoria própria	99

LISTA DE TABELAS

2.1	Itens em trabalho por sub-comitê da ASTM-F42. Fonte: ASTM.....	8
2.2	Itens em trabalho do sub-comitê ASTM-F42.02 - Projeto. Fonte: ASTM	9
2.3	Tecnologias de MA. Fonte: ISO/ASTM 52900:2015.....	11
2.4	Fatores de comparação entre processos	11
2.5	Possíveis X-bilidades	23
3.1	Termos utilizados para pesquisa	31
3.2	Publicações na base Science Direct por ano	31
3.3	Qualificação baseada em percentil do Scopus	32
3.4	Tabela de fatores de impacto por revista	32
3.5	Ferramentas de desenvolvimento de produto identificadas. Fonte: Autoria própria .	65
3.6	CrITÉrios para determinar aplicaÇão estrutural. Fonte: Russell (2018), com adaptaÇões.	72
4.1	Principais parâmetros do processo de FFF. Fonte: Autoria própria	96
5.1	Tabela de Propriedades dos Insumos	102
5.2	Conceitos para envólucro de bateria	105
5.3	Processos para fabricaÇão da presilha de fixaÇão na coluna de direÇão	116

LISTA DE ABREVIACÇÕES

AMF Formato para Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing Format*)

ASTM Sociedade Americana de Testes e Materiais (*American Society for Testing and Materials*)

BOM Lista de Componentes (*Bill Of Materials*)

CAD Projeto Assistido por Computador (*Computer Aided Design*)

CAM Manufatura Assistida por Computador (*Computer Aided Manufacturing*)

CAE Engenharia Assistida por Computador (*Computer Aided Engineering*)

DfA Projeto para Montagem (*Design for Assembly*)

DfM Projeto para Manufatura (*Design for Manufacturing*)

DfX Projeto para X (*Design for X*)

DfMA Projeto para Manufatura Aditiva

FFF Fabricação por Filamento Fundido

IPPD Processo Integrado de Desenvolvimento de Produtos (*Integrated Product and Process Development*)

ISO Organização Internacional de Normatização (*International Organization for Standardization*)

JIF Fator de Impacto de Periódico (*Journal Impact Factor*)

MA Manufatura Aditiva

MEF Método de Elementos Finitos

PDP Processo de Desenvolvimento de Produto

PDP-MA Processo de Desenvolvimento de Produto para Manufatura Aditiva

SLS Sinterização Seletiva à Laser (*Selective Laser Sintering*)

STL Linguagem de Tesselação Padrão (*Surface Tessellation Language*)

VDI Associação de Engenheiros Alemães (*Verein Deutscher Ingenieure*)

Capítulo 1

Introdução

Manufatura Aditiva (MA) especifica um grupo de tecnologias utilizadas para fabricação de geometrias tridimensionais à partir de seus modelos digitais, por meio do acúmulo seletivo de material, camada por camada (RENJITH; PARK; KREMER, 2020). A norma ISO/ASTM 52900:2015 estabelece como um processo antagônico aos métodos subtrativos, como usinagem e eletroerosão.

O processo de fabricação aditiva parte de um modelo em ferramenta de Projeto Auxiliado por Computador (CAD, do inglês *Computer Aided Design*) e as converte em “fatias” finas que contêm informações de cada camada a ser impressa. O objeto é então construído por um maquinário específico, uma fatia de cada vez, com cada fatia subsequente construída sobre anteriores (RENJITH; PARK; KREMER, 2020).

Partindo das diferenças no processo de formação de geometrias, a MA abre oportunidades para projetos inovadores e avanços no desempenho de produtos. Por exemplo, por meio da liberdade geométrica e estruturas altamente integradas que são impossíveis de serem fabricadas com outras máquinas e ferramentas. Além disso, a personalização de peças pode ser realizada de forma econômica, uma vez que não são necessários investimentos de capital para desenvolvimento de ferramentaria (PRADEL et al., 2018).

As tecnologias de MA estão disponíveis para projetistas há mais de 20 anos. Sendo utilizada como uma ferramenta de prototipagem, acelerando o processo de projeto. No entanto, é evidente que possibilitam oportunidades além da prototipagem. Com um avanço contínuo, as tecnologias de MA têm demonstrado significativo potencial para se tornar um método de produção em série economicamente viável. Particularmente, para produção em baixo volume (PRADEL et al., 2018).

No entanto, a aplicação industrial da MA para produtos de uso final é limitada. Uma das razões é a falta de experiência e conhecimento de engenheiros e projetistas sobre as capacidades e limitações desta tecnologia de fabricação. As metodologias e ferramentas de projeto existentes são limitadas à etapas avançadas do processo de projeto de produto e específicas em função do tipo

de processo. Não apresentando as interfaces com as abordagens de desenvolvimento de produto existentes (KUMKE; WATSCHKE; VIETOR, 2016). As metodologias existentes não oferecem suporte para os projetistas com uma visão de todo o processo de projeto (LAVERNE et al., 2015). Esforços referentes as normas e regulamentações tem sido realizados com intuito de apoiar a sua maior utilização (THOMPSON et al., 2016).

Um dos principais fatores limitantes na aceitação da MA pelos projetistas é a falta de conhecimento codificado e disponível. Que possa garantir o projeto de componentes manufaturáveis e ofereça suporte na exploração dos recursos disponibilizados (PRADEL et al., 2018). Enquanto proporciona grandes oportunidades para otimizações de estruturas e geometrias, as limitações de processo também apresentam aos projetistas desafios para projetar estruturas com excelente desempenho (ZHU et al., 2020).

Para a aplicação da MA existe ainda a necessidade de uma orientação nos estágios iniciais do processo de projeto, quando o produto ainda não está definido. Abordagens criativas podem ser adotadas para gerar soluções inovadoras que explorem seus recursos de maneira economicamente viável (PRADEL et al., 2018). As oportunidades e novas possibilidades oferecidas são muito amplas para serem exploradas apenas na definição do processo de fabricação. A mudança de paradigma que essas tecnologias permitem não se baseiam apenas em novas tecnologias e processos de manufatura, mas na possibilidade de proceder o projeto de forma diferenciada, além de propor soluções diferentes das tecnologias tradicionais para muitos projetos (GARCÍA-DOMINGUEZ; CLAVER; SEBASTIÁN, 2020b).

As barreiras para adotar a fabricação aditiva para produção em série são dominadas por percepções de alto custo. Adicionalmente, os projetistas ainda não estão convencidos de que as tecnologias aditivas fornecerão componentes que são dimensionalmente repetíveis e têm propriedades físicas satisfatórias (PRADEL et al., 2018). Porém, os estudos e pesquisas tem evoluído rapidamente, visto que o sucesso da MA é criticamente dependente de garantia de qualidade robusta (TOFAIL et al., 2018).

As análises de engenharia no processo de projeto para MA é significativamente diferente da definição relacionada à manufatura tradicional. Os materiais manufaturados aditivamente apresentam propriedades anisotrópicas que podem ser dependentes tanto da direção de construção quanto das direções da trajetória da ferramenta na camada. Por exemplo, o módulo de Young e a resistência do material na direção de construção, direção de varredura em camada e direção transversal em camada são todos significativamente diferentes para os processos de MA baseado em extrusão de filamento e as tensões residuais térmicas da impressão de metal, com base em pó metálico, também são significativamente diferentes entre essas três direções (LI et al., 2019).

As fases de definição de arquitetura de produto e projeto detalhado apresentam os maiores esforços na aplicação de análise de engenharia, especialmente quando aplicados os conceitos e ferramentas de CAD/CAM/CAE (DINAR; ROSEN, 2017). Os projetos voltados para MA necessitam inserir a análise de engenharia desde a etapa de projeto conceitual, indicando restrições

impostas pelo processo na etapa de concepção de soluções, de forma a propiciar um desenvolvimento simultâneo e obter produtos com alto nível de otimização funcional e manufaturáveis desde sua concepção inicial. Ao considerar a MA, o projetista é livre para desenvolver a geometria do produto, mas é necessário investigar as restrições e atributos de manufatura o mais rápido possível para fornecer uma solução melhor como um modelo de produto final para projeto e manufatura simultaneamente (ASADOLLAHI-YAZDI; GARDAN; LAFON, 2017).

1.1 Objetivos da Dissertação

1.1.1 Objetivo Geral

Estabelecer uma sistemática de processo desenvolvimento de produtos (PDP) voltada para a Manufatura Aditiva.

1.1.2 Objetivos Específicos

São os objetivos específicos:

- Definir as vantagens de projeto oferecidas pela MA.
- Analisar metodologias de projeto para MA publicadas.
- Desenvolver processo de projeto para Manufatura Aditiva.
- Aplicar a metodologia proposta para o processo de manufatura aditiva de Fabricação por Filamento Fundido (FFF).
- Elaborar estudo de caso para estruturar o uso da metodologia proposta e avaliar suas vantagens e desvantagens.

1.2 Estrutura da Dissertação

O presente documento é estruturado em seis capítulos, intitulados de introdução, fundamentação teórica, proposta de um processo de desenvolvimento de produto para MA, aplicação da sistemática para o processo de FFF, estudos de caso e conclusões. A estrutura e o conteúdo de cada capítulo é apresentado a seguir.

- Introdução: apresenta o contexto do trabalho, as motivações, justificativas e o problema a ser abordado, assim como os objetivos a serem atingidos e a estrutura da dissertação.

- **Fundamentação teórica:** Apresenta os conceitos teóricos básicos necessários para o entendimento do documento, passando pelo conceito de MA, apresentação de normas e regulamentações e definições do Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP)
- **Proposta de um Processo de Desenvolvimento de Produto para MA:** Define a metodologia de pesquisa para análise de processos publicados, realiza um levantamento das principais necessidades e ferramentas utilizadas até o presente e propõe um modelo de sistemática para desenvolvimento de produtos voltado para características da manufatura digital, com enfoque na MA.
- **Aplicação da Sistemática para o processo de FFF:** Apresenta a aplicação da sistemática para o processo mais difundido atualmente de MA, apresentando as alterações da sistemática em função de um processo específico de MA.
- **Estudos de Caso:** Apresenta a utilização da sistemática aplicada ao processo de FFF para desenvolvimento de componentes.
- **Conclusões:** Apresenta uma análise crítica dos resultados obtidos no estudo, com uma apresentação de objetivos alcançados e propostas de trabalhos futuros para complementar a pesquisa.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva é uma técnica de manufatura avançada que substitui as operações de manufatura baseadas em processos por operações baseadas em modelos (PARITALA; MAN-CHIKATLA; YARLAGADDA, 2017). Alternando essa ótica de atuação a manufatura aditiva distingue-se de métodos de fabricação tradicionais. Os métodos de fabricação denominados de tradicionais, são processos subtrativos e formativos, ou seja, necessitam de retirar material de um bloco ou dependem de uma matriz formativa para fabricar os produtos. No caso da MA, a fabricação é baseada na deposição controlada de material à partir de um modelo virtual de peça, sem depender assim de maquinários ou ferramentaria complexas para produção.

O desenvolvimento das tecnologias de MA remontam quase 150 anos, com propostas para construir mapas topográficos de forma livre e foto-esculturas de camadas bidimensionais. Os esforços de pesquisa nas décadas de 1960 e 70 forneceram provas de conceito e patentes para os primeiros processos modernos, incluindo fotopolimerização no final dos anos 60, fusão de pó em 1972 e laminação de folhas em 1979 (THOMPSON et al., 2016).

Para ser considerado um método aditivo de fabricação, um processo de adição e integração de material deve ser observado durante a manufatura. Caracterizado por seguir etapas serializadas de adição de material à um substrato, sendo o substrato representado pela plataforma de fabricação na primeira camada e nas camadas subsequentes definido como o material integrado pelas etapas anteriores. A classificação de tecnologias é definida em função das características do processo, sendo representadas principalmente pela forma de integração do material (fusão, fotopolimerização, material aglutinante), e o formato cru do insumo, por exemplo material em pó, resina ou filamentar.

Durante os últimos 30 anos, o uso das tecnologias passou por uma transformação. As primeiras aplicações focavam em modelos e protótipos, conforme a tecnologia amadureceu, passou a

desempenhar um importante papel na produção de ferramentas rápidas e simples (por exemplo, moldes de fundição à vácuo de silicone). Hoje a tecnologia passa a figurar também como uma opção para produção de peças e produtos de uso final (THOMPSON et al., 2016). No entanto, nem todas as peças possuem viabilidade técnica ou econômica para fabricação aditiva. Isso requer uma melhor compreensão de quando, por que e como projetar ou reprojeter componentes para as oportunidades e restrições associadas a essas tecnologias.

Para a etapa de seleção de tecnologias, os métodos baseiam-se em sistemáticas de tomada de decisão. Como exemplo, Mançanares et al. (2015) utiliza o método de análise hierárquica para desenvolver uma solução para seleção de método e maquinário para manufatura aditiva, baseando-se em características de peças. No método são inseridas as restrições da peça, representadas somente pelas dimensões e material, e uma análise é realizada entre os métodos e maquinário levantados pelos autores.

A viabilidade econômica do processo é complexa, a manufatura aditiva apresenta um custo quase constante para cada item fabricado, considerando que os custos para fabricação são relacionados praticamente com matéria prima e pós-processamento (RODRIGUES et al., 2017). Dessa forma, a viabilidade econômica do processo só é alcançada para produtos que apresentem alto grau de complexidade geométrica ou composição de materiais, alterações de design constante, fabricação sob demanda ou poucas tiragens. Tendo em vista que os processos tradicionais de manufatura possuem um custo decrescente a medida que se aumenta o número de peças fabricadas.

A manufatura aditiva representa uma tecnologia impulsionadora da Indústria 4.0. Ela permite que os meios de produção apresentem uma alta flexibilidade, sem a necessidade de parar linhas de produção para atendimento de pedidos específicos. Deradjat e Minshall (2018) descrevem que com os benefícios e avanços tecnológicos da manufatura aditiva, tornam-se tecnologias facilitadoras para a customização em massa. Porém, enquanto existem pesquisas em manufatura aditiva e em customização em massa, existe uma carência de trabalhos em onde e como essas duas áreas se intersectam.

Aproveitando as liberdades geométricas e materiais da MA para peças de uso final, define-se um mundo de oportunidades (THOMPSON et al., 2016). Essas liberdades de projeto habilitadas pelos recursos de MA são refletidas nas seguintes categorias (YANG; ZHAO, 2015):

1. Complexidade da forma: é possível construir virtualmente qualquer forma, os tamanhos de lote de uma unidade são práticos, geometrias personalizadas são obtidas prontamente e a otimização da forma é facilitada.;
2. Complexidade hierárquica: estruturas hierárquicas com diferentes escalas dimensionais podem ser projetadas e fabricadas a partir da microestrutura, definindo a mesoestrutura geométrica (0,1 - 10mm) até a macroestrutura em escala de peça. A ideia básica de estruturas hierárquicas é que recursos em uma escala de tamanho podem ter recursos menores

adicionados a eles, e cada um desses recursos menores pode ter recursos menores adicionados;

3. Complexidade de material: o material pode ser processado um ponto, ou uma camada, por vez, permitindo a fabricação de peças com composições de materiais complexas e gradientes de propriedade projetados;
4. Complexidade funcional: ao construir peças de forma aditiva, o interior da peça está sempre acessível. Isso torna possível integrar intensamente vários domínios de design para realizar multifuncionalidades. Por exemplo, mecanismos operacionais e componentes incorporados podem ser fabricados diretamente para obter peças multifuncionais.

2.1.1 Normas e Regulamentações

Com a definição das vantagens proporcionadas e a constante busca para implementação da MA para produtos finais, é necessário estabelecer normas que balizem o desenvolvimento de produtos voltados para fabricação aditiva e que possam regulamentar o controle de qualidade para os processos de projeto, manufatura e pós-processamento. A aplicação industrial dos processos é incipiente. Em muitos aspectos, a MA é fundamentalmente diferente dos processos de manufatura convencionais e uma adaptação direta de um Processo de Desenvolvimento de Produto para manufatura aditiva (MA-PDP) a partir dos processos convencionais de desenvolvimento de produtos não é possível. Para criar uma base para um MA-PDP, os poucos padrões e diretrizes existentes na área devem ser vinculados a padrões individuais, adaptados dos guias de projeto existentes para processos de manufatura convencionais (ROHDE et al., 2019).

Grupos de trabalho para o desenvolvimento de padrões relacionados à MA foram organizados pela Organização Internacional para Padronização (ISO / TC 261) e pela Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM F42). Até o momento, eles produziram padrões relacionados à terminologia, processos individuais, cadeias de processos (hardware e software), procedimentos de teste, parâmetros de qualidade, acordos cliente-fornecedor e elementos fundamentais. Na base de dados da ASTM atualmente existem 32 normas ativas (data da pesquisa: 11/01/2021) que remetem à MA. As normas são em sua maioria descritas sobre a tutela do comitê técnico ASTM-F42 - Tecnologias de Manufatura Aditiva, com apenas duas exceções, uma sob a tutela do comitê técnico E07 - Testes Não-destrutivos (ASTM E3166-20e1 - Guia padrão para testes não destrutivos de peças aeroespaciais de metal fabricadas por manufatura aditiva), e outra sob a tutela do comitê técnico F04 - Materiais e dispositivos médicos e cirúrgicos (ASTM F3335-20 - Guia padrão para avaliar a remoção de resíduos de manufatura aditiva em dispositivos médicos fabricados por fusão em leito de pó).

Em 2011, a ISO e a ASTM realizaram um acordo de cooperação para o desenvolvimento de normas, definindo como meta comum a produção de um conjunto de padrões globais. Incluindo

Tabela 2.1: Itens em trabalho por sub-comitê da ASTM-F42. Fonte: ASTM

Sub-comitê	Quantidade de itens em trabalho
F42.01 - Metodologias de teste	17
F42.02 - Projeto	6
F42.04 - Materiais e Processos	19
F42.06 - Ambiente, Saúde e Segurança	5
F42.07 - Aplicações	15
F42.08 - Dados	3

padrões gerais que são aplicáveis à maioria dos materiais, processos e aplicações da MA; padrões de categoria que definem os requisitos para um tipo de material ou processo; e padrões especializados para requisitos de material, processo ou aplicação (THOMPSON et al., 2016). A Tabela 2.1 apresenta a quantidade de itens em trabalho por cada sub-comitê da ASTM-F42, exemplificando a busca por normatizações globais.

Esforços para padronização da MA também estão ocorrendo na Alemanha (VDI FA 105 e DIN NA 145-04-01AA), Espanha (AEN / CTN 116), França (AFNOR UNM 920), Suécia (SIS / TK 563), EUA (SAE AMS-AM) e no Reino Unido (BSI AMT / 8) (THOMPSON et al., 2016). A Associação de Engenheiros Alemães publicou a VDI 3404 e VDI 3405 como parte deste trabalho. As Diretrizes VDI 3405 são as primeiras na área de língua alemã abordando MA diretamente, as diretrizes de projeto correspondentes, o processo de fabricação e questões relacionadas, como segurança no trabalho (ROHDE et al., 2019).

Devido à demora na publicação de normas por parte de agências reguladoras, a busca por usufruir das vantagens oferecidas pela MA e a rápida evolução tecnológica dos processos, algumas empresas do ramo e agências de desenvolvimento de tecnologia estão regulamentando internamente as atividades. Russell (2018) descreve os esforços da Agência Espacial Americana (NASA) no desenvolvimento de normas para utilização da MA, voltada principalmente para os processos à laser sobre cama de pó. Como parte desse esforço, várias especificações podem ser necessárias para tratar de matérias-primas, aquisição de peças e processos para complementar os padrões. Essas normas internas criarão requisitos e orientações que podem ser usados para desenvolver planos de fabricação e fornecer especificações de produto para aplicações gerais e específicas, que precisam ser tratados em todas as fases de projeto, fabricação e qualificação (RUSSELL, 2018).

Em 2018, como um dos resultados do acordo entre ISO e ASTM firmado em 2011, foi publicada a norma ISO/ASTM 52910:2018, que normatiza requerimentos, recomendações e guias de projeto para MA. A publicação regulamenta os requisitos, guias de projeto e recomendações para desenvolvimento de produtos com o objetivo de ajudar a determinar quais considerações de projeto podem ser utilizadas em um desenvolvimento de produto para tirar proveito dos recursos de processos de MA, sem indicar especificidades para cada processo.

Tabela 2.2: Itens em trabalho do sub-comitê ASTM-F42.02 - Projeto. Fonte: ASTM

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 à base de feixe de elétrons
WK73444	Manufatura Aditiva - Projeto - Pós-processamento
WK74006	Manufatura aditiva - Formatos de dados - Especificação para dados otimizados de imagens médicas

Na publicação da ISO/ASTM 52910:2018 foram normatizadas as oportunidades e limitações dos processos, matrizes de decisão com a indicação da utilização em função de características de produtos, considerações de projeto baseadas em ambiente de trabalho, sustentabilidade, geometria, propriedades de materiais e algumas considerações específicas de processos. Além das considerações citadas, foram publicadas guias de projeto envolvendo pós-processamentos, controle de qualidade e métodos de inspeção, além de uma seção de avisos e advertências focadas para projetistas. O subcomitê F42.02 da ASTM é responsável pelas normatizações na área de DfMA, os itens em desenvolvimento definidos pelo subcomitê estão apresentados na Tabela 2.2.

Dentro da proposta para a presente dissertação, o item em desenvolvimento WK64190, que desenvolve um guia para auxiliar na seleção e projeto de processos de MA, regulamentaria uma etapa necessária para elaboração de uma metodologia generalizada de DfMA. Este guia forneceria um documento de referência para projetistas considerando a MA para seu produto e ofereceria uma maneira de identificar um subconjunto preferido de processos para explorar.

2.1.2 Tecnologias de MA

A classificação das tecnologias de manufatura aditiva é realizada na literatura em função do processo de transformação de material como extrusão, fusão e polimerização (THOMPSON et al., 2016) ou em função da forma da matéria prima utilizada, como pó, filamento e resinas fotossensíveis (RODRIGUES et al., 2017). A Figura 2.1 apresenta a classificação em função da matéria prima, com indicação dos princípios físicos de fabricação e aplicações.

A norma ISO/ASTM 52900:2015, que regula as nomenclaturas e definições dos processos de MA define a classificação baseada no processo físico de transformação de matéria. A definição proposta pela ISO/ASTM é apresentada na Tabela 2.3.

Matéria-prima	Processo	Material	Princípio	Aplicações
Líquido	<i>Stereolithography (SLA)</i>	Polímeros fotossensíveis	Produção de peças de polímero a partir da solidificação destes com um laser	Protótipos, moldes
	<i>Multi-jet Modeling (MJM)</i>	Acrílico fotossensível, plástico e cera	Produção de peças a partir da solidificação do material depositado por flash de uma iluminação ultravioleta (UV)	Protótipos, moldes
	<i>Rapid Freezing Prototyping (RFP)</i>	Água	Produção de peças a partir do congelamento das gotículas de água depositadas	Protótipos, moldes
Filamento/ Pasta	Modelação por extrusão de plástico (FDM)	Termoplásticos	Produção de peças por extrusão do plástico por bico extrusor em uma base	Protótipos, moldes
	<i>Robocasting</i>	Pasta cerâmica	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica	Objetos cerâmicos
	<i>Freeze-form Extrusion Fabrication (FEF)</i>	Pasta cerâmica e água	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica aquosa	Objetos cerâmicos
Pó	Sinterização seletiva a laser (SLS)	<i>Alumide; Carbon Fibre; PA 1101; PA2200/2201; PA 2221; PA2202; PA 2210; PA3200; PAEK; Polystyrene</i>	Produção de peças por meio do processo de sinterização de camadas de pó	Protótipos; partes aeronáuticas; partes motores automotivos; peças especiais para indústria; moldes
	<i>Selective Laser Melting (SLM)</i>	<i>Stainless steel 316L e 17-4PH; H13 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 um laser	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes motores automotivos; trocadores calor; moldes; peças especiais para indústria
	<i>Electron Beam Melting (EBM)</i>	<i>Cobalt-chrome ASTM F75; Titanium Ti-6Al-4V, Grade 2;</i>	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por um arco elétrico	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes automotivas
	<i>Laser Metal Deposition (LMD)/ Laser Engineered Net Shaping (LENS)/ Direct Metal Deposition (DMD)</i>	<i>Aluminium Al-Si-10Mg; Cobalt-chrome MP1 e SP2; Maraging Steel; Inconel 718 e 625; Stainless steel 17-4PH e 15-5PH; Titanium Ti-6Al-4V</i>	Produção de peças através da fusão completa de pó de metal	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes motores automotivos; trocadores calor; moldes; peças especiais para indústria
	Impressão Tridimensional (3DP)	Polímeros, metais, cerâmica e outros pós	Produção de peças pela deposição de pó sobre uma base, que é unido seletivamente pela injeção de aglutinante	Protótipos, moldes, ferramental para indústria
Placa sólida	Manufatura de objeto em lâminas (LOM)	Papel, plástico, metal	Produção de peças pela união de uma camada de material laminado a uma série de outras lâminas conformadas	Protótipos e moldes

Figura 2.1: Classificação de Processos de MA. Fonte: Rodrigues et al. (2017)

Na tabela 2.4 são apresentadas as classificações de fatores para diferentes métodos de manufatura aditiva analisados por Mançaneres et al. (2015). Apesar de simplificada na comparação, a Tabela 2.4, representa uma comparação entre tecnologias e permite iniciar o processo de seleção de tecnologia baseado nos requisitos de produto. A falta de normas para homologar e dimensionar componentes fabricados por MA dificultam a seleção de tecnologias para um projeto, portanto a comparação entre tecnologias é essencial. Para a presente dissertação, todas tecnologias são classificadas como aptas, logicamente dependendo de modificações e otimizações de produtos em função de suas características.

Tabela 2.3: Tecnologias de MA. Fonte: ISO/ASTM 52900:2015

Nomenclatura	Definição
Jateamento de aglutinante	Processo de MA em que um agente de ligação líquido é seletivamente depositado para juntar materiais em pó
Deposição de energia direcionada	Processo de MA em que a energia térmica focalizada é usada para unir materiais por fusão à medida que são depositados
Extrusão de material	Processo de MA em que o material é distribuído seletivamente através de um bico ou orifício
Jateamento de material	Processo de MA em que gotículas de material de construção são depositadas seletivamente
Fusão de leito de pó	Processo de MA em que a energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó
Laminação de folhas	Processo de MA em que folhas de material são unidas para formar uma peça
Fotopolimerização em cuba	Processo de MA em que um fotopolímero líquido depositado em uma cuba é curado seletivamente através de polimerização ativada por luz

Tabela 2.4: Fatores de comparação entre processos

	SLA	TDP	SLS	FDM	DMLS	CJP	MJP
Variedade de materiais	Baixa	Média	Alta	Média	Média	Baixa	Baixa
Acabamento superficial	Médio	Bom	Bom	Médio	Superior	Bom	Bom
Pós-processamento	Médio	Bom	Bom	Médio	Superior	Bom	Bom
Precisão	Superior	Média	Boa	Média	Superior	Média	Média
Resistência ao impacto	Média	Baixa	Boa	Boa	Superior	Baixa	Baixa
Resistência à flexão	Baixa	Baixo	Superior	Superior	Superior	Baixa	Baixa
Custo de fabricação	Alto	Médio	Alto	Baixo	Alto	Médio	Médio
Cura posterior	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	Não

Fonte: Adaptado de (MANÇANARES et al., 2015)

2.1.3 Cadeia Digital de Fabricação por MA

Os processos de manufatura aditiva possuem um fluxo de dados digital que gera instruções para maquinários, seguido por um fluxo de trabalho físico que transforma as matérias-primas em peças finais (THOMPSON et al., 2016). Nesse conceito, a MA é classificada como um processo de fabricação digital. A fabricação digital é um processo cíclico no qual o produto é projetado conceitualmente e inovado em softwares de projeto auxiliado por computador, sendo o CAD (Computer Aided Design) a ferramenta mais difundida e utilizada, por permitir ao projetista o desenvolvimento de um modelo virtual da peça a ser fabricada.

Thompson et al. (2016) descreve o fluxo de trabalho necessário para desenvolvimento de componentes, ilustrado na Figura 2.2. As etapas virtuais iniciam-se na modelagem do componente em um ambiente virtual (CAD). A partir da modelagem tridimensional é gerado um modelo de representação por faces, onde o formato mais empregado atualmente é o STL (surface tessellation language). Esse modelo intermediário de representação de geometrias gerado à partir do CAD deve permitir a divisão da geometria em camadas, o formato de STL é o mais difundido por ser antigo e compatível com a maioria de softwares de CAD existentes, porém, nunca foi reconhecido como um padrão oficial por qualquer organização de padronização. Esse arquivo é então separado em camadas por softwares de fatiamento e então o mesmo software prepara os códigos de máquina para serem operados pelo maquinário.

Existe um esforço por parte de agências reguladoras e empresas do ramo para estabelecer outro formato de arquivo para aplicações de manufatura aditiva, dentro dessa proposta o formato de AMF (*Additive Manufacturing Format*) foi padronizado pela norma ISO/ASTM 52915:2020, a adoção do novo formato permite inserir no arquivo informações além da geometria da peça, como cor, material, textura e arranjos de lotes.

Com os códigos preparados, as etapas físicas se iniciam, sendo representadas basicamente pelo processo de impressão, pós-tratamentos e aplicação. Gibson et al. (2009, apud (RODRIGUES et al., 2017)) definem etapas necessárias à manufatura aditiva que são empregadas independente da técnica de manufatura aplicada, sendo elas:

- CAD (Computer-aided design): toda peça a ser produzida por manufatura aditiva deve ter sua geometria definida por um modelo numérico (software). Para tanto, pode-se empregar praticamente qualquer software profissional de CAD ou softwares e equipamentos de engenharia reversa, como scanners.
- Conversão para AMF: O arquivo de CAD deve ser convertido para um arquivo que possibilite a divisão da peça em camadas.
- Fatiamento: A geometria deve ser carregada em software de fatiamento para inserção de parâmetros do processo de manufatura e geração de códigos de máquina.

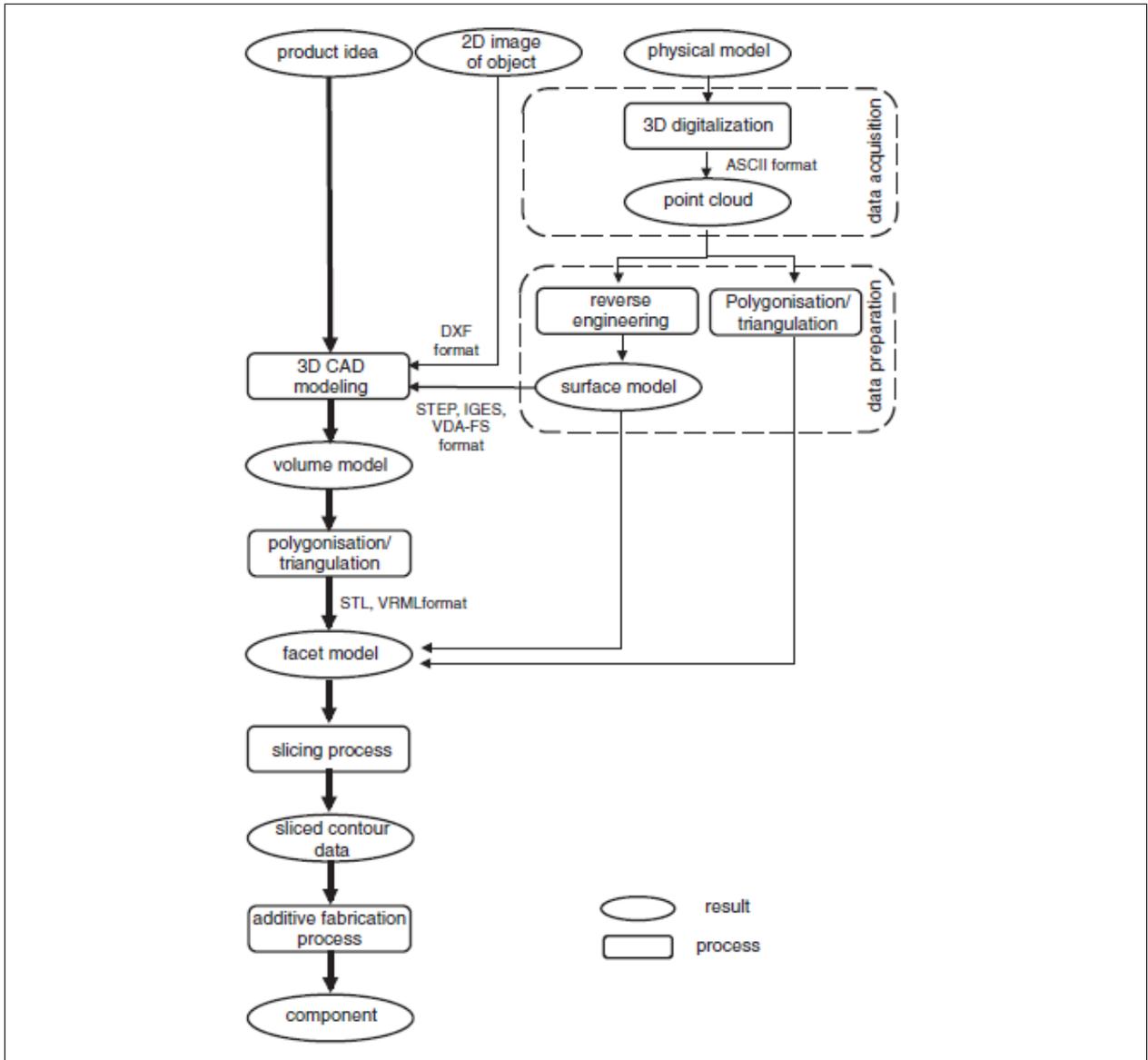


Figura 2.2: Processos físicos e virtuais para manufatura aditiva. Fonte: (THOMPSON et al., 2016)

- Transferência para a máquina de manufatura aditiva e manipulação do arquivo: o arquivo representando a peça deve ser transferido para o equipamento em que será produzida. Eventuais manipulações para corrigir o posicionamento, tamanho ou orientação da peça no arquivo podem ser necessárias.
- Configurar a máquina: pode ser necessário definir alguns parâmetros na máquina, como calibração de sensores e movimentações.
- Produção: a produção por manufatura aditiva é automatizada, com baixa necessidade de supervisão humana direta; necessitando basicamente garantir o suprimento de materiais, a descarga da máquina e prevenir/atuar em eventuais problemas.
- Remoção: após o fim da produção, a peça deve ser retirada da máquina.
- Pós-processamento: após a produção, podem ser requeridas atividades adicionais, como a retirada de estruturas de suporte e limpeza. Tratamentos adicionais podem ser necessários para garantir qualidades estéticas à peça, como pintura e tratamentos de superfícies, ou as características físicas desejadas, como resistência e dureza. Para algumas técnicas pode existir ainda a necessidade de etapas de cura de material no pós-tratamento.
- Aplicação: a peça está pronta para uso.

Os projetos e processos são simulados para verificação da viabilidade de fabricação do produto. O produto é inspecionado em todas as fases do processo de fabricação pelas técnicas de inspeção e testado por métodos de controle de qualidade auxiliados por computador (PARITALA; MANCHIKATLA; YARLAGADDA, 2017). A Figura 2.3 ilustra uma célula de manufatura voltada para processos de MA.

O processo ilustrado na Figura 2.3 apresenta 4 etapas da cadeia digital definidas, (1) projeto e análise, (2) Fabricação e monitoramento, (3) Testes e validações e (4) entrega e registro. A etapa de projeto e análise consiste na cadeia de desenvolvimento virtual do componente, a etapa de fabricação e monitoramento representa a etapa onde a peça é de fato manufaturada, com controle do processo automatizado. A etapa de testes e validações representa o controle de qualidade de peças manufaturadas e a quarta e última etapa representa a documentação e liberação da peça fabricada.

A manufatura digital representa um dos pilares da Indústria 4.0, a implementação de diretrizes impulsionadas pela indústria 4.0 como customização em massa, flexibilização de processos e descentralização de centros de fabricação dependem da utilização da manufatura aditiva como processo de fabricação de peças finais. Através da manufatura digital e do CAx, várias outras técnicas são implementados no desenvolvimento de produtos pensados para MA, dentre as quais as principais são a Otimização Topológica e a utilização da teoria de Elementos Finitos, que permitem desenvolver peças altamente funcionais, utilizando a possibilidade de fabricação de

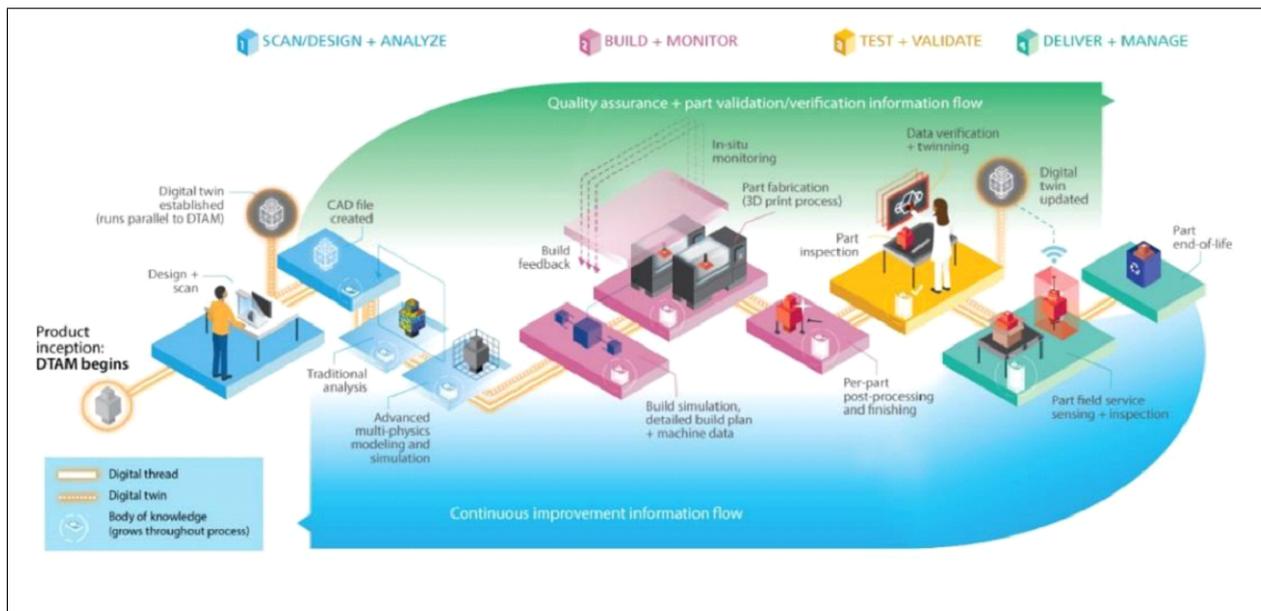


Figura 2.3: Célula de manufatura para MA. Fonte: Paritala, Manchikatla e Yarlagadda (2017)

formas geométricas livres proporcionada pelas reduzidas restrições de manufaturabilidade nos processos de MA.

2.2 Processo de Desenvolvimento de Produtos

O processo de desenvolvimento do produto consiste em um conjunto de atividades que, com base nas necessidades do mercado, restrições, e estratégias da empresa, buscam atingir as especificações do projeto de um produto e seu processo produtivo (ROZENFELD; AMARAL, 2006). Além disso, é uma estratégia competitiva guiada por produtos e sustentabilidade, que começa com a percepção de uma oportunidade de mercado e termina com a produção, venda e entrega de um produto (ULRICH; EPPINGER, 2011).

O campo de Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) tem atraído a atenção de pesquisadores acadêmicos e produzido um número considerável de resultados. Hoje em dia, essas teorias são ensinadas em muitas escolas de engenharia e relatadas como aplicadas industrialmente (TOMIYAMA et al., 2009). Por outro lado, o processo de desenvolvimento de produto tem vários problemas no progresso da teoria e dos conceitos (SHAW, 1995). Muitos problemas na área de produção derivam da falta de estudos teóricos baseados em um método sistemático (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011). Além disso, Hart e Moore (1998) destaca a relevância de investigar e compreender o conhecimento amplamente, antes de iniciar a pesquisa. Portanto, a definição do problema é o ponto de partida para a revisão científica durante o processo de desenvolvimento do produto (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011).

A avaliação de teorias de PDP é complexa e envolve diversos fatores, porém, independente

da teoria analisada, todo desenvolvimento necessita partir da identificação de um problema, de uma necessidade. Segundo Bardales (2013), o processo de desenvolvimento de produto começa com uma ideia ou demanda de um cliente, interno ou externo, que tem relação com o portfólio da empresa e estratégia de posicionamento. Isso significa que o conceito deve ser a resposta a essas dimensões e, portanto, não apenas uma questão de criar ideias (ANDREASEN, 2011). A definição de um processo para o desenvolvimento de novos produtos pode ser então sintetizado como um processo de solução de problemas, representando uma relação permanente entre objetivos, planejamento, execução e controle, conectados à partir de decisões (VDI 2221).

Segundo Rozenfeld e Amaral (2006), desenvolver produtos consiste em um conjunto de atividades por meio das quais busca-se, a partir das necessidades do mercado e das possibilidades e restrições tecnológicas, e considerando as estratégias competitivas e de produto da empresa, chegar às especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção, para que a manufatura seja capaz de produzi-lo. Porém, além dessa definição, o processo de desenvolvimento de produtos deve estabelecer métricas e processos para avaliação de todo ciclo de vida de um produto, desde a identificação da necessidade até o descarte e posteriormente descontinuação e retirada de mercado, passando por levantamento de informações, definição de requisitos, conceptualização, processo de fabricação e vendas.

Portanto, depois de definir o problema, a etapa seguinte é definir o ciclo de vida do produto, que fornece uma descrição gráfica das etapas de desenvolvimento do produto e depende do tipo de projeto, escala de produção, características operacionais, entre outros. Para definir os requisitos do cliente, é necessário analisar as necessidades do cliente, considerando cada estágio do ciclo de vida, por meio de técnicas de classificação, ordenação e agrupamento.

Posteriormente, as especificações do produto são derivadas dos requisitos do cliente (HAUSER; CLAUSING et al., 1988). O projeto informativo visa desenvolver as especificações meta do produto, por meio das informações coletados na fase de planejamento (BACK et al., 2008).

As especificações orientam a definição de princípios de solução e servem como base para avaliação de soluções e tomada de decisão. Com o propósito de obter comunicação precisa durante o projeto, os requisitos de cliente são traduzidos para linguagem de engenharia técnica. Tendo em vista que as necessidades do cliente tendem a expressar os desejos de uma forma subjetiva. A conversão dos requisitos de produto nas especificações do produto define parâmetros mensuráveis, associados às características do produto (KWONG et al., 2007).

De acordo com Back et al. (2008) e Rozenfeld e Amaral (2006), ao contrário da fase do projeto informacional que trata da aquisição e transformação de informações, o projeto conceitual consiste na busca, criação, representação e seleção de soluções para o problema, visando a obtenção do conceito do produto. O projeto conceitual segue idealmente um processo linear, mas normalmente é realizado por meio de um processo iterativo. O problema de projeto é elucidado, e segue-se a decomposição da função. Soluções para cada subfunção são identificados e combinados para criar um projeto conceitual integrado potencial (ULRICH; EPPINGER, 2011).

As teorias mais comuns utilizadas em PDP partem de uma identificação de necessidade, com essa necessidade mapeada são realizados estudos de viabilidade econômica, com identificação de público alvo, avaliação da necessidade da solução e investigação de mercado, antes mesmo de iniciar qualquer tipo de desenvolvimento técnico. Dessa forma, as teorias de gestão do PDP, desenvolvem fases do PDP. Uma das metodologias mais conhecidas para definição do PDP é a norma alemã VDI 2221, que é amplamente reconhecida tanto na pesquisa quanto na indústria e será utilizada no presente documento para fundamentar o PDP. Na descrição dos objetivos da VDI 2221 a necessidade de uma estruturação de metodologias é justificada pela influência do processo de projeto para a competitividade de produtos e sistemas técnicos, além de caracterizar o processo como uma variedade de tarefas que devem ser realizadas à partir das condições específicas de cada empresa e impostas pelo mercado e pelo desenvolvimento técnico. O processo é definido pela norma de forma generalizada, sem especificações de área ou tipo de produto, definindo fases e resultados de maneira lógica, permitindo a realização prática do desenvolvimento de qualquer tipo de produto.

O elemento central da VDI 2221 é um gráfico de processo representado na Figura 2.4. O processo é dividido em quatro fases, identificadas na coluna à direita. Na fase 1, o problema ou tarefa é esclarecido. A fase 2 trata do projeto conceitual, incluindo estruturas de funções, princípios básicos de solução e estruturas modulares. O resultado da fase 2 é um conceito de produto, concretizado e refinado na fase 3 (projeto de incorporação). No projeto de detalhe a seguir na fase 4, as características exatas da peça (por exemplo, qualidades de superfície e dimensões) são definidas e documentadas (KUMKE; WATSCHKE; VIETOR, 2016). A VDI 2221 ainda apresenta um modelo iterativo, ilustrado pela coluna à esquerda na imagem. De acordo com a norma, o comportamento humano é caracterizado por alternar entre elementos individuais e o todo de um problema. Dessa forma, permitir a repetição de tarefas e etapas resulta em soluções melhores à medida que o desenvolvimento é realizado.

A metodologia apresentada na VDI 2221 parte da etapa de definição do problema, descrevendo atividades preliminares ao desenvolvimento da solução. Esta atividade resume o projeto informacional do desenvolvimento de produtos e agrega as atividades de pré-desenvolvimento. Como resultado da etapa é desenvolvida uma lista de requisitos que o produto deve atender, sendo essas relacionadas aos requisitos do consumidor e requisitos internos da empresa que está desenvolvendo o produto. Os requisitos definem a estrutura que o produto deve possuir à partir do levantamento das necessidades que este deve solucionar. Esse documento irá balizar todo desenvolvimento do produto e por esta razão deve ser constantemente revisado e atualizado à medida que o desenvolvimento evolui.

As atividades de pré-desenvolvimento são utilizadas para definir a abordagem do processo de projeto. Definida pela classificação do produto em função da estratégia da empresa e sua situação competitiva no mercado, da necessidade de redução de custos ou tempo de desenvolvimento, regulamentações, estratégias de produção, nível de complexidade e levantamento inicial de viabi-

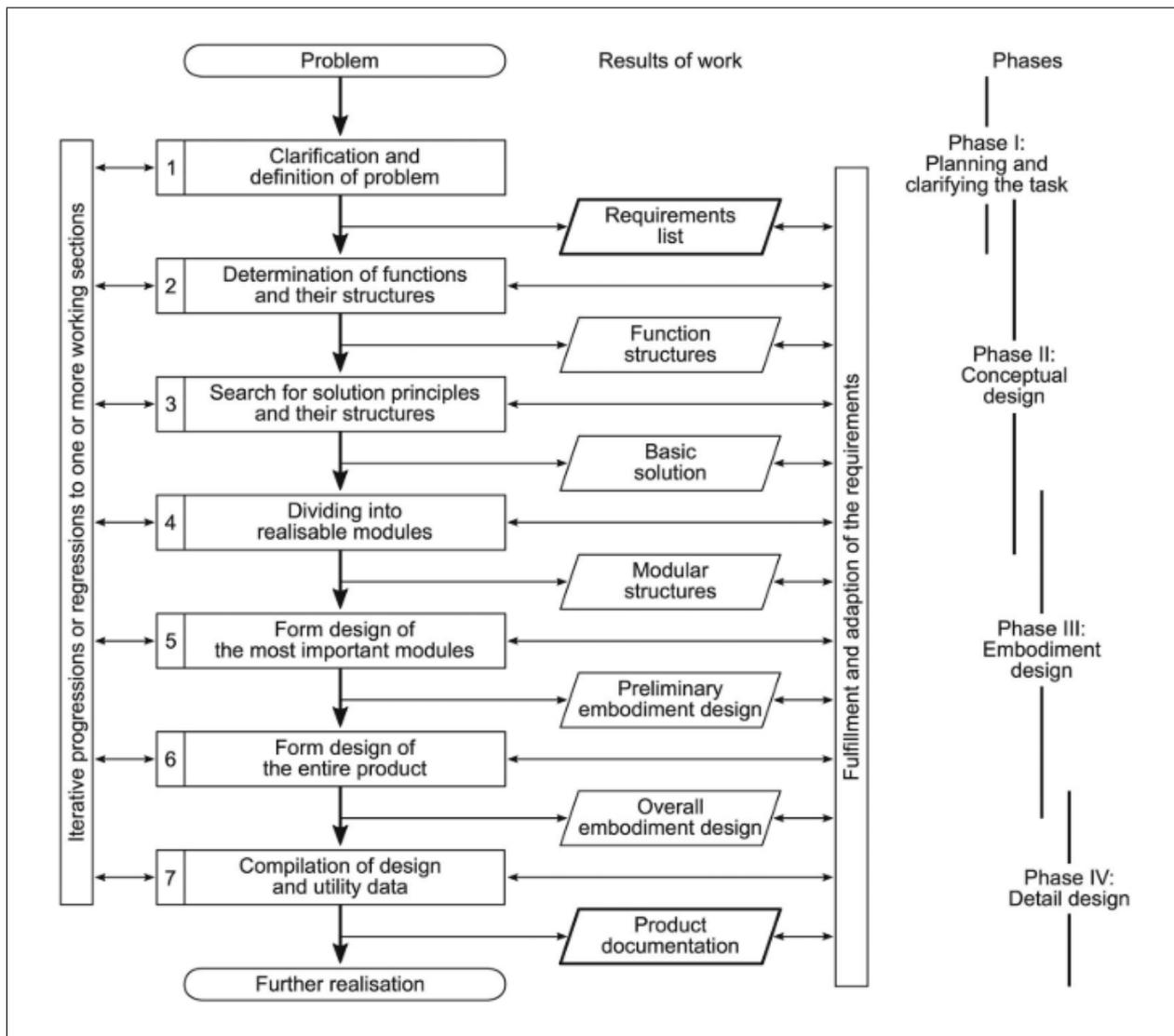


Figura 2.4: Sistemática para desenvolvimento de produto - VDI 2221 Fonte:Kumke, Watschke e Vietor (2016)

lidade técnica. Essas avaliações levam à adaptações do processo de projeto em função de fatores externos e internos. Essa etapa é crucial em qualquer desenvolvimento de produto, pois serve de avaliação se o projeto deve ser desenvolvido ou interrompido, em função do posicionamento de mercado da empresa, da capacidade de entrega e do nível de desenvolvimento do conhecimento necessário para o desenvolvimento. As informações obtidas permitem também o levantamento inicial de requisitos para o projeto, sendo esses relacionadas ao tempo de desenvolvimento, custo de desenvolvimento e estimativa de custo por unidade, nível de complexidade que a solução deve possuir e processos de fabricação plausíveis.

A segunda etapa de desenvolvimento apresentada pela norma VDI 2221 representa o início do projeto conceitual que é caracterizado pela modelagem funcional de produtos. A modelagem funcional representa descrever, à partir dos requisitos levantados no projeto informacional, o produto em um nível abstrato, possibilitando a obtenção da estrutura de produto sem restringir o espaço

de pesquisa a soluções específicas. Os modelos funcionais permitem que o produto seja representado por meio das suas funcionalidades, ou seja, por meio das suas funções — tanto aquelas realizadas externamente ao produto em sua interação com o ambiente quanto as funções internas ao produto, realizadas pelas suas partes (ROZENFELD; AMARAL, 2006). A divisão da funcionalidade de um produto em níveis paralelos é um modelo efetivo para solucionar problemas complexos, permitindo lidar com funções de menor complexidade e encontrando suas soluções em menor tempo, sendo depois combinadas na solução global. A modelagem funcional foi particularmente revolucionária para o ensino de desenvolvimento de produtos. Antes a educação em projetos era representada por esboços e cálculos de engenharia. Partindo da definição de funcionalidades leva-se à um projeto mais racional e inovador e possibilitando a redução de tempo de desenvolvimento (TOMIYAMA et al., 2009).

A modelagem funcional parte da definição da função global de um produto, sendo representada pela principal atribuição do mesmo. A partir da função global, ou função total em algumas referências, definem-se desdobramentos dessa função, que significa dividir a função global em funções de menor nível. À partir do desdobramento de funções, o menor nível obtido é comumente designado de função elementar, onde a complexidade de uma função elementar varia em função da complexidade do projeto ou do nível de abstração desejado pelo(s) projetista(s). As funções ocupam a posição mais importante na metodologia de projeto. Andreasen (2011) define função como a capacidade de um sistema, módulo ou produto de criar um efeito ativo. A função depende de estímulos, da natureza física, química e estado inerente do sistema ou mecanismo.

Denomina-se estrutura funcional, a ilustração dos desdobramentos da função global. A Figura 2.5 ilustra um modelo de estrutura funcional, representado pelo desdobramento da função global em quatro funções secundárias. Como é possível observar na Figura 2.5, a estrutura funcional é desenvolvida em função de energia, material e sinal, representando as transformações que são realizados no produto ou pelo produto nesses três níveis. Segundo Andreasen (2011), na hierarquia de funções, que contribuem para a função global intencionada do produto, existem relações causais, determinadas pelos sistemas que escolhemos para realizar essas funções. Quando um sistema está definido e é capaz de realizar uma determinada função, esse sistema convoca novas funções para apoiar ou complementar as funções do produto.

Após a definição da estrutura funcional de um produto definem-se princípios de solução para cada função observada, como indicado na etapa 3 da Figura 2.4. Nessa etapa, princípios físicos e/ou soluções conhecidas devem ser aplicados à cada função identificada para o produto, começando o levantamento de opções de princípios de solução para o produto. Com os princípios de solução identificados inicia-se um processo de divisão do produto em módulos (etapa 4), ou seja, agrega-se diferentes funções à uma parte (módulo) do produto, reduzindo assim a complexidade e a quantidade de sistemas e componentes. A modularização é desejada em qualquer projeto pois reduz o esforço no projeto do produto e geralmente facilita na manufatura do mesmo (TOMIYAMA et al., 2009). Existem diversas ferramentas para auxiliar na identificação de possíveis

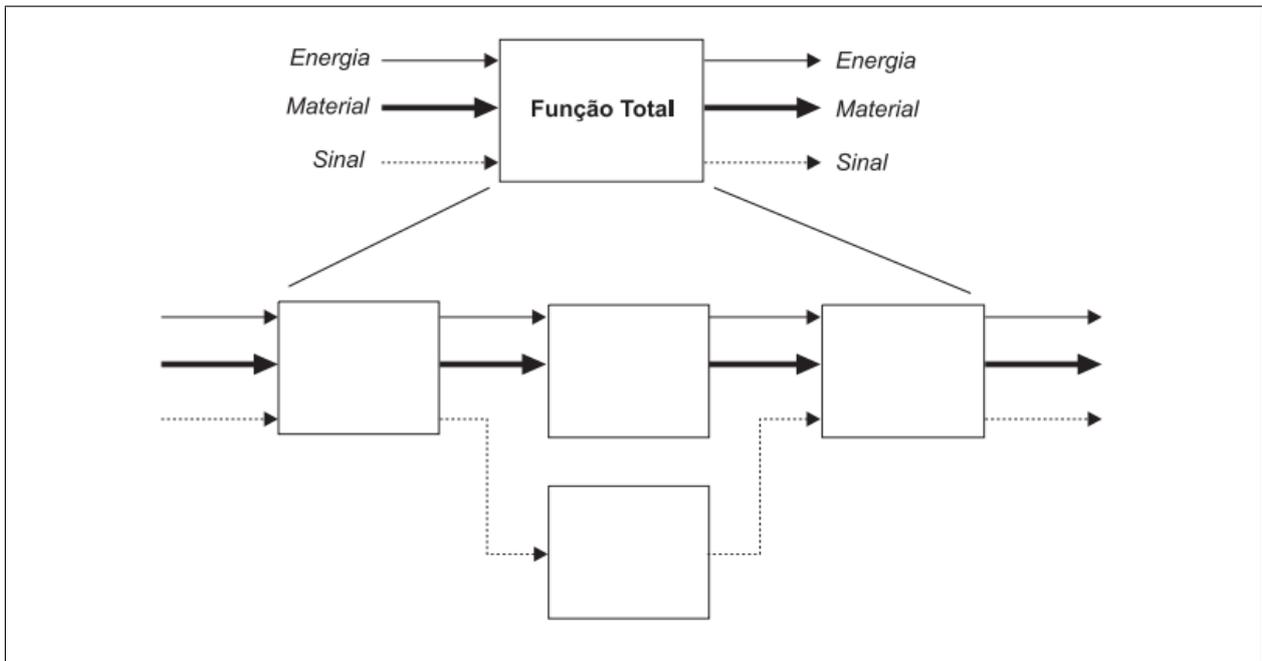


Figura 2.5: Estrutura Funcional. Fonte:Rozenfeld e Amaral (2006)

módulos em produtos, como por exemplo, a Matriz Indicadora de Módulos, apresentada por Rozenfeld e Amaral (2006).

Com a definição de módulos o próximo passo é o desenvolvimento do projeto preliminar (*embodiment design*, em inglês), ou seja, definem-se quais os princípios de solução serão adotados e inicia-se a conceptualização do produto propriamente dita. Assim como outras etapas do PDP, diversas ferramentas foram desenvolvidas para realizar a seleção de conceitos do produto, como prática em ambientes de ensino, e também na indústria, são selecionadas algumas (em geral de três a cinco) opções de arquitetura para o produto e as mesmas são contrastadas com os requisitos do produto e dos clientes obtidos ao final do projeto informacional, de forma a elencar as arquitetura e racionalizar a seleção. Na Figura 2.4, é possível observar que na norma VDI 2221, a seleção do projeto preliminar é inicialmente realizada por módulos (etapa 5) e posteriormente para o produto como um todo (etapa 6). Na etapa 6 são realizadas as definições de etapas de montagem e componentes de interface entre módulos, resultando no layout final do produto, contendo todas informações essenciais para a realização do mesmo. Com o conceito do produto definido, parte-se para a realização de cálculos de engenharia para dimensionar componentes, define-se tolerâncias para o projeto, baseado principalmente na definição de etapas de montagem e define-se o processo de manufatura (ou aquisição, à depender do tipo de produto) para todos componentes do produto.

Na etapa final de desenvolvimento (etapa 7) todas instruções são documentadas, resultando na documentação final do produto, que deve conter desenhos técnicos de conjunto, montagem e detalhamento, listas de componentes (BOM - Bill of Materials), instruções de produção, montagem, controle de qualidade, transporte e operação.

Especificidades podem ser realizadas durante o projeto do produto, como prototipagens, otimizações e homologações, porém, todo processo necessário para levar um produto ao mercado após seu projeto varia de acordo com o produto sendo desenvolvido e não serão abordados na presente dissertação, por serem mais relacionados à Gestão do Processo de Desenvolvimento de Produtos do que ao processo de projeto. Para exemplificar o processo de projeto de produtos em uma visão voltada para Gestão do PDP, a Figura 2.7 ilustra as entregas e fases desenvolvidas por Rozenfeld e Amaral (2006). É possível analisar que os processos são similares, apresentando a mesma estrutura lógica da norma VDI 2221. Na Figura 2.7 o resultado de cada fase possui uma especificação em função de documentos mais clara e direta, indicando inclusive as etapas de realização de protótipos, homologações e certificações.

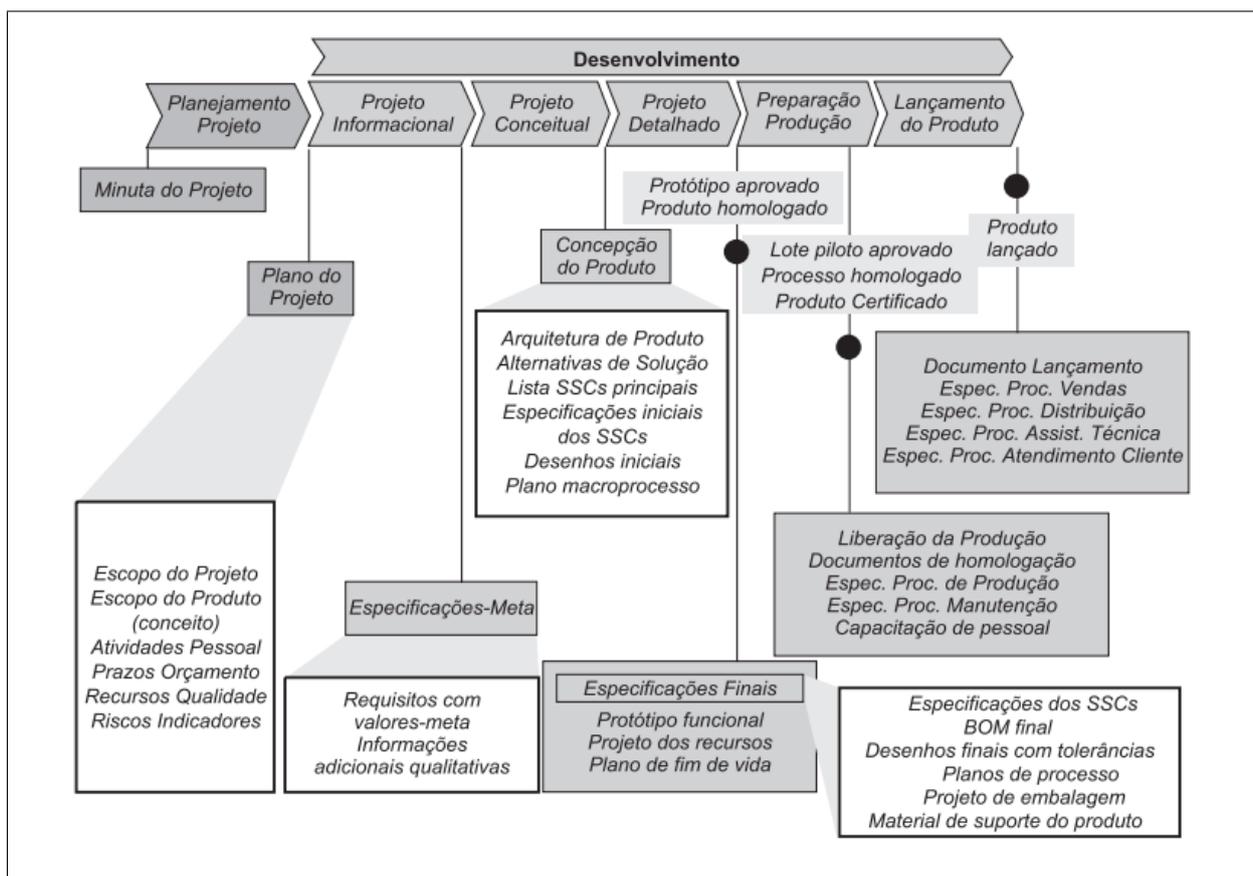


Figura 2.6: Apresentação de entregas por fases do Processo de Desenvolvimento de Produtos. Fonte:Rozenfeld e Amaral (2006)

2.3 Projeto para X

A metodologia de "Design for X", traduzida como "Projeto para X", é uma ferramenta utilizada em desenvolvimento de produtos para otimizar o desenvolvimento em função de alguma característica, que na aplicação será substituída pelo "x" descrito na técnica. As práticas e técnicas

de DfX são utilizadas na tentativa de prever e antecipar possíveis alterações de projeto que poderiam causar atraso em tempo para o mercado de produtos ou aumentar os custos de desenvolvimento. Além disso, o "Projeto para X" busca atingir um alto nível de excelência em função da característica aplicada.

As metodologias mais difundidas do DfX são o projeto para manufatura (DfM) e projeto para montagem (DfA), porém, na literatura são encontradas 25 características que podem ser otimizadas, apresentadas na Tabela 2.5.

Apesar da simples definição as ferramentas de DfX representam um avanço para o desenvolvimento de produtos. As metodologias são aplicadas durante o desenvolvimento e incluem guias de projeto que servem de base para otimizar aspectos de produtos. A gestão de conhecimento gerada por essas técnicas permite facilitar o projeto de produtos e atender as necessidades e requisitos de forma clara e otimizada.

2.3.1 Projeto para Manufatura e Montagem

DfM e DfA definem as práticas e guias de projeto para realizar a otimização de um produto junto com seu sistema de produção para reduzir o tempo e o custo de desenvolvimento e aumentar o desempenho, a qualidade e a lucratividade. Isso é feito ao considerar simultaneamente os objetivos do projeto e as restrições de fabricação, tais como necessidades do usuário e do mercado, materiais, processos, métodos de montagem e desmontagem, requisitos de manutenção, etc (THOMPSON et al., 2016). Atualmente, as metodologias de DfM e DfA são listadas em conjunto, otimizando o projeto em função das etapas de fabricação e também de montagem, com isso, diversas fontes denominam a prática de Projeto para Manufatura e Montagem (DfMA, do inglês *Design for Manufacturing and Assembly*). Nesse trabalho as duas metodologias não serão combinadas, de forma a evitar a confusão com a abreviação de projeto para manufatura aditiva (DfMA).

O projeto é a primeira etapa da manufatura e é uma atividade que começa com esboços de peças e montagens e avança para formulação de modelos, onde os desenhos de montagem e os desenhos detalhados das peças são produzidos. Esses desenhos são então passados para engenheiros de manufatura e montagem, cuja função é otimizar os processos utilizados para produzir o produto final. Frequentemente, é nesse estágio que os problemas de fabricação e montagem são encontrados e as solicitações de mudanças de projeto são feitas. Por vezes, essas alterações de projeto resultam em atrasos consideráveis no lançamento do produto final. Além disso, quanto mais tarde no ciclo de projeto e desenvolvimento do produto ocorrerem, mais caras elas se tornarão. Portanto, não só é importante levar em conta a fabricação e a montagem durante o projeto do produto, mas também essas considerações devem ocorrer o mais cedo possível no ciclo de projeto (BOOTHROYD, 1994). Baseado nesse contexto apresentado por Boothroyd (1994), as ferramentas de DfM e DfA otimizam o desenvolvimento de produtos em função das etapas de

Tabela 2.5: Possíveis X-bilidades

Nome em português	Nome em inglês	Sigla
Projeto para Estética	Design for Aesthetics	
Projeto para Montagem	Design for Assembly	DFA
Projeto para Configuração	Design for Configuration	
Projeto para Custo	Design for Cost / Profit	DFC
Projeto para Meio Ambiente, Reciclagem e Descarte	Design for Environment / Recycling / Disassembly	
Projeto para Inspeção	Design for Inspectability	
Projeto para Manutenibilidade	Design for Maintainability / Service / Repair	
Projeto para Manufatura	Design for Manufacturing	DFM
Projeto para Modularidade	Design for Modularity	
Projeto para Embalagem	Design for Packaging / Transportability	
Projeto para Precisão	Design for Precision	
Projeto para Confiabilidade	Design for Reliability	
Projeto para Robustez	Design for Robustness	
Projeto para Segurança e Responsabilidade Social	Design for Safety / Liability	DFS
Projeto para Normalização	Design for Standards	
Projeto para Apoio Logístico	Design for Supportability	
Projeto para Teste	Design for Testability	
Projeto para Uso Amigável / Ergonomia	Design for Use / Ergonomics / Human Factors	
Projeto para Ciclo de Vida	Design for Cicle of Life	DFCL
Projeto para Competição	Design for Competition	
Projeto para Controle Dimensional	Design for Dimensional Control	DDC
Projeto para Mínimo Risco	Design for Minimum Risk	
Projeto para Qualidade	Design for Quality	
Projeto para Atendimento	Design for Service	
Projeto para Armazenamento e Distribuição	Design for Storage and Distribution	

Fonte: Adaptado de (MELO; MERINO; MERINO, 2017)

fabricação e montagem, buscando antecipar potenciais problemas ou alterações ainda na definição de concepções do produto e evitando gastos com alterações tardias ou até mesmo o reprojeto de peças em função de inviabilidades técnicas.

Andreasen (2011) define uma estrutura para o DfA que permite facilitar o entendimento e ilustrar uma longa linha de princípios para o DfA, vinculando declarações sobre as características do produto a declarações sobre as características do equipamento e apontando quais efeitos seguir o princípio pode ter. A estrutura é exemplificada em três definições: processo de montagem e equipamentos para montagem e produto, ilustradas nos tópicos abaixo.

- O processo de montagem é descrito como um sistema de atividades, mostrando como as peças (operandos) foram trazidas para a estrutura de montagem por equipamentos de montagem ou humanos (operadores).
- O equipamento de montagem é visto como um sistema, caracterizado por suas funcionalidades e pelas características que são importantes para a montagem.
- O produto é visto como um sistema de peças identificadas pelas características dessas peças e suas relações de importância para a montagem.

As metodologias de DfM e DfA podem ser visualizadas em três níveis de abstração. No primeiro nível, o oferecem ferramentas, técnicas e diretrizes concretas para adaptar um projeto a um determinado conjunto de restrições. Geralmente são específicas do processo (por exemplo, Projeto para Moldagem por Injeção), específicos do recurso (por exemplo, como o tamanho da peça, peso e simetria afetam o tempo de inserção/montagem), ou específicos da atividade (por exemplo, como calcular o tempo mínimo teórico de montagem). No próximo nível de abstração, visam compreender e quantificar o efeito do processo de projeto na fabricação (e vice-versa). Isso é necessário para melhorar o desempenho do sistema de fabricação, as qualidades de execução do produto (custo, funcionalidade, satisfação do cliente, etc.), as qualidades de evolução (ao longo da vida) do produto (segurança, confiabilidade, serviço e custos de reparo, etc.), e o potencial de longo prazo do plano de negócio associado (por exemplo, a capacidade de responder a picos inesperados na demanda do produto). Nesse contexto, são considerados subconjuntos de DfX. No nível mais alto, exploram a relação entre projeto e fabricação e seu impacto no processo de projeto e na prática do projeto. Nesse contexto, abordam tópicos como seleção de materiais e processos, engenharia simultânea e como melhorar o CAD para dar suporte as etapas de fabricação e montagem (THOMPSON et al., 2016).

2.4 Projeto para Manufatura Aditiva

Projeto para Manufatura Aditiva (DfMA) é uma metodologia de projeto que visa tirar máximo proveito das características e restrições dos processos de MA. O objetivo do DfMA é definido

como uma síntese de formas, tamanhos, mesoestruturas geométricas e composições de materiais e microestruturas para melhor utilizar os recursos do processo de manufatura e atingir o desempenho desejado e até mesmo maximizar o desempenho do produto (KUMKE; WATSCHKE; VIETOR, 2016).

Projeto para manufatura (DfM) normalmente significa que os projetistas devem adaptar seus projetos para eliminar as dificuldades de manufatura e minimizar os custos. No entanto, as tecnologias de MA, oferecem uma oportunidade de repensar o DfM para aproveitar os recursos exclusivos dessas tecnologias (CHU; GRAF; ROSEN, 2008). Nos últimos anos, tem havido um interesse crescente na abordagem de DfM para MA como um novo conceito, o DfMA, mas na verdade não é uma abordagem nova, deve-se considerar que DfMA está apenas aplicando a abordagem de DfM para MA como foi realizado para outros processos de fabricação (ASADOLLAHI-YAZDI; GARDAN; LAFON, 2017). O DfM exige que os projetistas tenham um bom entendimento das restrições de fabricação impostas pelos métodos de fabricação disponíveis. Algumas dessas restrições de fabricação são atenuadas pela MA, enquanto outras não (YANG; ZHAO, 2015).

Diversos casos de sucesso na implementação de tecnologias de MA podem ser encontrados na literatura e peças fabricadas por MA estão se tornando mais difundidas por todo mundo, porém, não há uma estrutura de projeto clara para implementar o processo de projeto, e a extensão do sucesso depende muito da experiência dos projetistas e da compreensão de requisitos funcionais (YANG; TANG; ZHAO, 2015).

Segundo Pradel et al. (2018) a MA não é aplicada em projeto de produtos por falta de conhecimento da técnica por parte dos profissionais de projeto de produtos, onde muitos a conhecem e aplicam para prototipagem mas não sabem como utilizá-la como método de fabricação de peças finais. Ainda na publicação os autores definem que as metodologias de DfMA possuem três principais limitações:

1. Os trabalhos são baseados em definir a manufaturabilidade de peças já modeladas, ao invés de poderem ser guias para etapas anteriores de desenvolvimento de produto, que poderiam prover aos desenvolvedores soluções alternativas de design.
2. As publicações são baseadas em aplicações específicas, ou análises experimentais para parâmetros específicos no processo, sem uma avaliação da aplicabilidade das conclusões em outros tipos de projeto.
3. A natureza prescritiva das metodologias desenvolvidas, que são complicadas de serem adotadas nas empresas, por já possuírem guias próprios para desenvolvimento de produtos.

O número de estudos publicados sobre manufatura aditiva tem crescido a cada ano, indicando que a maturidade da tecnologia tem evoluído constantemente. Na área de metodologias

para projetos de peças por manufatura aditiva pretende-se estabelecer regras e frameworks para o desenvolvimento de produtos, porém os estudos publicados avaliam somente parâmetros do processo e aplicabilidade das técnicas. Sem apresentar metodologias claras de como utilizar os processos como método de fabricação desde as etapas iniciais de modelagem.

Atualmente as publicações que envolvem metodologias para projeto em manufatura aditiva podem ser divididas em três grupos, o primeiro grupo representam pesquisadores que procuram estabelecer uma metodologia de projeto que envolva a concepção de peças por manufatura aditiva desde o princípio do desenvolvimento. O segundo grupo engloba trabalhos que procuram reduzir as limitações do processo, buscando avanços nas técnicas ou estabelecendo parâmetros de processo otimizados. Já o terceiro grupo envolve trabalhos que procuram estabelecer guias para desenvolvimento de peças por manufatura aditiva, focando, em sua maioria, na definição da manufaturabilidade de uma peça, indicando se a mesma necessita de algum tipo de reprojeto ou adaptação (BOOTH et al., 2017). A divisão dos grupos é ilustrada na Figura ??.

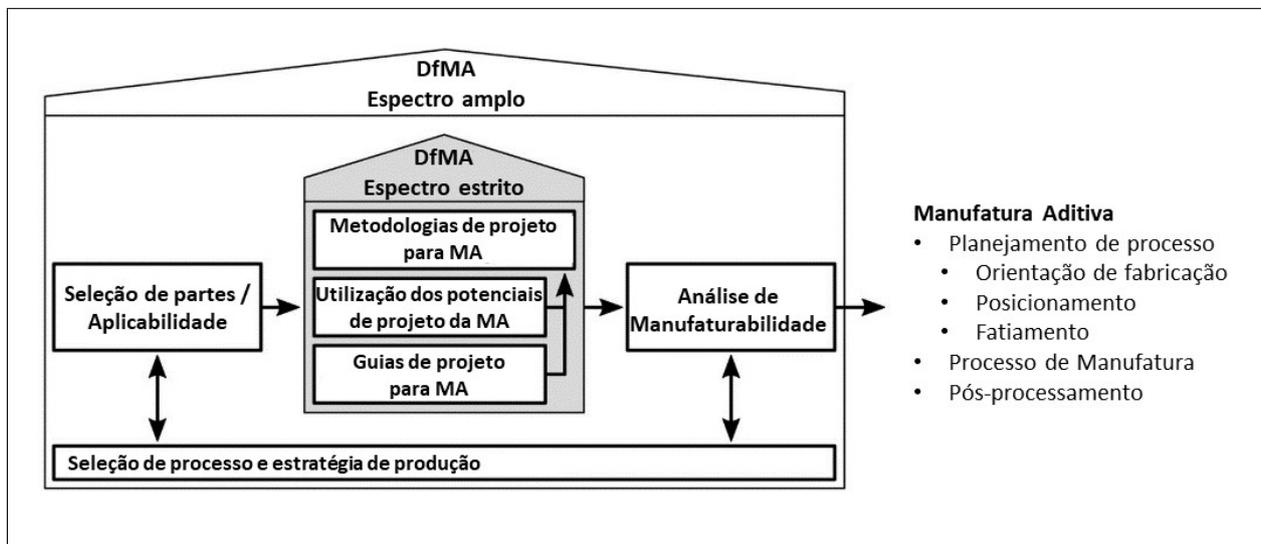


Figura 2.7: Grupos de desenvolvimento de DfMA. Fonte: Kumke, Watschke e Vietor (2016), com adaptações

Uma pesquisa realizada por Pradel et al. (2018) com profissionais de desenvolvimento de produto demonstrou que a capacidade da manufatura aditiva para otimização de forma e peso é conhecida pela maioria dos profissionais, porém existem preocupações quanto à durabilidade de peças impressas quando são utilizadas em esforços repetitivos, ou seja, resistência à fadiga, e qual o comportamento de peças expostas à intempéries climáticas.

As limitações das tecnologias de fabricação disponíveis para materializar um produto determinam seu projeto. Assim, não faz sentido ter um conjunto de novas tecnologias de manufatura que oferecem novas possibilidades, e continuar considerando soluções de projeto anteriores que estão condicionadas pelas limitações de outras tecnologias de manufatura (GARCÍA-DOMINGUEZ; CLAVER; SEBASTIÁN, 2020b). O aproveitamento desses benefícios não pode ser alcançado a menos que projetistas mudem seu pensamento de projeto tradicional para a manufatura subtra-

tiva. Isso é desafiador, mesmo para projetistas experientes. Ao contrário das técnicas tradicionais de manufatura, onde o planejamento do processo é razoavelmente estabelecido, faltam diretrizes formais e estruturadas sobre os benefícios e limitações da MA, bem como sobre como os projetos devem ser modificados para acomodar esses benefícios e limitações (DINAR; ROSEN, 2017).

A necessidade para ampla utilização da MA é a definição de um sistema que possa guiar os projetistas pelas vantagens e desvantagens da implementação dos processos de MA para uma necessidade específica de projeto e pela configuração dos parâmetros do processo, como orientação da peça durante a fabricação e necessidade de suportes. Em algumas metodologias de DfMA, os projetistas percebem que os projetos de componentes podem ser alterados para acomodar as limitações do processo sem comprometer a funcionalidade pretendida do projeto. Em outros casos, buscam configurar os parâmetros do processo para satisfazer os parâmetros do projeto (DINAR; ROSEN, 2017). Definir novas metodologias de projeto é crucial para alcançar o nível de otimização disponibilizado pelas tecnologias de MA. O processo de fabricação oposto à métodos subtrativos representa novos paradigmas de fabricação, diminuindo as restrições de geometria e possibilitando o desenvolvimento de estruturas altamente otimizadas (GARCÍA-DOMINGUEZ; CLAVER; SEBASTIÁN, 2020b).

Yang e Zhao (2015) relatam os cinco principais problemas em relação à metodologias de DfMA existentes na literatura, descritos abaixo:

- A dificuldade em determinar as características otimizadas reais para um determinado processo de MA a partir de um modelo CAD inicial projetado para um método de fabricação tradicional não foi abarcada de forma suficiente.
- A perspectiva do DFMA utilizando a otimização da topologia e da estrutura celular avança um passo para fazer um projeto melhor, porém métodos específicos de otimização da estrutura impedem a possibilidade de maximizar o potencial da MA. A maioria desses métodos de projeto são aplicáveis apenas nas etapas que antecedem a preparação para produção, ou seja, na fase de projeto detalhado.
- O conceito de combinar requisitos funcionais e restrições de fabricação em um projeto relacionado para MA e a ideia inovadora de superfícies funcionais e volumes funcionais iniciam o propósito de maximizar a liberdade de design habilitada pelo MA. No entanto, raramente envolve como combinar requisitos funcionais e restrições de fabricação com atributos físicos.
- O aspecto de melhoria da capacidade de fabricação e montagem raramente é abordado nos métodos de projeto relacionados a MA, que tendem a gerar um projeto parcialmente otimizado.
- A maioria das metodologias de projeto disponíveis são representações semânticas que são difíceis de serem implementadas e de manter o fluxo de projeto consistente.

Como descrito na seção de fundamentação do Processo de Desenvolvimento de Produtos, antes de partir para o desenvolvimento de um produto é necessário definir estratégias iniciais de produção, custos, complexidade e viabilidade técnica, além de outros aspectos supracitados. Nessa etapa, que é inerente à qualquer metodologia de PDP, os aspectos levantados já indicam se o produto possui características que usufruem das vantagens que a MA pode oferecer. Portanto, as metodologias de DfMA necessitam começar a alterar os modelos do PDP à partir de suas primeiras atividades, permitindo decidir nas etapas iniciais do desenvolvimento se as características da MA são benéficas para o desenvolvimento.

As vantagens da MA são aplicadas principalmente na observância de alta complexidade em quatro principais áreas: forma, hierarquia estrutural, composição de materiais e funcionalidade (YANG; ZHAO, 2015). Essas vantagens são voltadas para produtos desenvolvidos ou em fase final de desenvolvimento, pois é necessário existir uma definição de forma, composição e funcionalidades, sendo que todas essas definições são realizadas em etapas tardias do PDP. Na literatura, grande parte das publicações acadêmicas buscam justificar o uso da manufatura aditiva pautando em uma ou mais dessas vantagens e a necessidade para a ampla utilização da MA é possibilitar a análise de sua viabilidade em etapas iniciais de projeto, como descrito em Renjith, Park e Kremer (2020).

Um modelo de PDP aplicável para MA é definido pela norma ISO/ASTM 52910:2018 publicada em conjunto pelas agências de normas e regulamentações ISO e ASTM. O modelo parte de um requisito de projeto de um produto generalizado e em seguida estrutura uma atividade de identificação de potenciais vantagens na utilização da MA, segundo a norma, sem a observância de alinhamento entre os requisitos do produto e ao menos uma das vantagens oferecidas pela MA o projetista deve seguir para fabricação à partir de métodos convencionais. Em seguida o processo passa para a seleção de uma tecnologia de MA para fabricação e posteriormente um processo iterativo de desenvolvimento com etapas de identificação de limitações e requisitos de processo, projeto para funcionalidade, otimização, considerações técnicas e identificação de riscos e limitações técnicas, com uma etapa de revisão. A etapa de revisão apresentada é relativa à custos de fabricação, porém, diversos critérios de decisão podem ser aplicados como qualidade, tempo de fabricação e estética, utilizados em conjunto ou individuais à depender do tipo de produto.

Devido à importância de identificar os potenciais da MA antes de elaborar o desenvolvimento de produtos, a norma complementa a atividade à partir de processo de decisão. O processo de tomada de decisão inicia à partir da análise de viabilidade do processo à partir de duas perspectivas, primeiro se existem materiais de MA capazes de atender aos requisitos do produto e segundo se existem máquinas disponíveis com um volume útil de fabricação que atende as dimensões do produto. Obtendo sucesso nas duas análises de viabilidade a identificação de potencial é realizada.

Na ISO/ASTM 52910:2018 os potenciais listados são customização em massa, necessidade

de alívio de peso, estruturas internas complexas, integração funcional de partes (consolidação de partes), superfícies complexas, complexidade de composição de materiais. Como tomada de decisão a norma define que para prosseguir com o projeto voltado para MA é necessário observar níveis alto ou médio para ao menos um desses potenciais. No caso de obter somente baixo potenciais a MA deve ser descartada.

Capítulo 3

Proposta de um Processo de Desenvolvimento de Produto para Manufatura Aditiva

3.1 Metodologia de pesquisa

Segundo Dinar e Rosen (2017), a primeira etapa na realização de uma metodologia de DFMA é desenvolver uma base de conhecimento. Essa base pode surgir da identificação das necessidades do DFMA, coletar diretrizes de projeto, regras e estudos de caso. Para possibilitar a criação da base de conhecimento, a proposta desse trabalho parte da análise bibliográfica de metodologias de desenvolvimento de produto voltadas para MA. Para filtrar as publicações foram inicialmente selecionados trabalhos que apresentassem uma metodologia de desenvolvimento de produtos, para tanto as pesquisas balizaram-se nas bases do Web of Science, Science Direct, ASME Digital Collection e ASTM International, pesquisando por publicações que continham as palavras "DFAM", "DFMA" e "Design for Additive Manufacturing". Com a extensa quantidade de publicações recentes em MA foram adicionados novos filtros com as palavras "workflow", "methodology" e "approach", e filtrando para publicações nos últimos 5 anos (2016-2020). Os resultados estão sumarizados na Tabela 3.1. A quantidade de publicações na área tem aumentado nos últimos anos e por essa razão existem tantos trabalhos a serem considerados. A tabela 3.2 detalha a quantidade de publicações somente na base do Science Direct por ano de 2016 à 2020, com dados atualizados em janeiro de 2021.

Devido a quantidade de publicações em cada base de pesquisa a busca por trabalhos relevantes se limitou às 200 publicações mais relevantes, classificadas pelas próprias bases de pesquisa, totalizando assim 2100 publicações. Essas publicações foram filtradas seguindo a lógica: (1) Remoção de publicações duplicadas; (2) Seleção baseada em título e resumo; (3) Seleção baseada em leitura rápida (introdução, método, conclusão); (4) Seleção baseada em leitura completa dos

Tabela 3.1: Termos utilizados para pesquisa

Base de publicações	Termos pesquisados	Quantidade
Web of Science	Design + additive manufacturing + methodology	1022
	Design + additive manufacturing + workflow	116
	Design + additive manufacturing + approach	2028
Science Direct	Design + additive manufacturing + methodology	16781
	Design + additive manufacturing + workflow	1491
	Design + additive manufacturing + approach	32159
ASME Digital Collection	Design + additive manufacturing + methodology	2115
	Design + additive manufacturing + workflow	174
	Design + additive manufacturing + approach	4455
ASTM Digital Library	Design + additive manufacturing + methodology	450
	Design + additive manufacturing + workflow	9
	Design + additive manufacturing + approach	725

Tabela 3.2: Publicações na base Science Direct por ano

Termos pesquisados	2016	2017	2018	2019	2020
Design + additive manufacturing + approach	4097	5101	6145	7107	9711
Design + additive manufacturing + methodology	1844	2257	2772	3290	6620
Design + additive manufacturing + workflow	141	195	268	322	565

artigos.

A cada etapa de revisão da literatura foram selecionados os mais relevantes em função dos objetivos da presente dissertação, ao final 21 artigos foram selecionados por apresentarem metodologias de desenvolvimento de produtos claras e voltadas para MA. Com os artigos selecionados foi realizada uma análise de relevância dos artigos baseada na classificação de fator de impacto (JIF) dos periódicos no relatório de citações da Clarivate Analytics de 2019 (InCites Journal Citation Report), onde os fatores de impacto médios para engenharia mecânica e engenharia de produção foram 1.9145 e 2.612, respectivamente, e o índice h, determinado pelo Scimago Journal & Country Rank, do Scimago Lab. O índice h expressa o número de artigos da revista (“h”) que receberam pelo menos “h” citações. Quantificando a produtividade científica do periódico e o impacto científico. A última métrica analisada para os periódicos foi referente ao maior percentil observado na base do Scopus, que indica a posição relativa de um título de série em seu campo de assunto. Seguindo a lógica de qualificação ilustrada na Tabela 3.4

Os fatores de impacto (JIF) e o índice h, estão listados na Tabela 3.4. No trabalho de filtragem de publicações os fatores de impacto não foram considerados, a concomitância dos objetivos da publicação com a definição de uma metodologia de desenvolvimento de produtos voltados para a MA foi a principal consideração na seleção dos artigos. Para periódicos que não foram encontradas métricas de qualificação os campos estão vazios.

Tabela 3.3: Qualificação baseada em percentil do Scopus

Percentil	Qualificação
100% - 87,5%	A1
87,5% - 75%	A2
75% - 62,5%	A3
62,5% - 50%	A4
50% - 37,5%	B1
37,5% - 25%	B2
25% - 12,5%	B3
12,5% - 0%	B4

Tabela 3.4: Tabela de fatores de impacto por revista

Jornal / Periódico	Quantidade de Publicações	Índice h	Fator de Impacto	Qualificação
CIRP Annals - Manufacturing Technology	1	143	3.641	A1 (94%)
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing	1	84	5.057	A1 (99%)
Virtual and Physical Prototyping	3	36	7.310	A1 (99%)
Journal of Manufacturing Processes	1	46	4.086	A2 (87%)
Advanced Engineering Informatics	1	75	3.879	A2 (86%)
Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME	1	115	2.652	A2 (86%)
Rapid Prototyping Journal	1	78	0.84	A2 (81%)
Procedia CIRP	3	54	3.099	A3 (74%)
Polymers - MDPI AG	2	61	2.935	A2 (75%)
Journal of Computing and Information Science in Engineering	1	47	1.431	A3 (73%)
International Journal of Precision Engineering and Manufacturing	2	46	1.779	A3 (70%)
Computer-Aided Design and Applications	2	28	-	A4 (50%)
Journal of Theoretical and Applied Information Technology	1	26	-	B2 (37%)
High Value Manufacturing	1	9	-	-
Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference	1	47	-	-
Structural Integrity of Additive Manufactured Parts - ASTM	1	-	-	

3.2 Sistemáticas de projeto para Manufatura Aditiva

Para definir uma sistemática de desenvolvimento de produtos voltada para MA o primeiro passo consistiu em analisar individualmente as metodologias selecionadas através da pesquisa desenvolvida, indicando pontos fortes e fracos e buscando avaliar etapas e ferramentas desenvolvidas. Para cada publicação foi elaborado um quadro resumindo a fase de desenvolvimento de produto abarcada pela metodologia, os processos de tomada de decisão e avaliação de peças e as ferramentas utilizadas. Após esse processo foram desenvolvidos gráficos para ilustrar a abordagem das metodologias, verificar pontos em comum e principais ferramentas disponíveis para o desenvolvimento de produtos voltados para MA. O principal detalhe abordado em todas as metodologias parte da cadeia virtual que todo processo de fabricação via MA possui, esse detalhe deve ser levado em consideração para qualquer tecnologia de MA utilizada, tendo em vista que a fabricação por métodos aditivos sempre é feita baseada em um modelo virtual de produto.

Rosen (2007) e posteriormente Chu, Graf e Rosen (2008) apresentam um processo de desenvolvimento de produtos partindo da definição de estruturas celulares projetadas. Estruturas celulares são elementos que se repetem para constituir o interior de uma superfície fechada, como apresentado por espumas e estruturas treliçadas, que na aplicação se resume a meso-estruturas (da ordem de grandeza de 0.1 - 10mm) treliçadas para preenchimento do interior de peças. Aproveitando assim da característica de processos de MA de produzirem peças ocas ou com preenchimento otimizado. O controle de preenchimento de peças permite colocar material apenas onde for necessário para uma aplicação específica. Atingir alta rigidez ou resistência e peso mínimo, são objetivos típicos. Requisitos multifuncionais também são comuns, como resistência estrutural e absorção de vibração. A área de mecanismos flexíveis compartilha a mesma motivação, onde a geometria local da estrutura permite que o mecanismo execute as movimentações especificadas (ROSEN, 2007).

A publicação define a interdependência entre processo de fabricação, estrutura geométrica, propriedade e comportamento, existente nos processos de MA. A relação proposta é apresentada na Figura 3.1. Segundo os autores o método DfMA geral consiste em uma travessia das estruturas na Figura 3.1 de Comportamento (*behavior*) para Processo (*process*) e de volta para Comportamento. A passagem do comportamento ao processo representa o projeto, em que os requisitos funcionais são mapeados para definirem propriedades e geometrias que satisfazem esses requisitos para estruturas e por meio do planejamento do processo para chegar a um processo de manufatura potencial. Indo na direção oposta, pode-se simular o dispositivo projetado e seu processo de fabricação para determinar o quão bem ele atende aos requisitos originais (ROSEN, 2007).

O processo de projeto de produto apresentado na publicação é ilustrado na Figura 3.2, o processo parte de uma geometria já definida e implementa a geração de um modelo virtual através de modelagem implícita. Com o modelo definido, o planejamento do processo de fabricação é

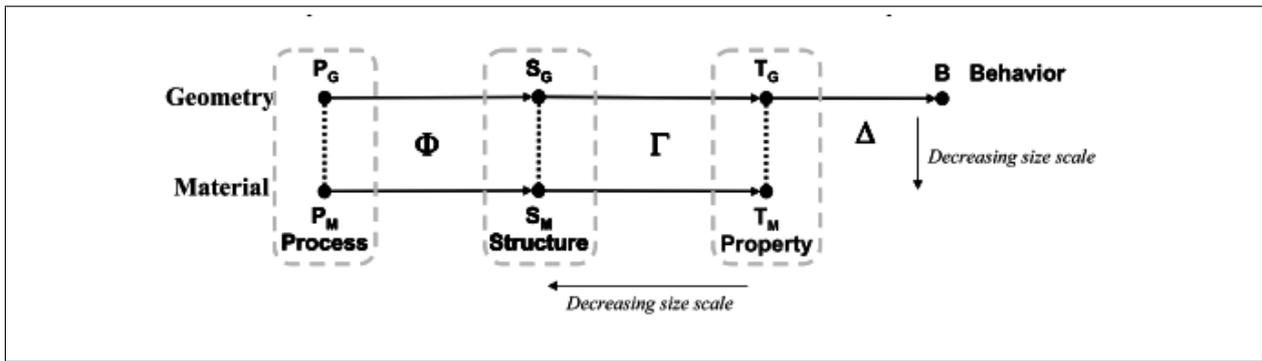


Figura 3.1: Relação entre processo, estrutura, propriedade e comportamento Fonte:Rosen (2007)

definido, possibilitando a simulação do processo e a identificação de propriedades da peça manufaturada. Posteriormente é realizada a checagem da relação entre comportamento e requisitos funcionais do produto e uma análise final do código de fabricação para finalizar o processo.

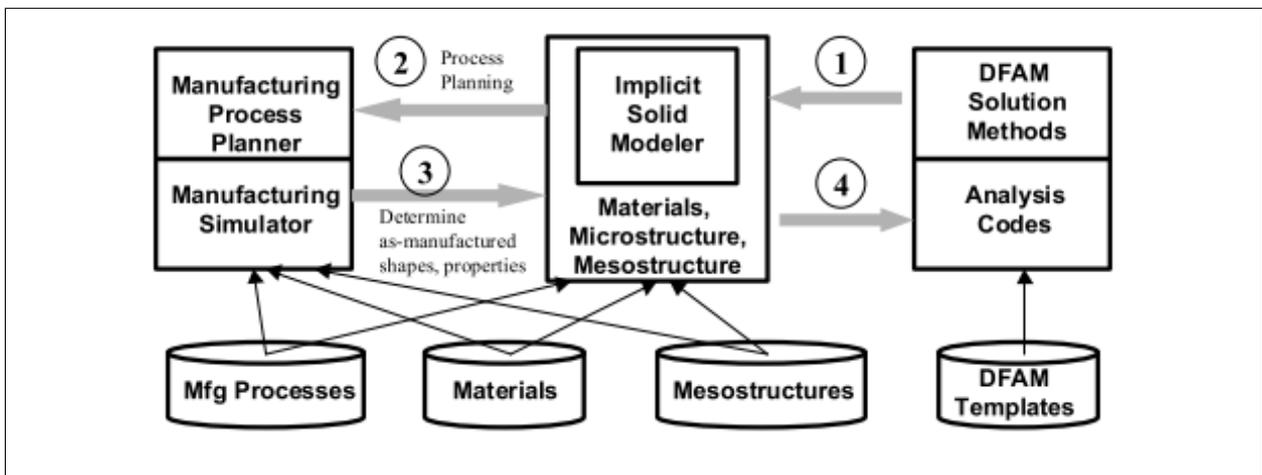


Figura 3.2: Processo de projeto de produto. Fonte:Rosen (2007)

Para garantir a manufaturabilidade da geometria de peças os autores desenvolveram o conceito de Elementos Manufaturáveis, propondo a definição de um banco de dados de estruturas de treliças com informações de dimensões mínimas que a estrutura unitária de replicação deve possuir para que seja fabricada. O conceito parte de uma análise de propriedades da tecnologia de SLA na solidificação de regiões para determinar os elementos mínimos manufaturáveis, porém, com a variação de características construtivas de máquinas e variações de propriedades de matéria-prima o conceito acaba precisando de uma validação prática e que na maioria das vezes será a determinante para documentar a capacidade do processo e que deve variar dependendo da máquina utilizada e do insumo.

Na publicação os autores utilizam somente a tecnologia de SLA para os estudos de casos, mas a metodologia pode ser aplicada para qualquer método de MA. Como pontos positivos da metodologia temos a análise da relação entre o processo de fabricação e o comportamento de peças, a definição de uma primeira metodologia considerando a cadeia virtual de desenvolvimento de produtos e o levantamento da necessidade de criação de bancos de dados para aplicar os conceitos

de DfMA de forma facilitada. A publicação de Chu, Graf e Rosen (2008) amplia as aplicações da metodologia desenvolvida, na publicação inicial de Rosen (2007), somente estruturas com preenchimento sólido que poderiam ser otimizadas em seu preenchimento são consideradas, na segunda publicação a aplicação para elementos estruturais e elementos de deformação projetada é demonstrada, além de desenvolver melhor a etapa de definição de estrutura celular unitária.

Quadro 3.1: Análise publicação Rosen (2007) e Chu, Graf e Rosen (2008)

Título	Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures / Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures
Autores (ano de publicação)	D. Rosen (2007) / C. Chu, G. Graf e D. Rosen (2008)
Fases de desenvolvimento	Projeto Preliminar e Projeto Detalhado
Ferramentas utilizadas	Elemento mínimo manufaturável; Otimização de preenchimento; Análise estrutural (MEF)
Principais contribuições	Apresentação de metodologia formal baseada na relação Processo - Estrutura - Propriedades - Comportamento; Conceito de elemento mínimo manufaturável; Estruturação de processo de projeto

Fonte: Autoria própria

Ponche et al. (2012) partem de uma análise preliminar de metodologias de DfMA para identificar as principais necessidades e características dos processos. Na visão dos autores, a grande necessidade em metodologias de DfMA é considerar uma visão global no desenvolvimento de produtos, que permite a utilização de guias voltados para MA desde a definição de concepções do produto, realizando uma relação direta entre os requisitos funcionais e as características da fabricação aditiva. Os trabalhos anteriores à publicação de Ponche et al. (2012) utilizam dos conceitos de DfM, que aplicam análises de manufaturabilidade à partir de geometrias e formas já definidas de produto, sem a possibilidade de alterações de concepção de produto em função do processo de manufatura. Essa visão dos autores e o pioneirismo na identificação da necessidade de iniciar o DfMA desde etapas preliminares de projeto é a principal contribuição do estudo, considerando os objetivos da presente dissertação.

A metodologia de projeto desenvolvida pelos autores constitui-se de três etapas: (1) Análise; (2) Determinação de volumes funcionais; e (3) Determinação da interação entre volumes funcionais, com características do processo de fabricação e especificações funcionais sendo utilizadas à cada etapa. A sistemática desenvolvida é apresentada na Figura 3.3.

Na etapa de análise performada na metodologia as principais definições são oriundas do processo de análise funcional do produto, identificando quais seriam as superfícies funcionais da peça, ou seja, as superfícies que necessitam de maior atenção do projetista por serem responsáveis por performar alguma funcionalidade necessária para a aplicação do produto. Apesar da publicação não definir como é realizado esse processo, é possível afirmar que é uma atividade

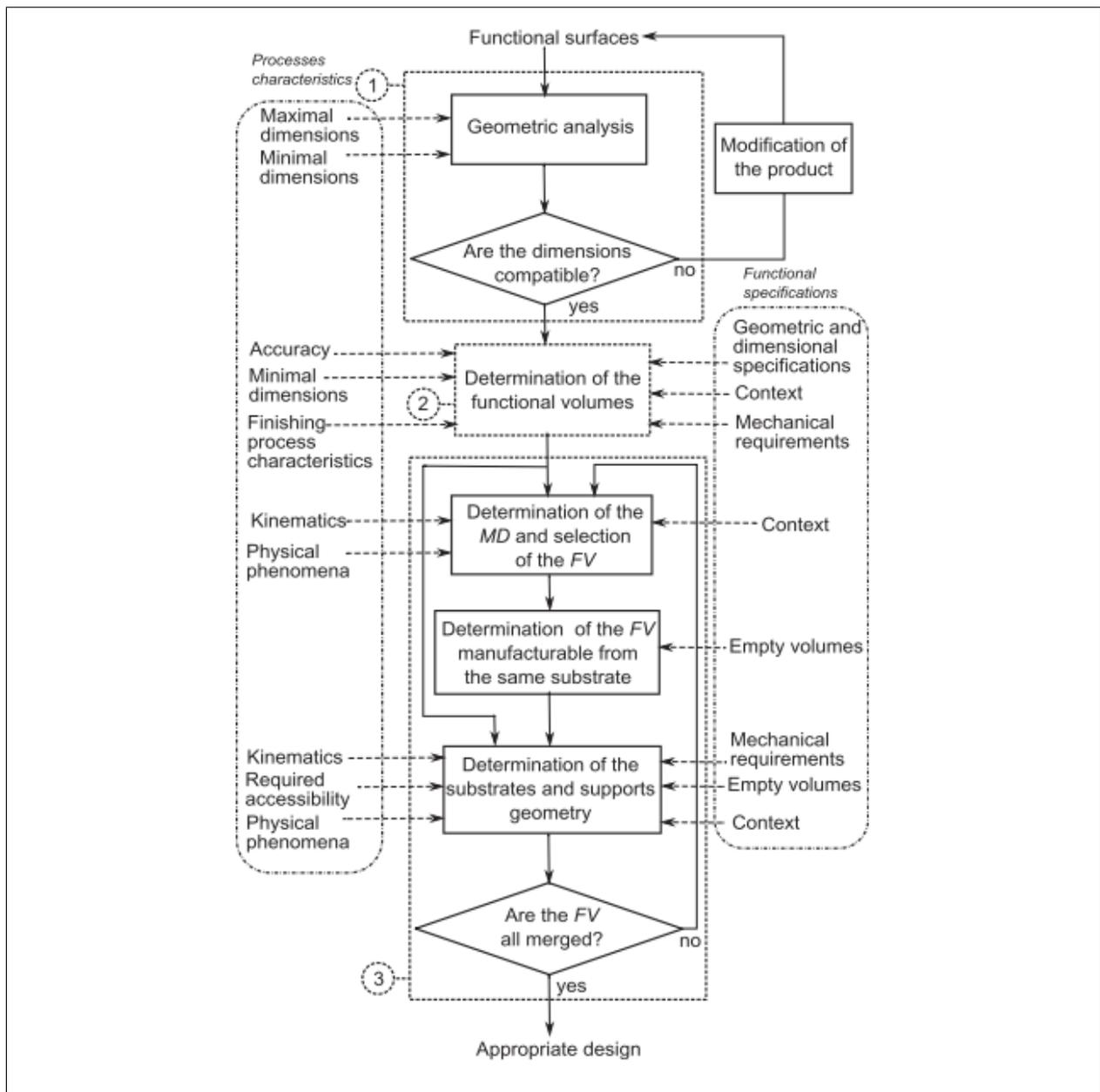


Figura 3.3: Processo de projeto de produto. Fonte: Ponche et al. (2012)

já consolidada na área de desenvolvimento de produtos e que não necessita de aprofundamento. A análise de dimensão da geometria do produto serve somente para averiguar se é possível fabricar toda geometria em um processo ou se é necessário subdividir a peça, mas considerando somente as dimensões essa análise é muito incompleta e não leva em consideração nenhuma característica da MA.

Na etapa de determinação de volumes funcionais a definição trazida pelos autores considera somente requisitos de acabamento das superfícies funcionais, atribuindo às superfícies um valor de espessura diretamente atrelado à necessidade de acabamento pós fabricação ou não. Na última etapa do processo são designadas as ligações entre os volumes funcionais identificados, levando em consideração características do processo de manufatura e requisitos baseados na análise fun-

cional do produto.

Na publicação, a detecção da necessidade da aplicação de diretrizes de DfMA iniciando à partir da definição da funcionalidade do produto é a principal contribuição, tendo em vista que a metodologia sugerida no estudo também não abarca todas etapas de desenvolvimento e analisa poucos aspectos relativos à MA na aplicação.

Quadro 3.2: Análise publicação Ponche et al. (2012)

Título	A New Global Approach to Design for Additive Manufacturing
Autores (ano de publicação)	R. Ponche, J.Y. Hascoet, O. Kerbrat, P. Mognol (2012)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual e Projeto Preliminar
Ferramentas utilizadas	Análise funcional; Superfícies e volumes funcionais; Otimização de orientação de fabricação
Principais contribuições	Início de abordagem global, utilizando a especificações funcionais e o conhecimento dos processos de MA para gerar designs voltados para MA; Metodologia sistêmica e objetiva;

Fonte: Autoria própria

Para estabelecer as bases de uma metodologia de projeto que leve em consideração as especificidades da MA Boyard et al. (2014) apresentam a metodologia ilustrada na Figura 3.4, a sistemática é dividida em 5 etapas: (1) análise funcional; (2) projeto conceitual; (3) arquitetura de produto; (4) projeto detalhado; e (5) implementação.

A representação da análise funcional apresentada é ilustrada em gráficos tridimensionais, como ilustrado na Figura 3.5 indicando a correlação entre funções e dividindo em blocos as funções que possuem relação direta. De acordo com os autores, mudanças que partem do cliente ocorrem com frequência ao longo do projeto do produto. É por isso que a extração de funções das especificações funcionais deve ser flexível e modular para permitir novas funções (BOYARD et al., 2014). Porém, a real vantagem da facilidade de alterações funcionais na metodologia é permitir a alteração de funções durante a análise do processo de manufatura, caracterizando uma flexibilidade de projeto e expandindo o uso de soluções possibilitadas pela MA.

Na representação da Figura 3.5 cada esfera indica uma função que deve ser realizada pelo produto e o conjunto de esferas, nomeadas de "set's" representa uma parte do produto. As linhas contínuas que ligam as esferas indicam uma relação direta entre funções e as linhas pontilhadas separam as partes que compõem o produto. Nas etapas de projeto conceitual e a arquitetura do produto a representação da análise funcional é utilizada para definir soluções que atendem aos requisitos funcionais levantados.

A fase de projeto detalhado, que analisa cada conjunto de funções presente no gráfico, corresponde a uma fase de DfM. Em primeiro lugar, todas condições de contorno são adicionados

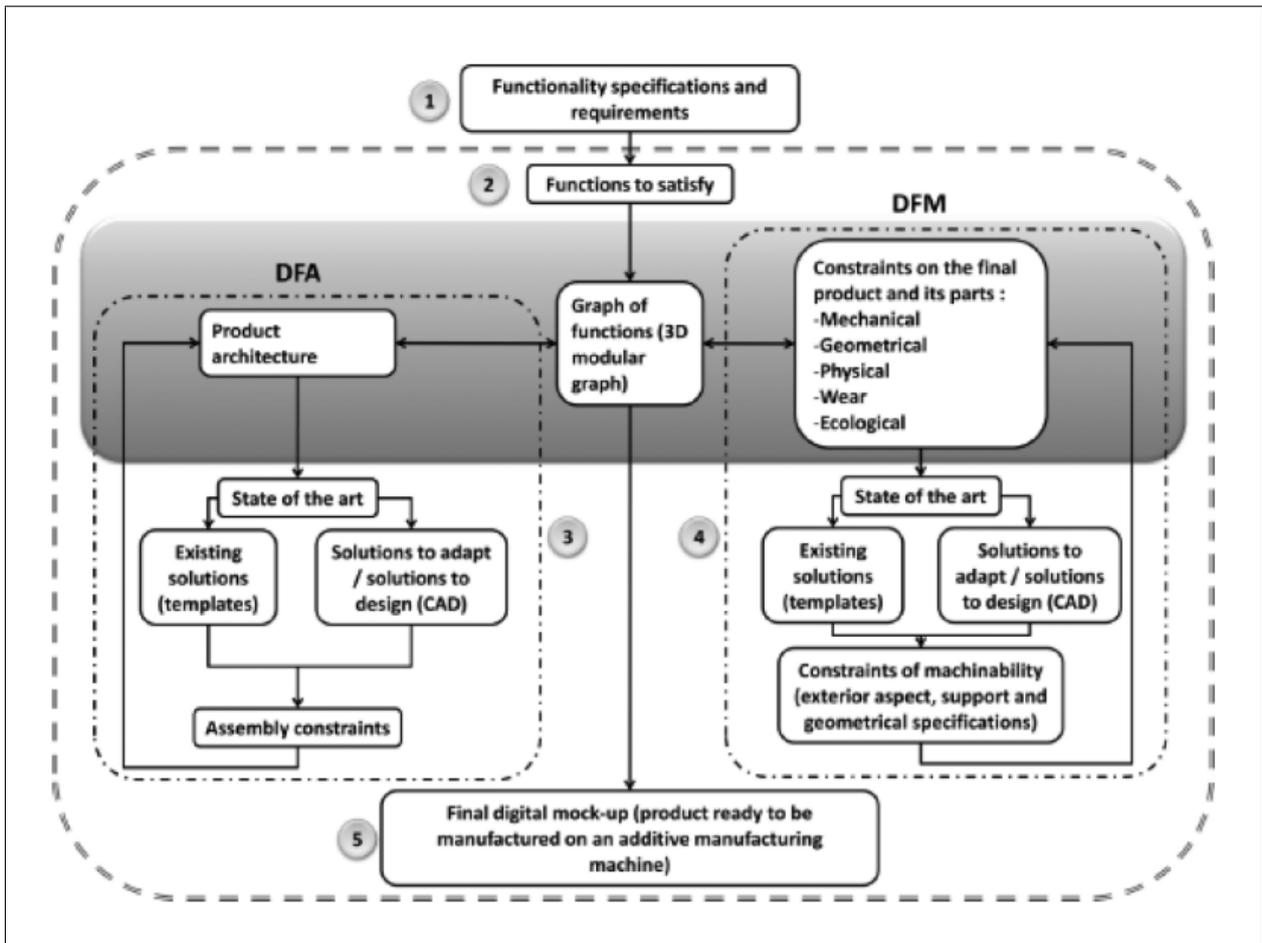


Figura 3.4: Processo de projeto de produto. Fonte: Boyard et al. (2014)

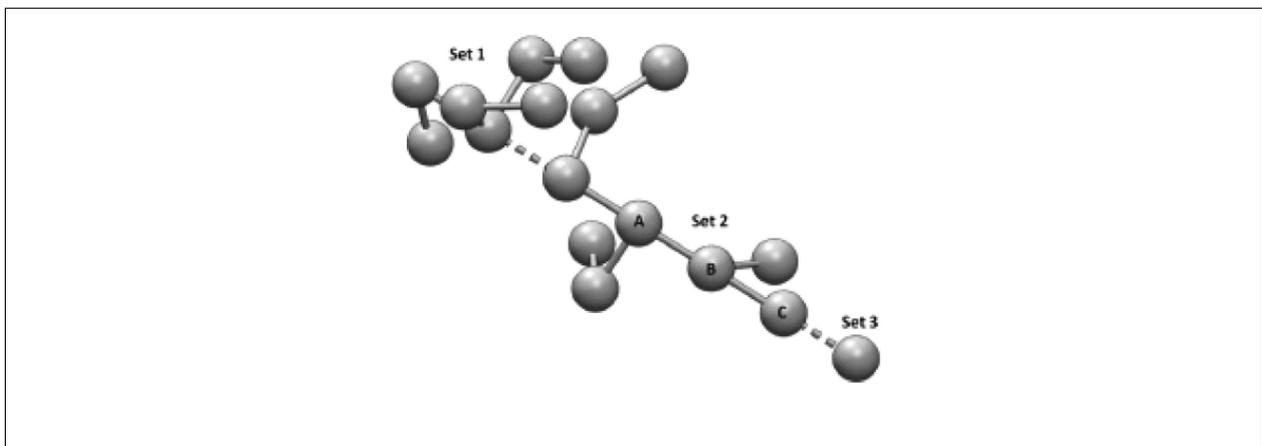


Figura 3.5: Análise funcional. Fonte: Boyard et al. (2014)

ao conjunto desta parte. Essas condições podem ser mecânicas, geométricas, físicas, de desgaste, ecológicas. Em seguida a aplicação é comparada com exemplos já desenvolvidos de soluções de MA, identificadas soluções com gráficos similares o processo propõe uma peça, se não a peça necessita ser definida.

A fase de definição de arquitetura de produto ocorre simultaneamente ao projeto detalhado e

funciona à partir do mesmo princípio, à cada peça proposta à partir da etapa de DfM do projeto detalhado a arquitetura do produto deve ser avaliada e a interação das diferentes partes reorganizadas. Em seguida a etapa de implementação representa a prototipagem funcional da peça, seguida de validação de modelo em cenário real. Os limites da metodologia apresentados no estudo incluem a dificuldade em definir o custo de desenvolvimento em função das atividades de desenvolvimento necessárias e a definição da metodologia para a interação dos stakeholders com os gráficos gerados à partir da análise funcional.

Quadro 3.3: Análise publicação Boyard et al. (2014)

Título	A design methodology for parts using Additive Manufacturing
Autores (ano de publicação)	N. Boyard, M. Rivette, O. Christmann, S. Richir (2013)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual
Ferramentas utilizadas	Análise Funcional; Análise de soluções existentes; Prototipagem funcional
Principais contribuições	Método de análise funcional flexível; Sistemática de projeto de produto; Método de apresentação da análise funcional.

Fonte: Autoria própria

Buscando aproveitar as vantagens da MA para fabricação de peças metálicas de geometria complexa, Ponche et al. (2014) desenvolvem uma metodologia geral para MA e depois aplicam a metodologia para o caso particular de peças metálicas fabricadas por varredura de laser sobre cama de pó (SLS) com paredes finas. A metodologia definida possui como objetivo inicial, permitir alterações de geometria de peças baseada em requisitos do processo de manufatura, agregando uma maior flexibilidade ao processo de desenvolvimento e propiciando a utilização de conceitos de DfMA para otimizar o produto.

A metodologia desenvolvida por Ponche et al. (2014) é separada em três etapas, (1) definição de direção de fabricação; (2) otimização funcional; e (3) otimização de trajetória de varredura. A Figura 3.6 ilustra a metodologia desenvolvida.

A etapa inicial de definição da orientação de fabricação da peça não é amplamente abarcada na publicação, reservando à listagem de trabalho correlatos a função de indicar métodos para definir a orientação. na publicação ocorre somente a menção da etapa ser definida por decisões envolvendo diversos critérios, sendo esses funcionais (acabamento, qualidade de superfícies, carregamentos) ou relacionados ao processo, como tempo de fabricação, necessidade de suportes e custo. Na segunda etapa da metodologia ((2) otimização funcional), os autores sugerem a utilização de ferramentas comerciais de otimização topológica para gerar a geometria da peça, baseada nos requisitos funcionais da peça, condições de contorno, restrições de projeto e volume funcional.

A terceira etapa da metodologia ((3) otimização de trajetória de varredura), representa a principal contribuição da publicação. Nessa etapa os autores desenvolveram um modelo de otimização

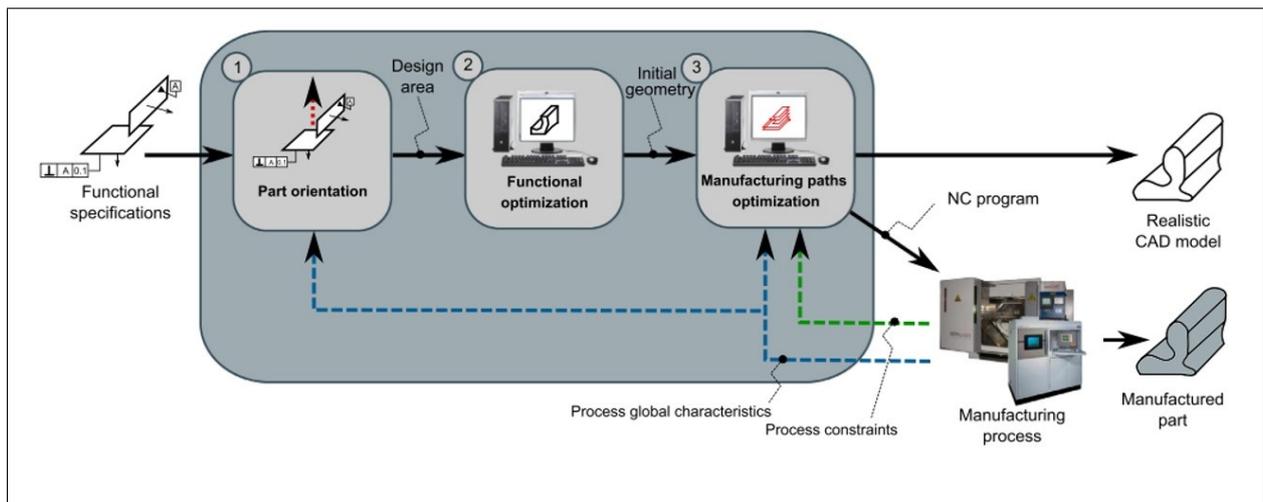


Figura 3.6: Metodologia de DfMA. Fonte: Ponche et al. (2014)

levando em consideração as relações entre trajetória de varredura de tecnologias de laser e características finais da peça. O modelo de otimização de trajetória define diversas possibilidades de varredura que são posteriormente ranqueadas levando em consideração dois indicadores desenvolvidos, um indicador funcional, levando em consideração os requisitos funcionais da peça e um indicador de manufaturabilidade, levando em consideração parâmetros do processo e análises de capacidade de processo. A Figura 3.7 ilustra a metodologia de otimização desenvolvida.

Na etapa de otimização de trajetória, Ponche et al. (2014) desenvolvem um modelo de otimização que permite a alteração da geometria da peça em função da classificação de possíveis combinações de trajetórias para definir o modelo. A metodologia funciona muito bem para objetos de parede fina, tendo em vista que busca otimizar as propriedades da peça em função do processo de fabricação. A lógica de avaliação de combinações de trajetórias possui dois indicadores de ponderação, um relacionado à requisitos funcionais e outro em função do processo de manufatura, permitindo a seleção de melhores geometrias à partir de duas características cruciais para o projeto de um produto, seus requisitos funcionais e a forma que será fabricado.

Partindo da necessidade na área de desenvolvimento de produtos para reduzir tempo e custo e aumentar qualidade e flexibilidade, Yang, Tang e Zhao (2015) apresentam uma metodologia de desenvolvimento de produtos para MA baseada na premissa de consolidação de peças. Segundo os autores a liberdade de geometrias de peças proporcionada pela MA, derruba restrições de projeto baseadas em DfM de métodos convencionais, como injeção e usinagem, e dessa forma permite a união de duas partes em apenas uma, reduzindo a quantidade de peças do produto, diminuindo etapas do processo de montagem e permitindo a redução da quantidade de elementos de fixação utilizados.

A metodologia de consolidação de peças que sintetiza a integração de funções e a otimização da estrutura proposta por Yang, Tang e Zhao (2015) possui como objetivo obter melhor funcionalidade e melhor desempenho no que diz respeito aos requisitos funcionais e restrições de

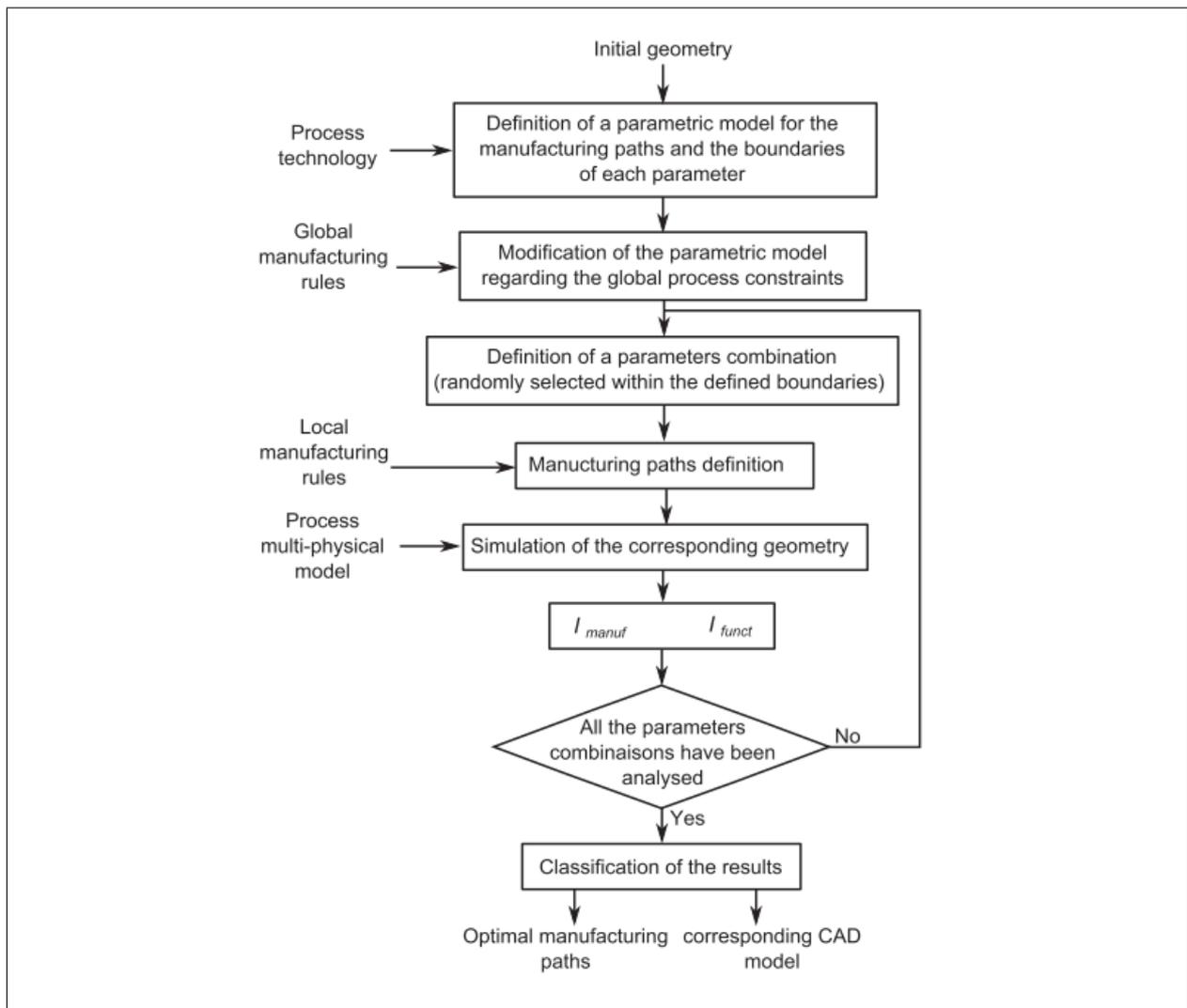


Figura 3.7: Metodologia de otimização para trajetórias de fabricação. Fonte: Ponche et al. (2014)

fabricação. A consolidação de peças ativada por AM é realizada de um ponto de vista funcional, permitindo melhor desempenho e satisfação dos requisitos funcionais; entretanto, aumenta o escopo na busca por melhores soluções de design. A metodologia, ilustrada na Figura 3.8, parte de cinco premissas:

- Utilização do mesmo material para o nível de montagem, auxiliando assim no processo de consolidação de componentes;
- Adequada para diferentes domínios de conhecimento, como por exemplo, cálculos estruturais, transferência de calor, dinâmica estrutural e estética;
- Incluir considerações de projeto, para contornar as dificuldades do processo e para melhorar performance da peça;
- Baseado no processo de manufatura;

Quadro 3.4: Análise publicação Ponche et al. (2014)

Título	A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process
Autores (ano de publicação)	R. Ponche, O. Kerbrat, P. Mognol, J. Hascoet (2014)
Fases de desenvolvimento	Projeto Preliminar e Projeto Detalhado
Ferramentas utilizadas	Otimização de orientação de fabricação; Otimização de forma; Superfícies e volumes funcionais; Otimização topológica; Otimização de trajetórias de fabricação
Principais contribuições	Ferramentas numéricas para otimização de trajetórias; definição de indicadores para classificação e seleção de trajetórias.

Fonte: Autoria própria

- Incluir considerações de custo, tempo e outros aspectos como consumo de energia para obter um design mais econômico.

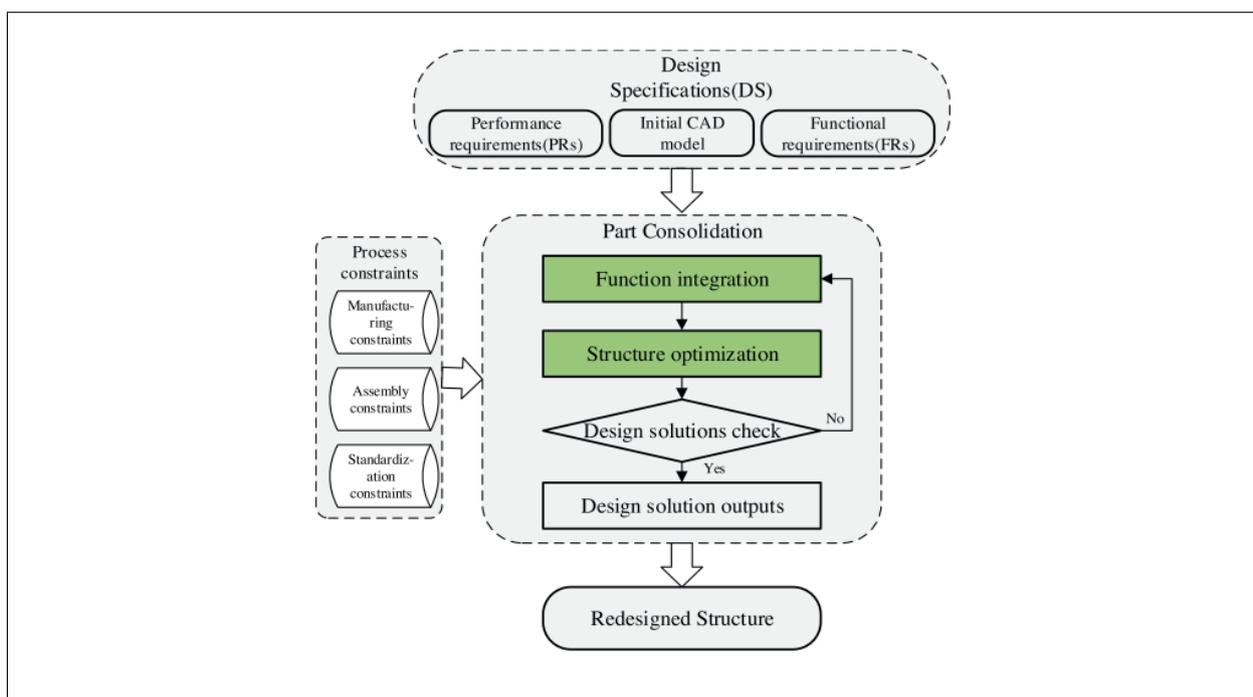


Figura 3.8: Metodologia de processo para consolidação de componentes. Fonte: Yang, Tang e Zhao (2015)

Na metodologia as especificações do projeto são fornecidas como entradas iniciais, que contêm as informações dos requisitos funcionais, requisitos de desempenho e o modelo CAD inicial. Em seguida inicia-se o processo de consolidação de partes proposto. Na etapa de integração funcional, ocorre a análise de superfícies funcionais e posteriormente a união dessas superfícies definem os volumes funcionais. A partir dessas definições, são geradas soluções de projeto que atendem aos requisitos funcionais e de performance.

Com a atualização do modelo virtual da peça, baseada na consolidação de peças da etapa de integração funcional, inicia-se a otimização estrutural. Essa etapa de otimização utiliza de algoritmos de otimização positiva, ou seja, com alteração do preenchimento interno da peça. Na metodologia proposta quatro etapas de são performadas: (1) realização de um modelo computacional para cálculo estrutural, geralmente baseado no MEF; (2) Classificação dos volumes funcionais em função do carregamento; (3) Projeto de preenchimento com estruturas celulares homogêneas; (4) Otimização de espessura de estruturas celulares baseadas no carregamento.

As limitações da metodologia proposta baseiam-se inicialmente na falta de informações sobre a etapa denominada de especificações de projeto (*Design Specifications*) na publicação. Deixando as etapas de análise funcionais somente comentadas. Não performando nenhuma outra atividade que não seja a consolidação de partes a metodologia também se prova incompleta, não auxilia nas etapas de projeto detalhado e apesar de indicar que devem ser utilizadas restrições de manufatura, essas não são detalhadas ou citadas.

Quadro 3.5: Análise publicação Yang, Tang e Zhao (2015)

Título	A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing
Autores (ano de publicação)	S. Yang, Y. Tang, Y. F. Zhao (2015)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual e Projeto Preliminar
Ferramentas utilizadas	Análise funcional; Consolidação de partes; Superfícies e volumes funcionais; Otimização de preenchimento
Principais contribuições	Identificação de superfícies e volumes funcionais; Análise de consolidação de partes através da análise funcional e estrutural; Metodologia para otimização de preenchimento

Fonte: Autoria própria

Para definir os requisitos necessários para a formulação de uma metodologia de PDP-MA, Kumke, Watschke e Vietor (2016) partem da análise de normas e publicações relativas à desenvolvimento de produto e PDP-MA e, baseado nesse levantamento, propõem uma combinação de sistemáticas de DfMA com metodologias de projeto generalizadas para definir uma nova metodologia de PDP-MA.

Com foco em processos de MA com potencial para desenvolver produtos funcionais, Kumke, Watschke e Vietor (2016) publicaram um estudo com objetivo de desenvolver uma nova metodologia de DfMA que integrasse as ferramentas existentes e fornecesse suporte contínuo para projetistas de forma à explorar os potenciais específicos da MA. O estudo baseou-se na estrutura normatizada pela VDI2221, que define fases de projeto gerais, independente do processo de manufatura pretendido, e publicações relacionadas à metodologias de projeto voltadas para MA (DfMA) classificadas em função da etapa de utilização (definição de problema, projeto conceitual,

arquitetura de produto e projeto detalhado).

Dessa forma, a metodologia desenvolvida por Kumke, Watschke e Vietor (2016), ilustrada na Figura determina um processo totalmente iterativo com as 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;
9. Simulação de processo de fabricação

No módulo 1, a lista de requisitos do produto é compilada através da análise realizada no projeto informacional. A fase de projeto conceitual (módulos 2 e 3) começa com a determinação de estruturas de funções com base nos requisitos do produto à partir de análise funcional. Na etapa seguinte, são desenvolvidas ideias de soluções básicas, concentrada na utilização de potenciais de projeto da MA. O resultado da fase de projeto conceitual é uma ou mais concepções de produto. Com base nos modelos conceituais, é desenvolvida uma estrutura de módulos do produto. Esta é a primeira etapa de uma porta de decisão contendo módulos 4 a 6. A divisão em módulos realizáveis considera as restrições gerais de MA. Em seguida, é verificada a viabilidade técnica e econômica.

Na definição de arquitetura e na fase de design de detalhes (módulos 7–9), a solução de projeto é concluída. Na primeira etapa, propriedades específicas do produto são otimizadas. Posteriormente, os requisitos conforme diretrizes de DfMA são aplicados. A última etapa contém submódulos para simulação, verificação de projeto e análise de capacidade de fabricação. Várias iterações podem ser necessárias para alcançar a solução de design final.

A barra lateral direita trata da possibilidade de consolidação de peças e integração funcional, que são grandes potenciais de projeto da MA. A barra lateral esquerda permite avanços e retrocessos iterativos entre fases e módulos. Embora o caminho principal sugira um fluxo de processo linear, os processos de projeto atuais exigem alto grau de flexibilidade. O fluxo de informações para a barra lateral esquerda é acionado nas entregas de cada fase.

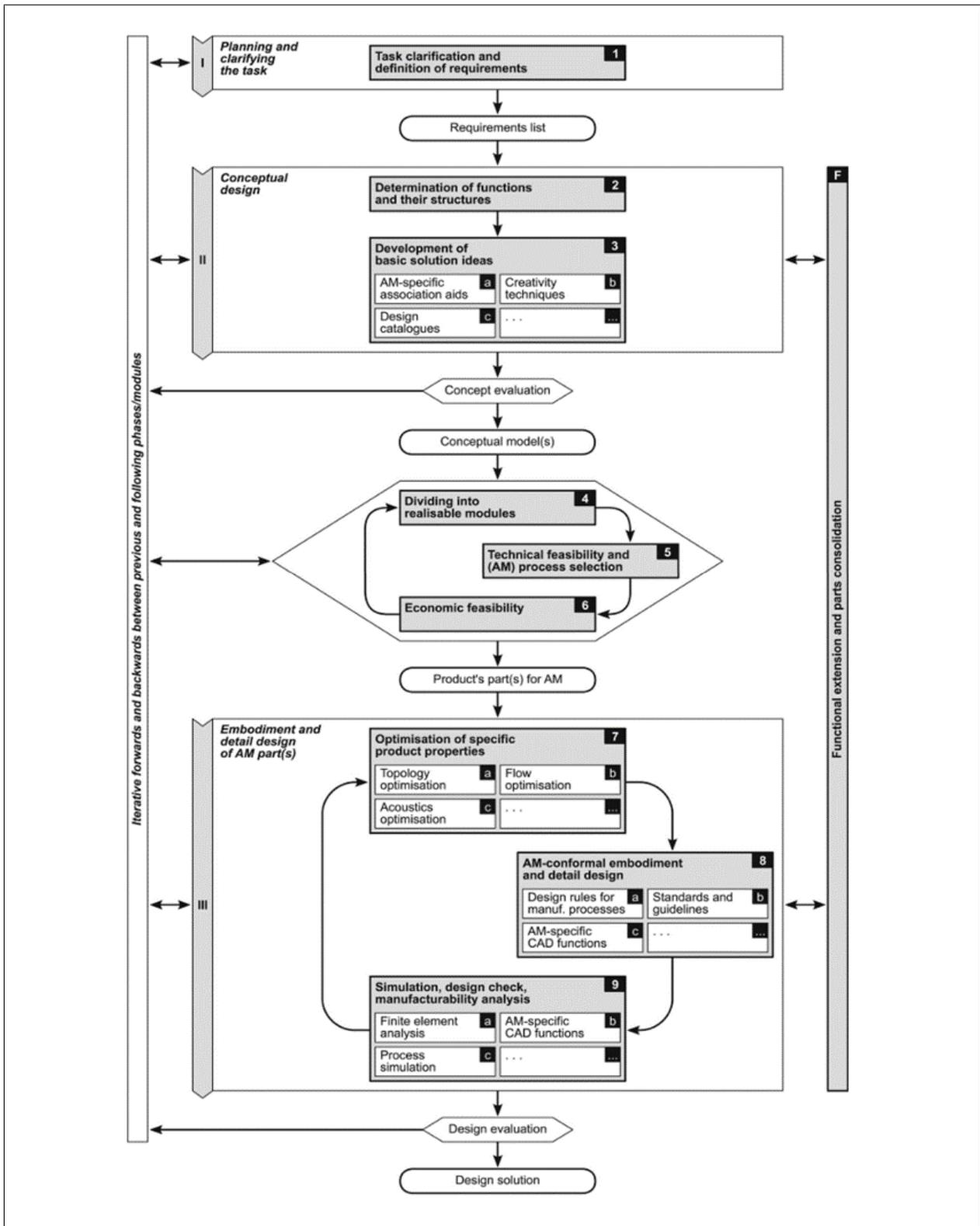


Figura 3.9: PDP-MA Fonte: Kumke, Watschke e Vietor (2016)

A publicação discorre sobre a utilização da metodologia para diferentes objetivos, nível de inovação e experiência do usuário em MA, indicando o grau de complexidade que cada etapa deve possuir e quais etapas devem ser realizadas em cada caso.

Quadro 3.6: Análise publicação Kumke, Watschke e Vietor (2016)

Título	A new methodological framework for design for additive manufacturing
Autores (ano de publicação)	M. Kumke, H. Watschke e T. Vietor (2016)
Fases de desenvolvimento	Projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado
Ferramentas utilizadas	Análise funcional; Seleção de concepções; Análise de viabilidade técnica; Levantamento de requisitos de produto; Consolidação de partes; Otimização topológica; Análise estrutural (MEF); Simulação de processo de fabricação
Principais contribuições	Metodologia iniciada na fase de projeto informacional e baseada em normas de desenvolvimento de produto adaptadas; Etapas de projeto claras e bem definidas.

Fonte: Autoria própria

Dinar e Rosen (2017) apresentam uma estruturação baseada em lógica descritiva para auxiliar no processo de projeto voltado para MA. Os autores partem de uma revisão de trabalhos voltados para o levantamento de guias de projeto para MA, com a intenção de desenvolver uma base de dados de DfMA para poder aplicar a lógica descritiva. A revisão mostra que existe a necessidade de uma base de conhecimento de DfAM que oriente os designers na compreensão das capacidades e limitações de vários processos de MA, como é diferente da fabricação tradicional e como o processo e o projeto afetam um ao outro (DINAR; ROSEN, 2017).

Para atender aos requisitos, a base de dados de destino deve capturar o conhecimento sobre diferentes tipos de processos de AM, como vários recursos de projeto podem ser fabricados e quais parâmetros levam ao sucesso ou falha na fabricação (DINAR; ROSEN, 2017). O objetivo principal da publicação é demonstrar como o conhecimento de DFMA pode ser formulado logicamente para atender características de componentes e beneficiar das liberdades de projeto oferecidas pela MA.

A Figura 3.10 apresenta a lógica de estruturação do banco de dados, com uma definição inicial de evento de MA (*AM event*), sendo a fabricação com sucesso de uma peça e parâmetros que influenciam cada evento. Portanto, à partir de inserção de eventos de sucesso, exemplos de peças projetadas para MA e fabricadas, a base de dados vai sendo populada e passa a servir de base para o desenvolvimento de produtos.

Zaman et al. (2018) integram técnicas de tomada de decisão ao processo de projeto para AM. Os autores partem da etapa de projeto informacional, com o levantamento de requisitos do produto. Em seguida, a metodologia apresentada avança para o projeto conceitual e posteriormente uma análise do conceito em função do processo de manufatura, com seleção de tecnologia de AM e análise do maquinário disponível. O processo possui três gates de tomada de decisão, dois baseados nos requisitos de produto levantados e um em função do conceito final, atribuindo uma

	AM event	Manuf. feature	Design feature	Design param.	Machine	Material	Process param.	Process type	Ref.
AM event			isEmbodiedBy	isLimitedBy	isControlledBy		isControlledBy		isProvidedBy
Manuf. feature			realizes	isLimitedBy					
Design feature	embodies	isRealizedBy	isComposedOf	isParametrizedBy	isBuiltOn	isCreatedFrom	controls		
Design param.	limits	limits	parametrizes	isComposedOf	isLimitedBy		isLimitedBy	isLimitedBy	
Machine	controls		builds	limits		implements	limits	implements	
Material			creates	limits	isImplementedOn			limits	
Process param.	controls		isControlledBy	limits	isLimitedBy		isComposedOf		
Process type					isImplementedOn	isLimitedBy			
Ref.	provides								

Figura 3.10: Lógica relacional de ontologia para DFMA (sentido de leitura à direita e acima).
Fonte: Dinar e Rosen (2017)

Quadro 3.7: Análise publicação Dinar e Rosen (2017)

Título	A design for additive manufacturing ontology
Autores (ano de publicação)	M. Dinar, D. Rosen (2016)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual
Ferramentas utilizadas	Estrutura de banco de dados aplicada para soluções em DFMA, Definição de parâmetros de projeto, Estruturação lógica de requisitos de projeto
Principais contribuições	Desenvolvimento de lógica de pesquisa de banco de dados para requisitos e características de produto; definição e armazenamento de características construtivas e parâmetros de projeto voltados para MA

Fonte: Autoria própria

análise final de aceitação baseada tanto nos requisitos quanto nas características do processo, o processo de projeto é apresentado na Figura 3.12. Além da metodologia os autores desenvolvem um mapa de avaliação de vantagens da MA no processo integrado de desenvolvimento de produtos (IPPD), apresentado na Figura 3.11 e um diagrama para definir as vantagens e desvantagens da utilização da AM para projetos. O diagrama possui tomadas de decisão em aspectos econômicos, técnicos e de sustentabilidade, indicando sequências lógicas de decisões que afirmam ou descartam o uso da AM para o projeto.

O processo de projeto apresentado em Michopoulos, Steuben e Iliopoulos (2018) introduz três conceitos para caracterização de peças, assinatura de performance, quantidades de interesse e assinatura de performance diferenciada. A assinatura de performance é uma classificação heurística baseada nas análises de tensões e deformações da peça sob condições reais de carregamento. A partir da análise pelo MEF da geometria são definidas propriedades mecânicas mínimas que o componente precisa atender. O levantamento das características mais importantes para o

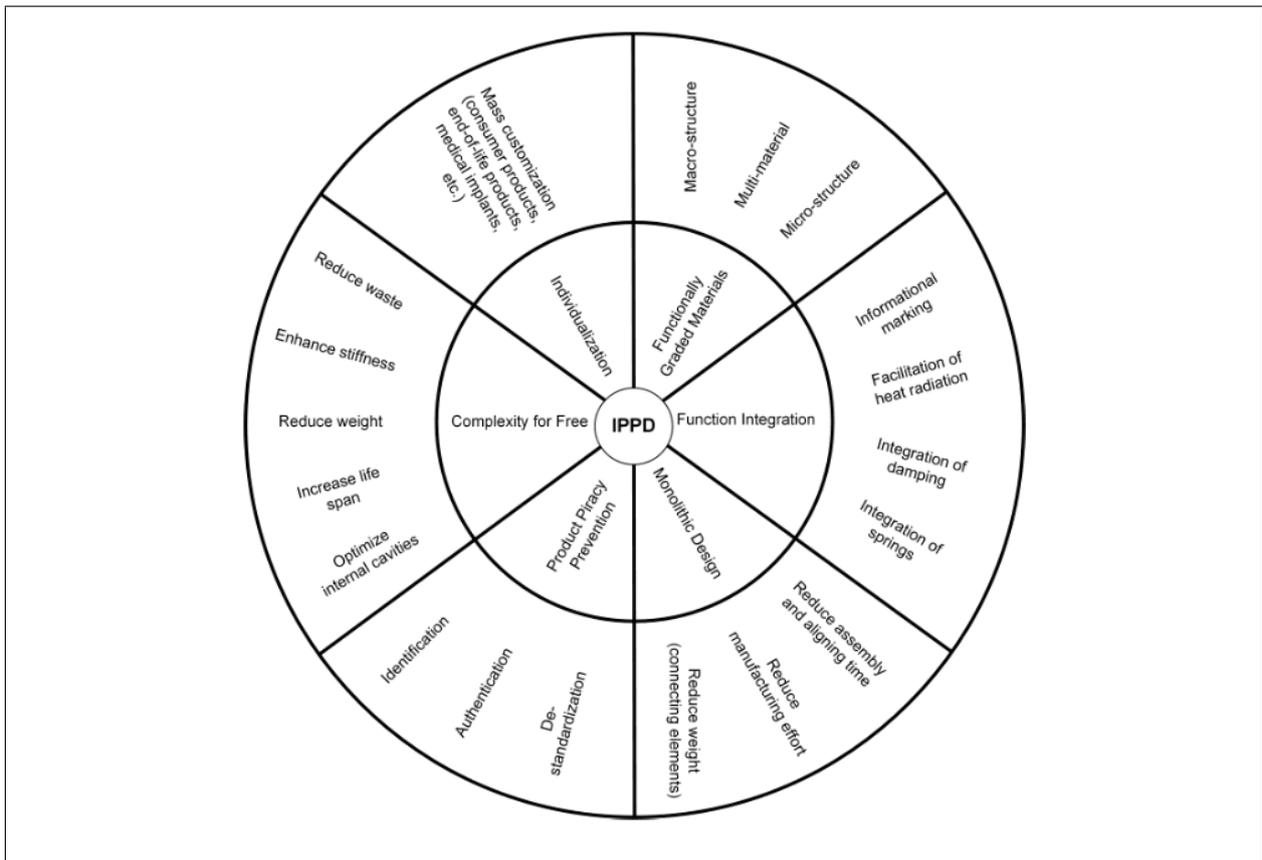


Figura 3.11: Mapa de vantagens propiciadas pela MA. Fonte: Zaman et al. (2018)

cenário de uso representa então a assinatura de performance para o componente e as propriedades mecânicas com seus respectivos valores mínimos representa as quantidades de interesse. O conceito de assinatura de performance diferenciada representa a relação entre as quantidades de interesse obtidas para o componente fabricado por métodos de fabricação tradicionais e por AM. O processo definido na publicação é ilustrado na Figura 3.13.

O processo de Michopoulos, Steuben e Iliopoulos (2018) trabalha definindo a geometria e material da peça na primeira etapa, passando em seguida para a discretização das condições de contorno e definição de carregamentos sobre o componente em cenário de uso, a partir desse levantamento inicial é realizada uma análise pelo MEF para caracterizar regiões críticas de deformação e propriedades mecânicas necessárias, nomeadas no estudo de assinaturas de tensão. A partir dessa construção de geometria e assinatura, obtêm-se os inputs necessários para a fabricação de protótipos e realiza-se testes destrutivos para levantar a resistência de componentes fabricados por métodos convencionais e por manufatura aditiva. Em seguida, a partir dos resultados dos ensaios em laboratório, as assinaturas de performance dos componentes fabricados por métodos tradicionais e por manufatura aditiva são levantadas e posteriormente comparadas para definir se a peça fabricada por manufatura aditiva atende aos requisitos de performance do projeto.

A metodologia apresenta bons parâmetros para influenciar na adoção da MA como processo produtivo. Avaliando a performance de forma comparativa, o estudo comprova a eficácia de

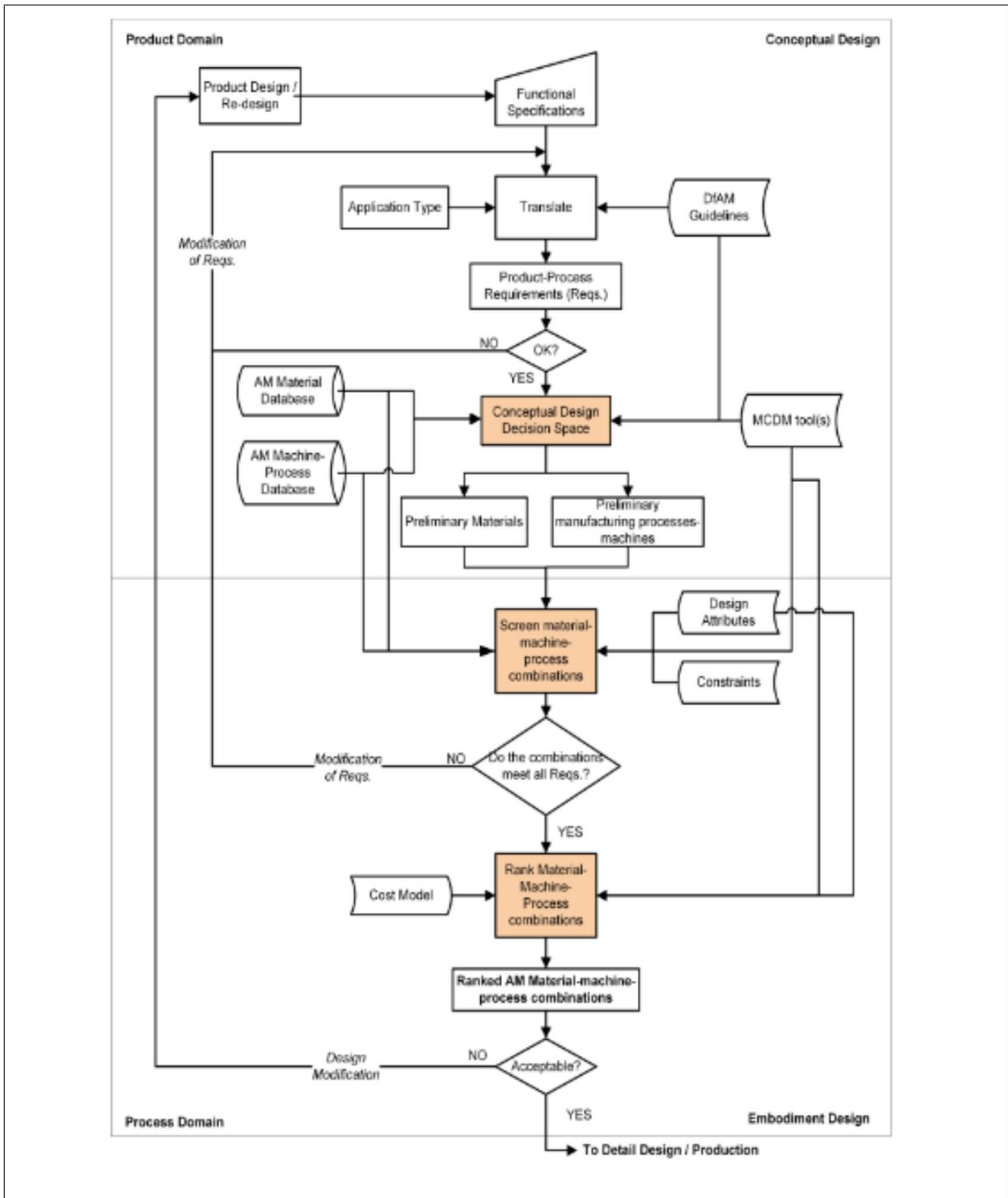


Figura 3.12: Metodologia de processo para manufatura aditiva. Fonte: Zaman et al. (2018)

produtos manufaturados via MA e ajuda a retirar de profissionais da área de desenvolvimento de produtos o estigma de que a MA pode não servir para fabricação de bens de consumo. Na publicação Michopoulos et al. (2020) a mesma metodologia é aplicada para realizar estudos de casos em peças de utilização aeronáutica, demonstrando a eficácia do método. Apesar de todas contribuições, a metodologia se baseia em ensaios destrutivos de peças e não possui uma meto-

Quadro 3.8: Análise publicação Zaman et al. (2018)

Título	Integrated design-oriented framework for Resource Selection in Additive Integrated
Autores (ano de publicação)	U. K. Zaman, M. Rivette, A. Siadat, A. A. Baqai (2018)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual e Projeto Preliminar
Ferramentas utilizadas	Seleção de recursos para desenvolvimento e fabricação; Tomadas de decisão baseadas nas características da MA; Classificação de processos e maquinários
Principais contribuições	Análise de características específicas de processos de MA no projeto de produtos; Sistemáticas de tomada de decisão baseadas no processo de manufatura.

Fonte: Autoria própria

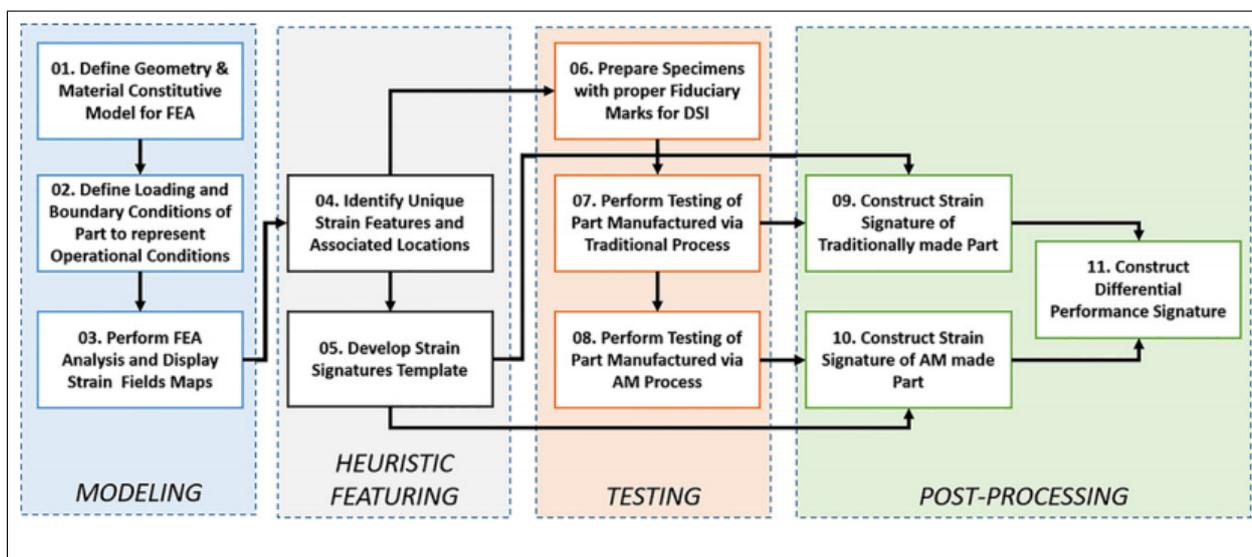


Figura 3.13: Exemplo de processo de qualificação para MA. Fonte: Michopoulos, Steuben e Iliopoulos (2018)

dologia clara para auxiliar no desenvolvimento de produtos.

Li et al. (2019) apresentam uma metodologia com uma visão multissistêmica baseada em reconhecimento de regiões características de um componente. Realizando uma associação com usinagem de peças, as regiões características representam as superfícies que resultam após cada operação de usinagem performada, para o caso dos processos de AM, as regiões características representam a geometria da peça, pois toda fabricação é realizada a partir de uma única operação. Na apresentação da metodologia, Li et al. (2019) ilustram o processo de projeto como apresentado na Figura 3.14. O processo é separado em sistema de projeto (design view), sistema de manufatura (manufacturing view) e sistema de análise (analysis view) e por conta dessa divisão é categorizado pelo autores como multissistêmica (multi-view). Na publicação os autores apresentam algoritmos

Quadro 3.9: Análise publicação Michopoulos, Steuben e Iliopoulos (2018)

Título	Differential performance signature qualification for additively manufactured parts
Autores (ano de publicação)	J. G. Michopoulos, J. C. Steuben, A. P. Iliopoulos (2018)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado
Ferramentas utilizadas	Comparação com componentes fabricados por métodos tradicionais; Análise estrutural (MEF); Controle de qualidade e certificações para processo; Testes e validações. Na publicação Michopoulos et al. (2020) são adicionados os recursos de Otimização de forma; Otimização de preenchimento; Análise Funcional; Otimização topológica e Parametrização geométrica
Principais contribuições	Sistemática de projeto baseada em certificações e controle de qualidade; Definição de método comparativo de performance com métodos tradicionais;

Fonte: Autoria própria

produzidos para:

- Performar o reconhecimento da geometria da peça e gerar sua representação em elementos de volume (voxel's) parametrizados;
- Reconhecer superfícies que necessitam de suporte;
- Otimizar os caminhos de deposição de material (toolpaths);
- Otimizar o volume de suportes;
- Realizar análise e otimização estrutural do componente.

O estudo baseia na aplicação dos algoritmos de forma direta e correlacionada, representando assim a visão multissistêmica. São apresentados dois exemplos no estudo, um deles correlacionando otimizações de estrutura interna e volume de suportes e outra representando o projeto de componentes de estrutura celular com análise de manufacturabilidade.

Com o objetivo de revisar publicações relacionadas à DfMA em termos de metodologia, guias de projeto e softwares de apoio, Wiberg, Persson e Ölvander (2019) publicaram um artigo com revisão de metodologias propostas em publicações da área de DfMA e desenvolveram uma metodologia baseada no estado da arte definido após o processo de revisão. A metodologia definida pelos autores é exemplificada na Figura 3.15. Na revisão os autores classificaram as metodologias em projeto de sistema, projeto de componentes e projeto de processo, onde a etapa de aplicação de guias de projeto e metodologias definem a classificação de cada publicação. Projeto de sistemas são metodologias baseadas em tomadas de decisão para fabricar ou não um componente

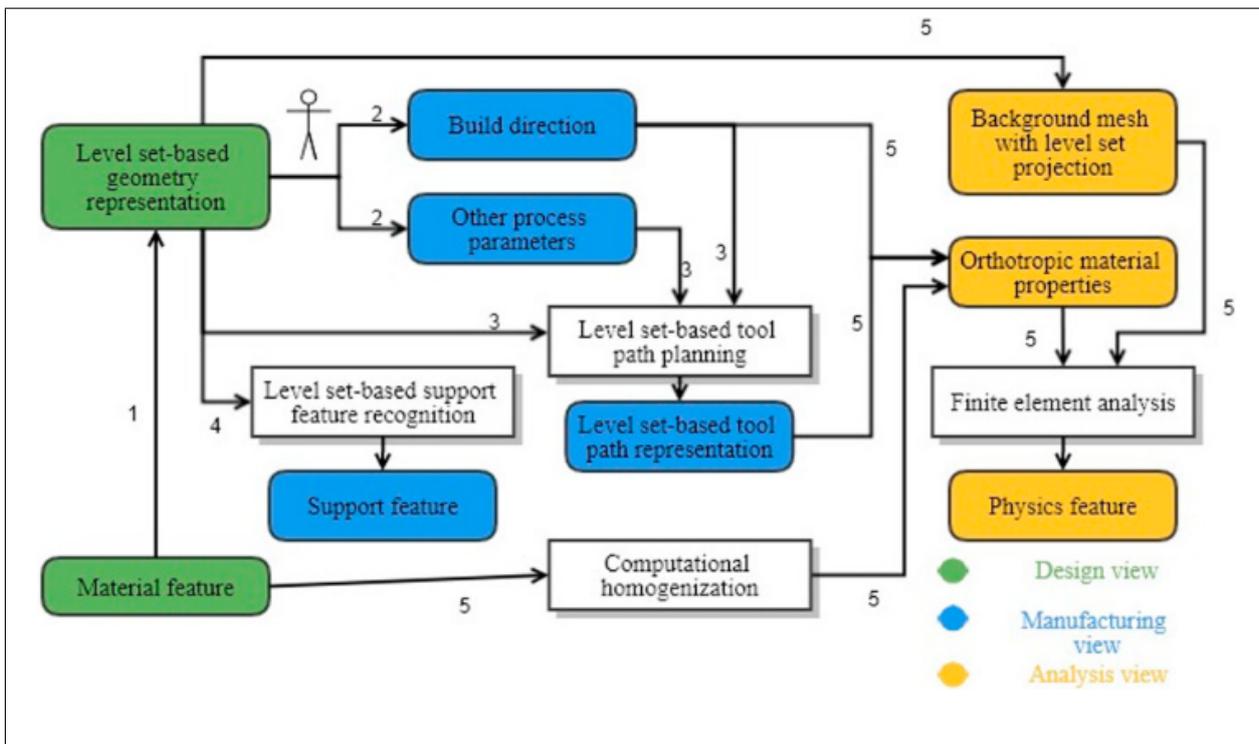


Figura 3.14: Processo de projeto baseado em regiões características. Fonte: Li et al. (2019)

via MA, projeto de componentes são metodologias aplicadas para definir forma e complexidade de componentes voltados para as características da MA e projeto de processo são metodologias voltadas para parâmetros do processo de manufatura.

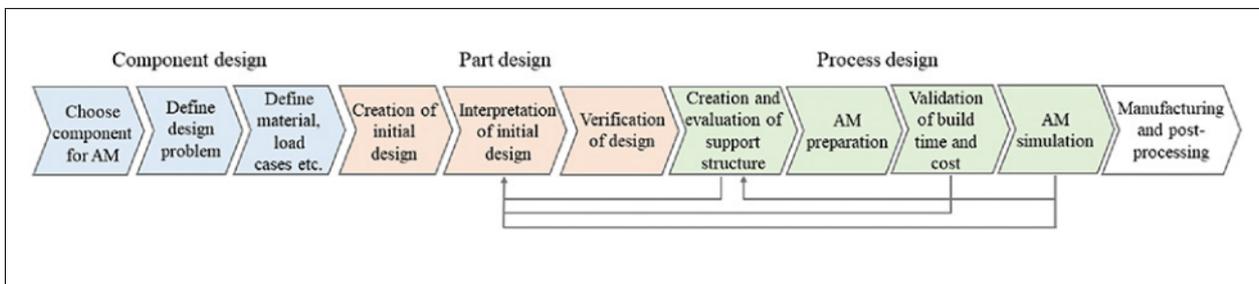


Figura 3.15: Processo de projeto baseado no estado da arte identificado pelos autores. Fonte: Wiberg, Persson e Ölvander (2019)

O processo de projeto apresentado na Figura 3.15 é uma interpretação dos métodos existentes, que em comparação com os processos visa incluir todas as etapas necessárias desde a escolha da MA como método de fabricação de um componente até a verificação da capacidade da MA e preparação para o processo de fabricação (WIBERG; PERSSON; ÖLVANDER, 2019). Toda etapa iterativa do processo foi exemplificada em uma atividade, permitindo assim um certo nível de flexibilização do processo de desenvolvimento de projeto.

Na publicação de Rohde et al. (2019) um processo de desenvolvimento de produto para manufatura aditiva é elaborado baseado em normas da Associação de Engenheiros Alemães (Verein Deutscher Ingenieure - VDI), normas ISO e processos de projeto validados por empresas de

Quadro 3.10: Análise publicação Li et al. (2019)

Título	Multi-view feature modeling for design-for-additive manufacturing
Autores (ano de publicação)	L. Li, J. Liu, Y. Ma, R. Ahmad, A. Qureshi (2019)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual e Projeto Preliminar
Ferramentas utilizadas	Parametrização geométrica; Geração de forma; Otimização de suportes; Análise estrutural (MEF); Otimização de direção de fabricação; Otimização de Preenchimento; Otimização de Trajetória
Principais contribuições	Metodologia multi-sistêmica com integração de etapas de projeto, manufatura e análises; Metodologia de geração de geometria; Métodos de identificação de direção de fabricação; Metodologia de otimização de geometria baseada no processo de fabricação.

Fonte: Autoria própria

Quadro 3.11: Análise publicação Wiberg, Persson e Ölvander (2019)

Título	Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software
Autores (ano de publicação)	A. Wiberg, J. Persson e J. Ölvander (2019)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado
Ferramentas utilizadas	Definição de problema; Seleção de recursos de desenvolvimento e fabricação, Conceptualização de produto; Simulação de processo
Principais contribuições	Definição de estado da arte de metodologias, compilação de ferramentas de projeto para MA.

Fonte: Autoria própria

serviços de AM à laser. Segundo os autores, a aplicabilidade do processo é possível independente da tecnologia de AM pretendida e busca adotar uma metodologia que considera a partir da definição de funcionalidade e características de peças a definição se o componente deve ser comprado ou fabricado até a fase de controle de qualidade e rastreabilidade para o produto final. Para ilustrar o processo os autores realizaram fluxos de tarefas para indicar as etapas. A Figura 3.16 representa as tarefas relacionadas à análise funcional e seleção de princípios de solução, etapas iniciais para o projeto conceitual em uma metodologia clássica de desenvolvimento de produto.

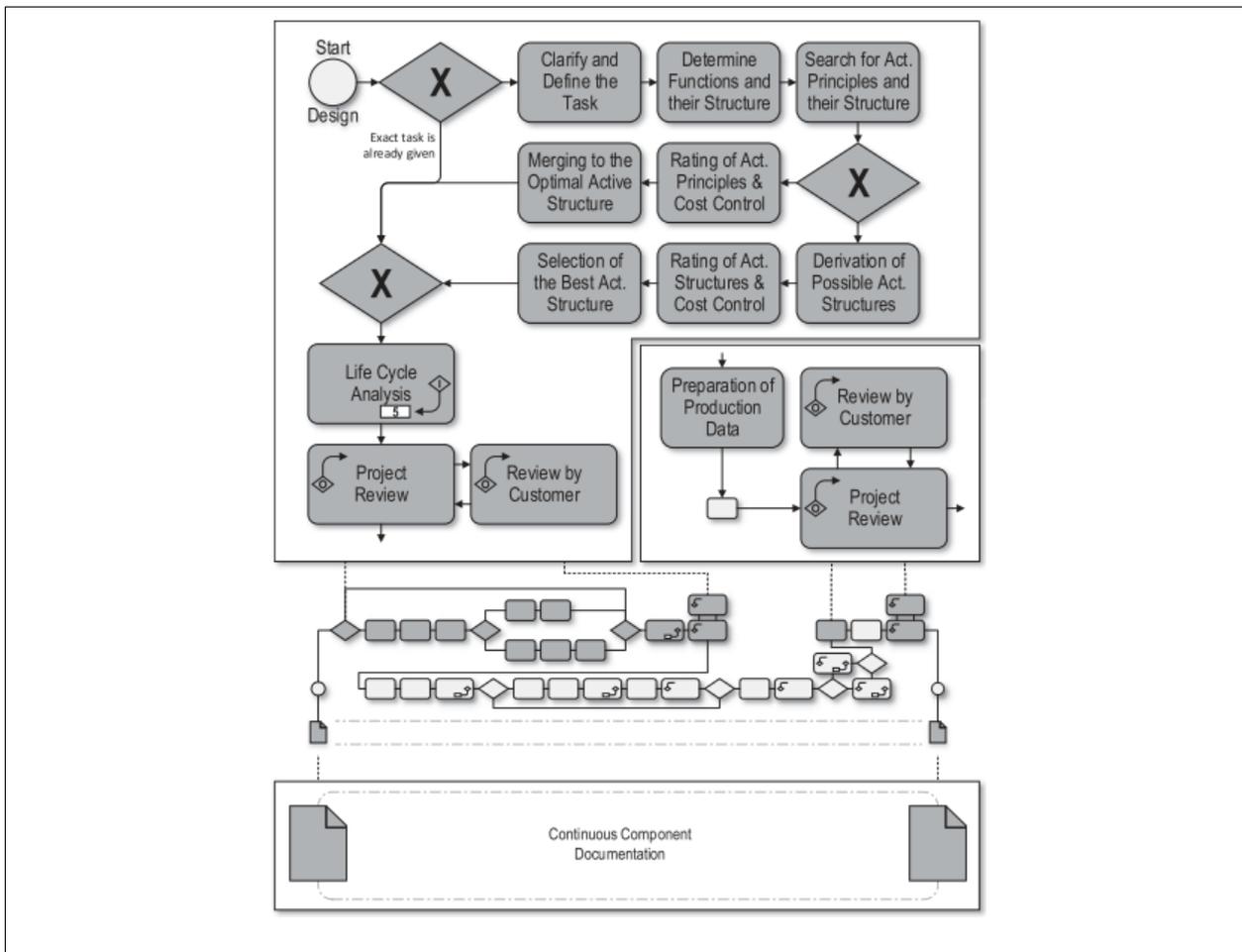


Figura 3.16: Processo de projeto do início da etapa de projeto conceitual Fonte: Rohde et al. (2019)

Após essa análise inicial, uma etapa de definição de geometria é performada, com o fluxo apresentado na Figura 3.17. Nessa etapa os princípios de CAX são utilizados para definir a geometria do componente, utilizando técnicas de otimização topológica, manipulação de forma, análise de colisões e cálculo de vida. Considerando a teoria clássica de desenvolvimento de produtos, essa etapa representaria o início do projeto detalhado.

Por fim, as últimas etapas ilustradas no processo de desenvolvimento são a análise inicial de sourcing para condicionar o processo de desenvolvimento à opção de comprar o componente ou projetar; etapa de otimização multinível, considerando testes de geometria para diferentes

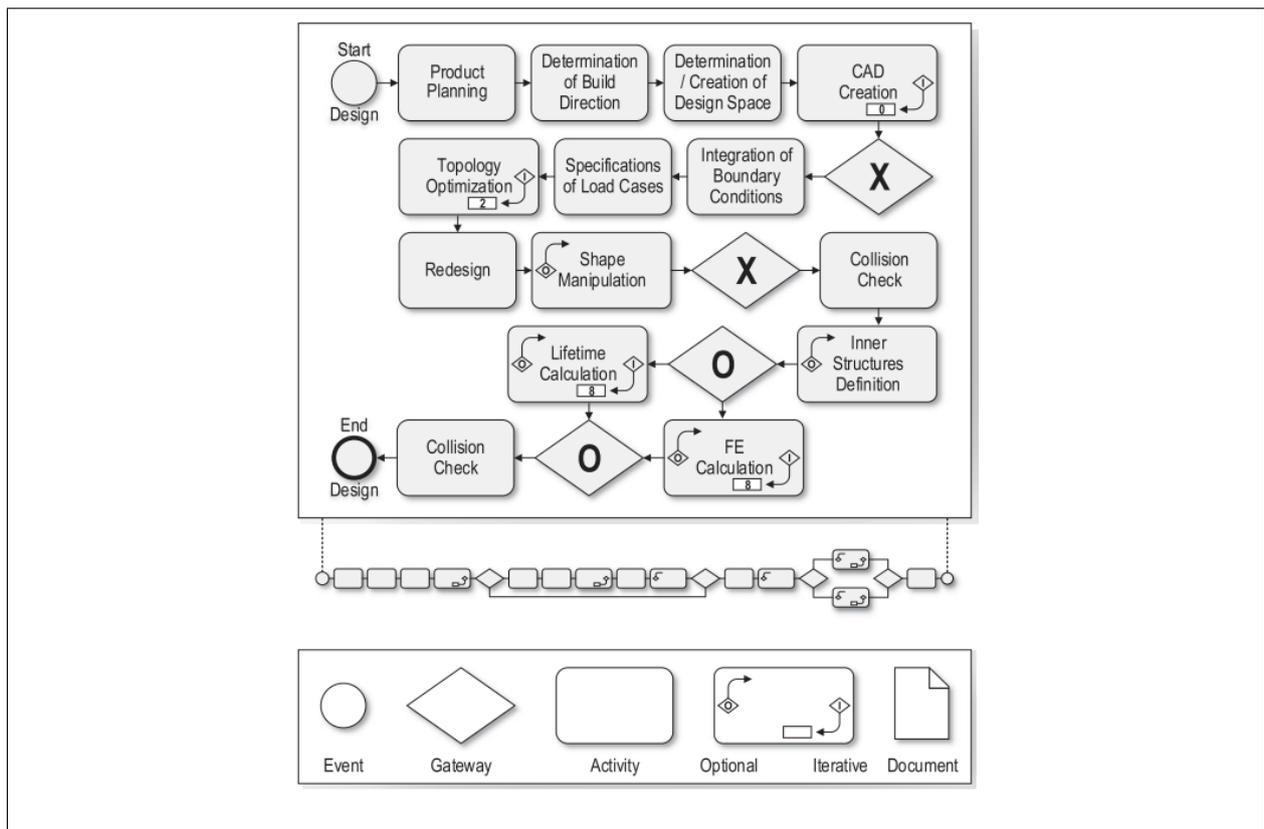


Figura 3.17: Projeto detalhado adaptado para AM. Fonte:Rohde et al. (2019)

objetivos de otimização; e marcação de peças para rastreabilidade. A inserção dessas últimas etapas é ilustrada na Figura 3.18. Ainda a partir da análise da Figura 3.18 é importante ressaltar que durante todo desenvolvimento ocorrem duas etapas simultâneas ao processo, o controle de custos e documentação do desenvolvimento. A atividade de controle de custos é abastecida de informações a cada etapa concluída do processo, fornecendo o custo esperado para a manufatura de componentes e definindo o custo total de desenvolvimento. A etapa de documentação ocorre de forma contínua para possibilitar a gestão de conhecimento da equipe e possibilitar a flexibilidade do processo de desenvolvimento.

Pretendendo utilizar a possibilidade de fabricação de geometrias complexas por AM, Zhu et al. (2020) propuseram uma metodologia para projeto de componentes com estrutura celular. Assim como apresentado por Chu, Graf e Rosen (2008), os autores utilizaram o conceito de elemento mínimo manufaturável e de geometrias celulares com características mecânicas catalogadas. O trabalho foi desenvolvido seguindo a metodologia de projeto apresentada na Figura 3.19. A partir de análises de funcionalidade do componente e restrições de projeto um modelo genérico é gerado e posteriormente otimizado topologicamente via EF, a partir do resultado da otimização topológica a geometria é reconstruída visando a integração de regiões com densidades diferentes. O estudo apresenta duas aplicações para comprovar a eficiência da técnica, uma viga biapojada e o projeto de um braço inferior de suspensão do tipo MacPherson.

A partir da combinação das teorias de projeto axiomático e da resolução de problemas con-

Quadro 3.12: Análise publicação Rohde et al. (2019)

Título	Standardised product development for technology integration of additive manufacturing
Autores (ano de publicação)	J. Rohde, U. Jahnke, C. Lindemann, A. Kruse, R. Koch (2019)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado
Ferramentas utilizadas	Análise de ciclo de vida de produto; Otimização de Preenchimento; Análise estrutural (MEF); Análise Funcional; Otimização topológica; Otimização de direção de fabricação; Análise de viabilidade técnica
Principais contribuições	Metodologia sistêmica com análise de toda cadeia de produção, indicando certificações e controle de qualidade;

Fonte: Autoria própria

Quadro 3.13: Análise publicação Zhu et al. (2020)

Título	An Improved Density-Based Design Method of Additive Manufacturing Fabricated Inhomogeneous Cellular-Solid Structures
Autores (ano de publicação)	Y. Zhu, J. Zhao, M. Zhang, X. Li, L. Wang, C. Hu (2019)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual e Projeto Preliminar
Ferramentas utilizadas	Parametrização geométrica; Geração de forma; Otimização topológica; Análise estrutural (MEF); Elemento Mínimo Manufaturável;
Principais contribuições	Método de otimização topológica baseado em estruturas celulares homogêneas; Integração de otimização para inserir estruturas celulares heterogêneas

Fonte: Autoria própria

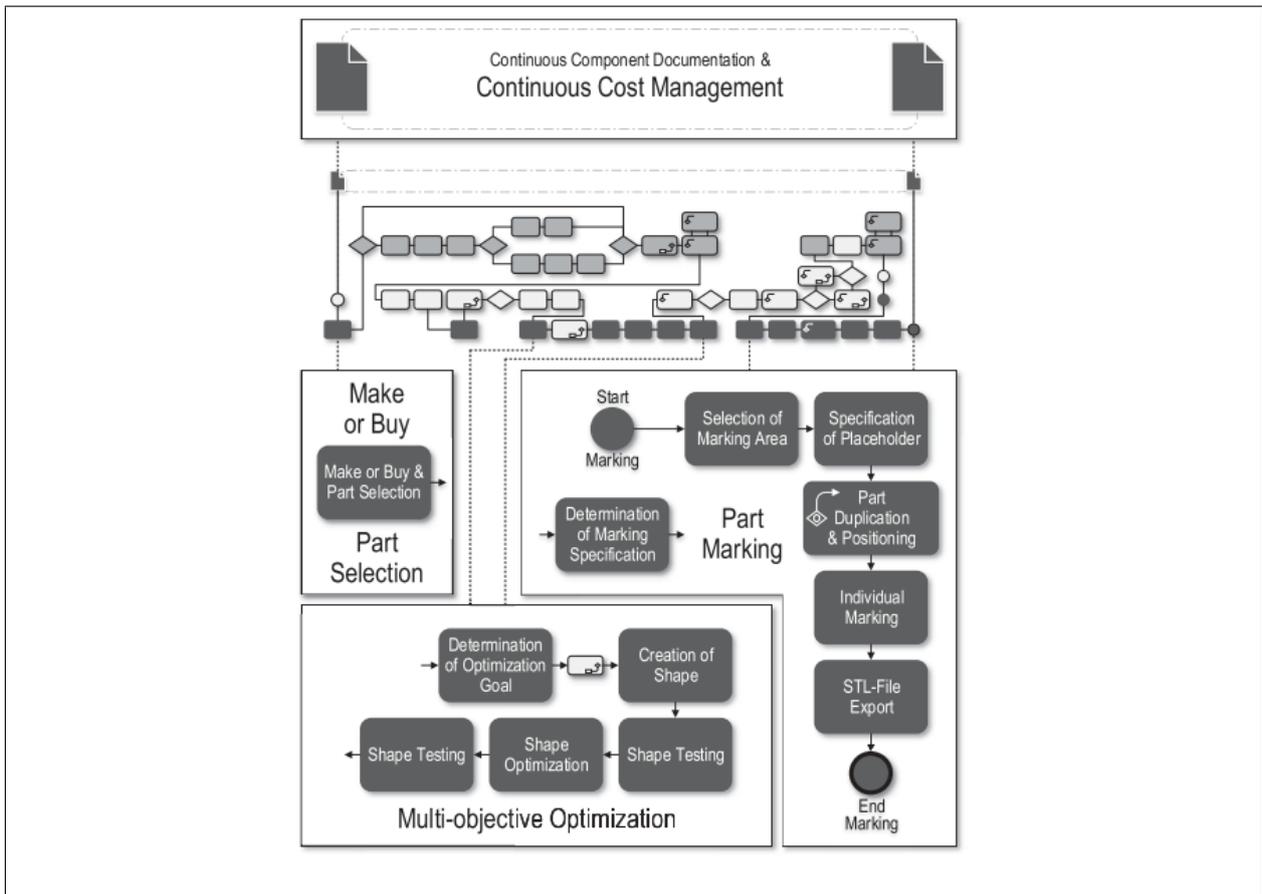


Figura 3.18: Processo completo de projeto de componentes para AM. Fonte:Rohde et al. (2019)

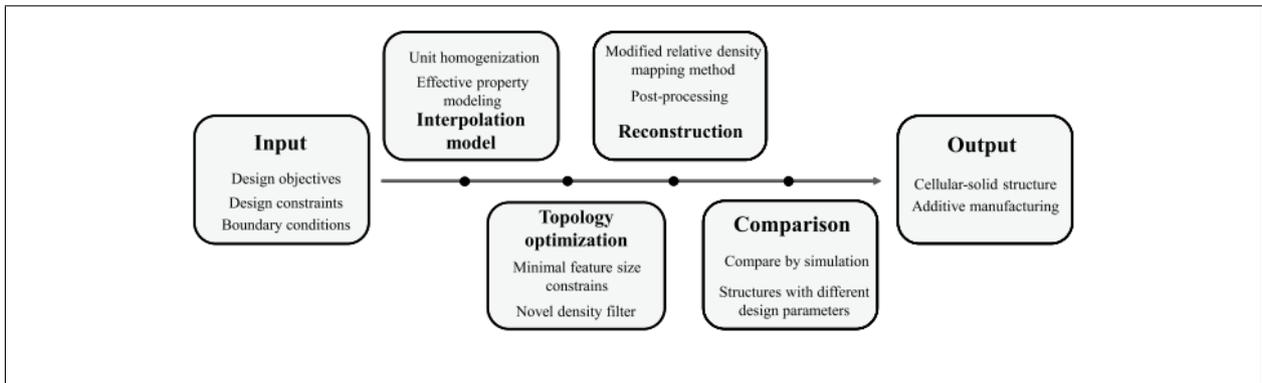


Figura 3.19: Processo de projeto utilizando estruturas celulares não homogêneas. Fonte:Zhu et al. (2020)

flitantes (TRIZ), Renjith, Park e Kremer (2020) desenvolveram uma metodologia de projeto para manufatura aditiva baseada em uma construção hierárquica, apresentada na Figura 3.20. A metodologia abarca as etapas de projeto conceitual, a partir da interpretação de restrições de projeto através da teoria axiomática e trabalhando nas soluções a partir da TRIZ, definição de arquitetura de produto, identificando parâmetros de projeto, e projeto detalhado, através da definição de características dos processos de AM que visam satisfazer os parâmetros de projeto. Dessa forma, explorando a hierarquia apresentada desde fases preliminares do desenvolvimento de produto.

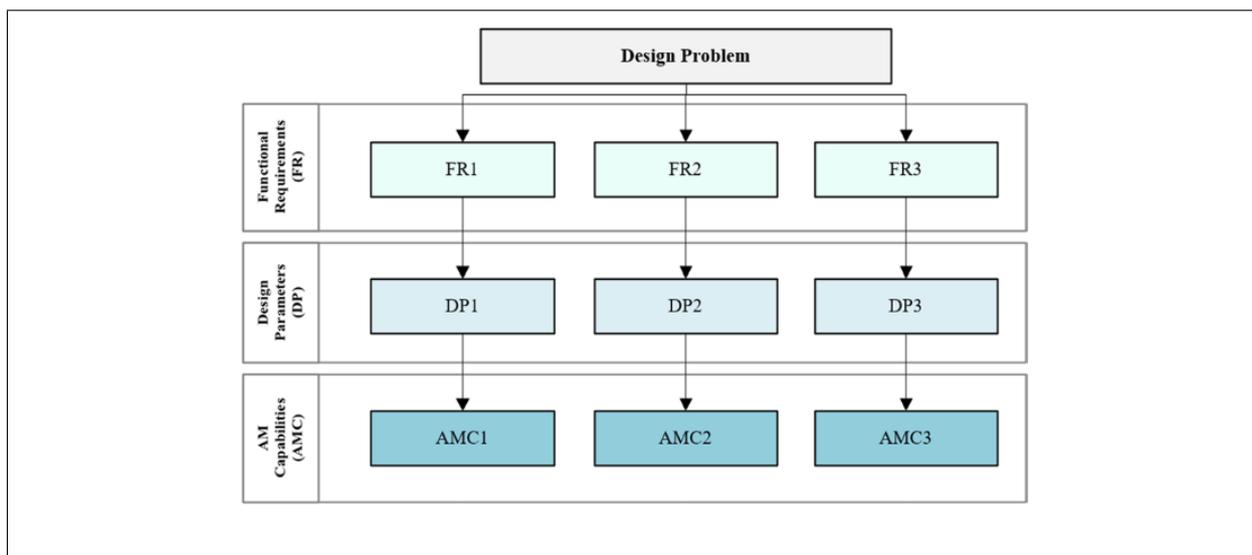


Figura 3.20: Hierarquia de projeto. Fonte:Renjith, Park e Kremer (2020)

A aplicação da metodologia é apoiada por uma base de dados desenvolvida pelos autores, onde são detalhados exemplos de características do processo associadas a parâmetros de projeto desejados, como por exemplo, ao adentrar no banco de dados buscando por remoção de material, as opções detalhadas seguiriam por otimização topológica, para identificar regiões possíveis de serem eliminadas da geometria, otimização de preenchimento, demonstrando a capacidade dos processos de fabricar a geometria com diferentes estruturas internas e também a opção de preenchimento com estruturas celulares.

Quadro 3.14: Análise publicação Renjith, Park e Kremer (2020)

Título	A Design Framework for Additive Manufacturing: Integration of Additive Manufacturing Capabilities in the Early Design Process
Autores (ano de publicação)	S. C. Renjith, K. Park, G. E. O. Kremer (2019)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual e Projeto Preliminar
Ferramentas utilizadas	Análise de soluções existentes, Design Axiomático, Solução inventiva de problemas (TRIZ)
Principais contribuições	Metodologia de formulação de problemática; metodologia para definição de requisitos de produtos baseados em parâmetros de projeto; Identificação de capacidade de processos de MA; Metodologia baseada em banco de dados de soluções para geração da arquitetura de produto.

Fonte: Autoria própria

Com o objetivo de projetar componentes leves, passíveis de serem customizados em massa e produzidos por manufatura aditiva, García-Dominguez, Claver e Sebastián (2020a) desenvolveram uma metodologia focada em otimização topológica de um volume inicial, baseado nas restrições de projeto e condições de contorno, e otimização estrutural com a aplicação de elemen-

tos celulares para definição de preenchimento interno e casca (superfícies externas), visando o projeto de peças funcionais utilizando a tecnologia de FFF como método de fabricação.

A redução de massa nas peças é alcançada via otimização topológica, seguida de otimização estrutural de preenchimento interno a partir de geometrias celulares e casca definida como modelo de linhas (wireframe) e, finalmente, por uma otimização multi-objetivo da montagem em um fluxo de trabalho contínuo. O fluxo de trabalho contínuo permite que a metodologia estabeleça qualquer parte do projeto paramétrico como uma variável ou objetivo em um fluxo de dados contínuo para gerar automaticamente as soluções mais adequadas sem redefinir o modelo em fases intermediárias (GARCÍA-DOMINGUEZ; CLAVER; SEBASTIÁN, 2020b).

Para definir um processo de otimização contínuo, a modelagem do volume inicial é dada de forma paramétrica e os processos de otimização que ocorrem durante o processo são também guiados por parâmetros e objetivos definidos pelo usuário, garantindo assim a flexibilidade do processo para adaptação à customização em massa. O processo definido abarca a união de três tecnologias, AM, otimização e modelagem paramétrica, permitindo aproveitar a maior liberdade de geometria proporcionada pela manufatura aditiva e explorar as possibilidades dessas tecnologias de manufatura (GARCÍA-DOMINGUEZ; CLAVER; SEBASTIÁN, 2020a).

Quadro 3.15: Análise publicação García-Dominguez, Claver e Sebastián (2020a) e García-Dominguez, Claver e Sebastián (2020b)

Título	”Integration of Additive Manufacturing, Parametric Design, and Optimization of Parts Obtained by Fused Deposition Modeling (FDM). A Methodological Approach“ e ”Optimization Methodology for Additive Manufacturing of Customized Parts by Fused Deposition Modeling (FDM). Application to a Shoe Heel“
Autores (ano de publicação)	A. García-Dominguez, J. Claver, M. A. Sebastián (2020)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual e Projeto Preliminar
Ferramentas utilizadas	Prámetrização geométrica; geração de forma; Otimização topológica; Otimização multiobjetivo; Otimização Dimensional; Análise Funcional
Principais contribuições	Modelos de algoritmos de otimização para: geração de geometria, topologia baseada em condições de contorno, projeto de casca e preenchimento e integração de ambos e otimização multiobjetivo levando em consideração propriedades do componente

Fonte: Autoria própria

Baseando-se nas estruturas desenvolvidas pela metodologia de SCRUM, Reichwein et al. (2020) desenvolveram uma sistemática de desenvolvimento de produtos para MA utilizando da metodologia Agile, essa sistemática tira proveito da flexibilidade dos processos de MA para agilizar o processo de desenvolvimento e diminuir o tempo até o mercado de produtos. A metodologia adaptada é apresentada na Figura 3.21.

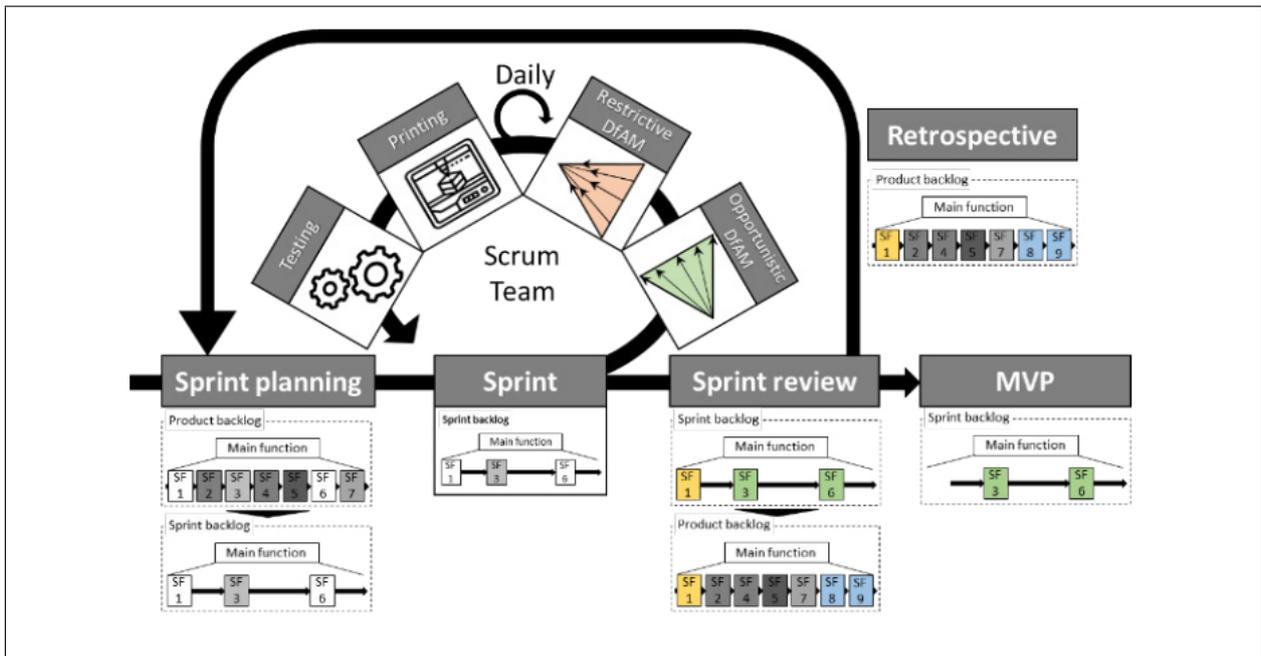


Figura 3.21: Sistemática de projeto para MA baseada na metodologia Agile. Fonte: Reichwein et al. (2020)

Na publicação foi demonstrado que a manufatura desde o modelo CAD, sem a necessidade de ferramental, pode ajudar a superar a maioria dos desafios na aplicação de métodos ágeis de desenvolvimento de hardware. Além disso, foi demonstrada a importância dos protótipos (Produto Mínimo Viável (MVP)) para qualidade, manuseio e conforto, mas também para a idealização de novos projetos durante a fase de desenvolvimento do produto. Devido à produção inicial de protótipos, não é importante que todos os requisitos sejam coletados no início do desenvolvimento do produto ou que a estrutura funcional configurada no início esteja completa. É descomplicado adicionar e refinar requisitos e funções, à medida que mais informações são coletadas durante o processo. Além disso, certos requisitos do cliente podem ser considerados muito tarde no processo de desenvolvimento.

Quadro 3.16: Análise publicação Reichwein et al. (2020)

Título	On the Applicability of Agile Development Methods to Design for Additive Manufacturing
Autores (ano de publicação)	J. Reichwein, S. Vogel, S. Schork e E. Kirchner (2020)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual e Projeto Preliminar
Ferramentas utilizadas	Levantamentos de requisitos de produto; Sprints de projeto; Produção de MVP's (prototipagem funcional); Análise funcional
Principais contribuições	Projeto de desenvolvimento de produto baseado na metodologia Ágil adaptada para MA

Fonte: Autoria própria

Partindo de uma revisão de publicações em DfMA e com o objetivo de atender as considerações de projeto necessárias para a transição de métodos tradicionais para a MA, Vaneker et al. (2020) apresenta o estado da arte em métodos e ferramentas relacionados ao design de geometria ou artefatos funcionais de MA em um ambiente industrial. Métodos e ferramentas, e a forma como são apresentados, enfocam nas necessidades dos designers de produtos buscando soluções de MA. A publicação parte da definição de 7 processos para o projeto de produtos para MA, sendo esses:

1. Definição de modelo virtual (CAD);
2. Criação de arquivo em formato STL;
3. Preparação de fabricação (fatiamento);
4. Processo de manufatura em si;
5. Remoção de suportes e pós processamento;
6. Controle de qualidade e inspeção;
7. Aplicação.

Vaneker et al. (2020) definem três etapas globais para desenvolvimento de produtos baseados em MA, (1) Tomada de decisão de viabilidade; (2) Aplicação de guias de projeto e restrições para MA; e (3) Validação final e otimização de parâmetros de fabricação. A sistemática produzida pelos autores é ilustrada na Figura 3.22.

A principal contribuição do estudo baseia-se no desenvolvimento de uma metodologia que possui as principais ferramentas de projeto sendo desenvolvidas para MA. Essa característica tende a deixar a sistemática complexa e grande, dificultando o entendimento e criando etapas com complexidade exacerbada, como por exemplo a utilização de design generativo, que implica na automatização da etapa de projeto conceitual, buscando geometrias altamente otimizadas desde a concepção.

3.3 Análise dos processos de projeto

Na apresentação das metodologias, um quadro resumo foi elaborado para cada publicação, auxiliando no entendimento da metodologia e adiantando a análise individual à partir da apresentação das principais contribuições. Para a análise conjunta foram elaborados gráficos para permitir a visualização dos dados, levando em consideração dois indicadores, a fase do desenvolvimento de produtos abarcada pela metodologia e as ferramentas utilizadas na sistemática. Para o estudo, vinte publicações de metodologias de desenvolvimento de produtos voltada para MA foram utilizadas. A definição dos indicadores é apresentada abaixo:

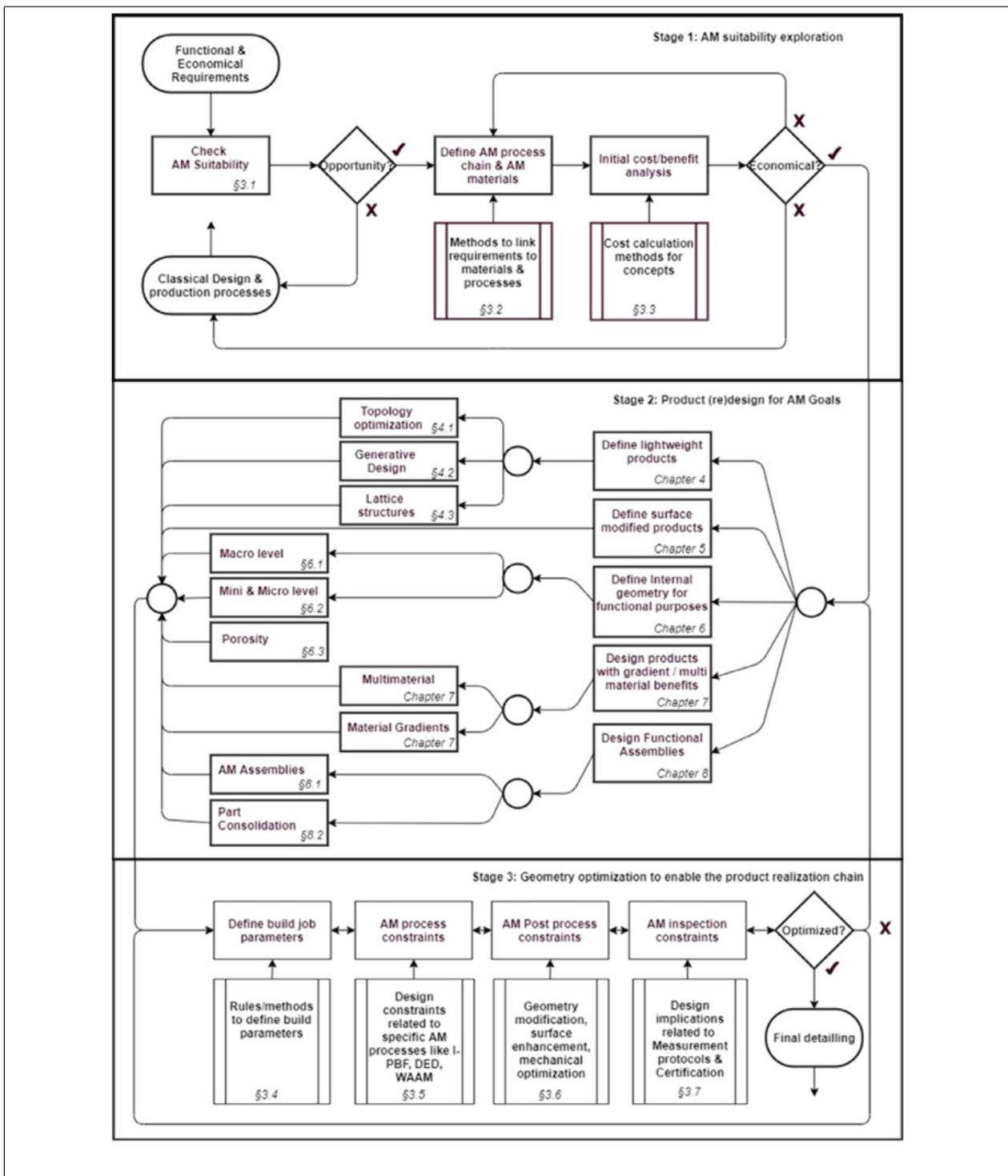


Figura 3.22: Sistemática de projeto para MA. Fonte: Vaneker et al. (2020)

- Fase(s) de desenvolvimento de produto abarcadas pela metodologia, levando em consideração a definição de fases da VDI 2221 apresentada na fundamentação teórica;
- Ferramentas de desenvolvimento de produto, representando as atividades e definições aplicadas na metodologia para o desenvolvimento de produtos voltado para MA.

Quadro 3.17: Análise publicação Reichwein et al. (2020)

Título	Design for additive manufacturing: Framework and methodology
Autores (ano de publicação)	T. Vaneker, A. Bernard, G. Moroni, I. Gibsona, Y. Zhangd (2020)
Fases de desenvolvimento	Projeto Conceitual e Projeto Preliminar
Ferramentas utilizadas	Análise de viabilidade técnica, Definição de geometria, Otimização de produto
Principais contribuições	Análise de metodologias existentes e levantamento do estado da arte de metodologias e ferramentas do DfMA

Fonte: Autoria própria

A avaliação das etapas de desenvolvimento de produto abarcadas pela metodologia ajuda a identificar em que etapa do desenvolvimento de produtos a sistemática proporciona a utilização de conceitos de DfMA e até onde ela é capaz de auxiliar o projetista. O gráfico com a porcentagem de metodologias que abarcam cada fase de desenvolvimento é apresentado na Figura 3.23.

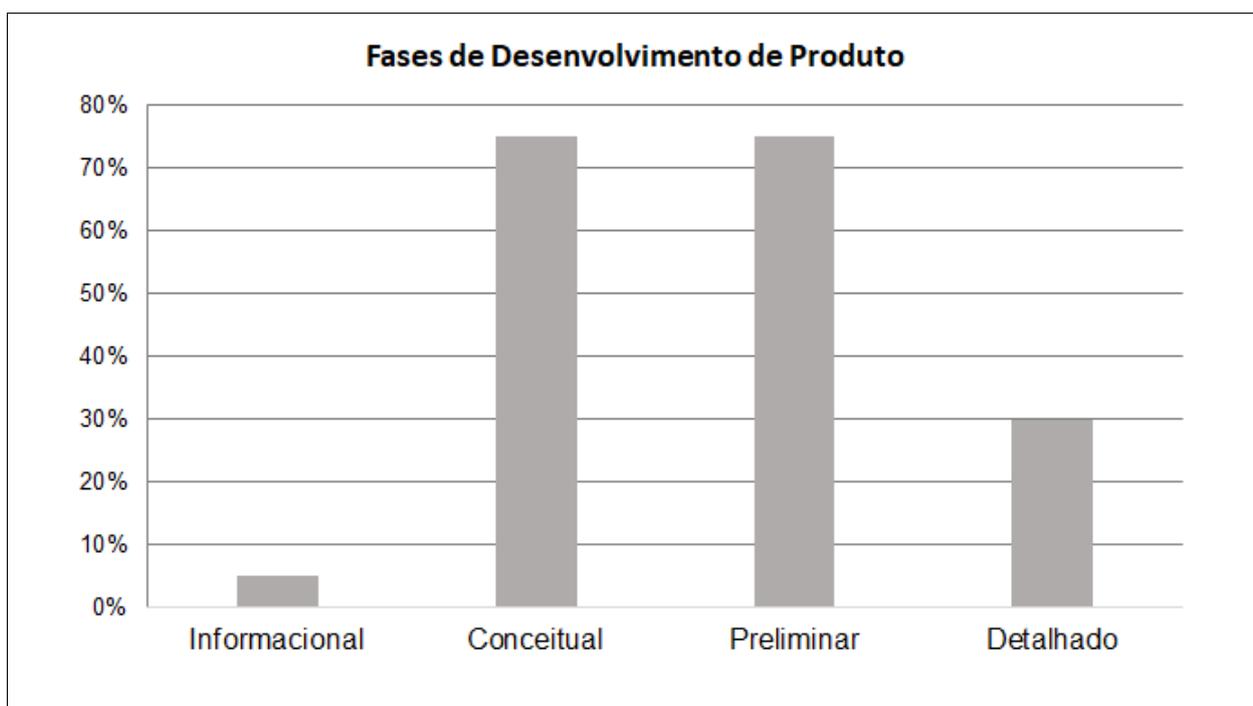


Figura 3.23: Fases de desenvolvimento abarcadas nas publicações selecionadas. Fonte: Autoria própria

Segundo a teoria de desenvolvimento de produtos, nas etapas iniciais de um projeto são tomadas as principais decisões. O custo de realização de alterações no desenvolvimento são mais onerosas quanto mais tarde forem tomadas, dessa forma, a utilização dos conceitos de DfMA nas etapas de projeto conceitual e detalhado costumam atrasar o lançamento de produtos no mercado e onerar o custo do desenvolvimento. A maioria das publicações em DfMA buscam adaptar

geometrias e componentes para serem fabricados via MA, quando o enfoque principal deveria ser desenvolver as concepções de produto já voltadas para a MA. Como a análise das vantagens da MA pode ser realizada de maneira prévia, desde as etapas de pré-desenvolvimento, uma sistemática completa deve possibilitar a avaliação do uso da MA desde a definição do problema. A sistemática que mais se aproxima desse objetivo é a definida por Kumke, Watschke e Vietor (2016), porém ainda sem abarcar as tomadas de decisão que são necessárias para definir se a MA é vantajosa na aplicação. Sem utilizar as vantagens dos processos de MA é muito complicado justificar seu uso economicamente.

As ferramentas de desenvolvimento utilizadas indicam os objetivos dos autores no desenvolvimento da metodologia por representarem etapas para aplicação da sistemática e possibilitar a definição de quais características do produto foram maximizadas para a aplicação da MA como processo de fabricação. No estudo, 33 ferramentas de desenvolvimento de produto foram identificadas nas 20 publicações analisadas, um gráfico com a porcentagem de estudos que utilizam as ferramentas mais relevantes é apresentado na Figura 3.24 onde o critério foi a utilização em pelo menos 15% das publicações, representando ao menos 3 publicações. A tabela 3.5 apresenta todas as ferramentas utilizadas nas publicações, com o número de sistemáticas que utilizam e a porcentagem de uso baseado no espaço amostral do estudo.

Dentre as ferramentas identificadas a mais utilizada nas metodologias foi a análise funcional, exemplificando o quão necessário é definir o problema que deve ser solucionado pelo produto e conseqüentemente suas funções, global e desdobramentos. Considerando as diferentes restrições dos processos de MA quanto a manufaturabilidade de geometrias, as ferramentas que possibilitam otimização de peças também possuem utilização em um grande número de metodologias. Possibilitar que diferentes formas possam ser fabricadas agrega aos projetistas uma ampla liberdade de desenvolvimento de produtos, levando à possibilidade de utilizar otimizações em um nível alto de verosimilhança entre o modelo otimizado e o modelo fabricado. Para métodos tradicionais a semelhança entre geometrias otimizadas e fabricadas é bem menor devido às restrições de fabricação e guias de projeto rígidos. Otimizações envolvendo o processo de adição de materiais durante a fabricação também são bastante utilizados nas metodologias. O controle e forma de adição dos materiais influencia nas características da peça e na confiabilidade do processo.

3.4 Desenvolvimento de Processo de Projeto de Produto para MA

Analisando as métricas e objetivos das sistemáticas de PDP-MA, é possível identificar os requisitos necessários para o desenvolvimento de uma sistemática global. Dentre as publicações apresentadas nenhuma parte da premissa de avaliar a viabilidade da utilização da MA nas primeiras etapas do desenvolvimento, como apresentado na norma ISO/ASTM 52910:2018. O

Tabela 3.5: Ferramentas de desenvolvimento de produto identificadas. Fonte: Autoria própria

Ferramenta de desenvolvimento de produto	Total de publicações	Porcentagem de uso
Análise Funcional	9	45%
Análise Estrutural (MEF)	7	35%
Otimização topológica	7	35%
Otimização de Preenchimento	6	30%
Parametrização geométrica	5	25%
Otimização de orientação de fabricação	4	20%
Geração de forma	4	20%
Elemento Mínimo Manufaturável	3	15%
Superfícies e Volumes Funcionais	3	15%
Prototipagem funcional	3	15%
Análise de viabilidade técnica	3	15%
Requisitos de produto	3	15%
Análise de soluções existentes	2	10%
Otimização de forma	2	10%
Otimização de trajetórias de fabricação	2	10%
Consolidação de partes	2	10%
Simulação de processo	2	10%
Seleção de recursos	2	10%
Otimização multiobjetivo	2	10%
Otimização dimensional	2	10%
Seleção de concepções	1	5%
Banco de dados	1	5%
Tomada de decisão	1	5%
Classificação de maquinários	1	5%
Comparação de performance com métodos tradicionais	1	5%
Testes e validações	1	5%
Controle de qualidade	1	5%
Otimização de suportes	1	5%
Definição de problema	1	5%
Análise de ciclo de vida	1	5%
Design Axiomático	1	5%
TRIZ	1	5%
Sprints de projeto	1	5%

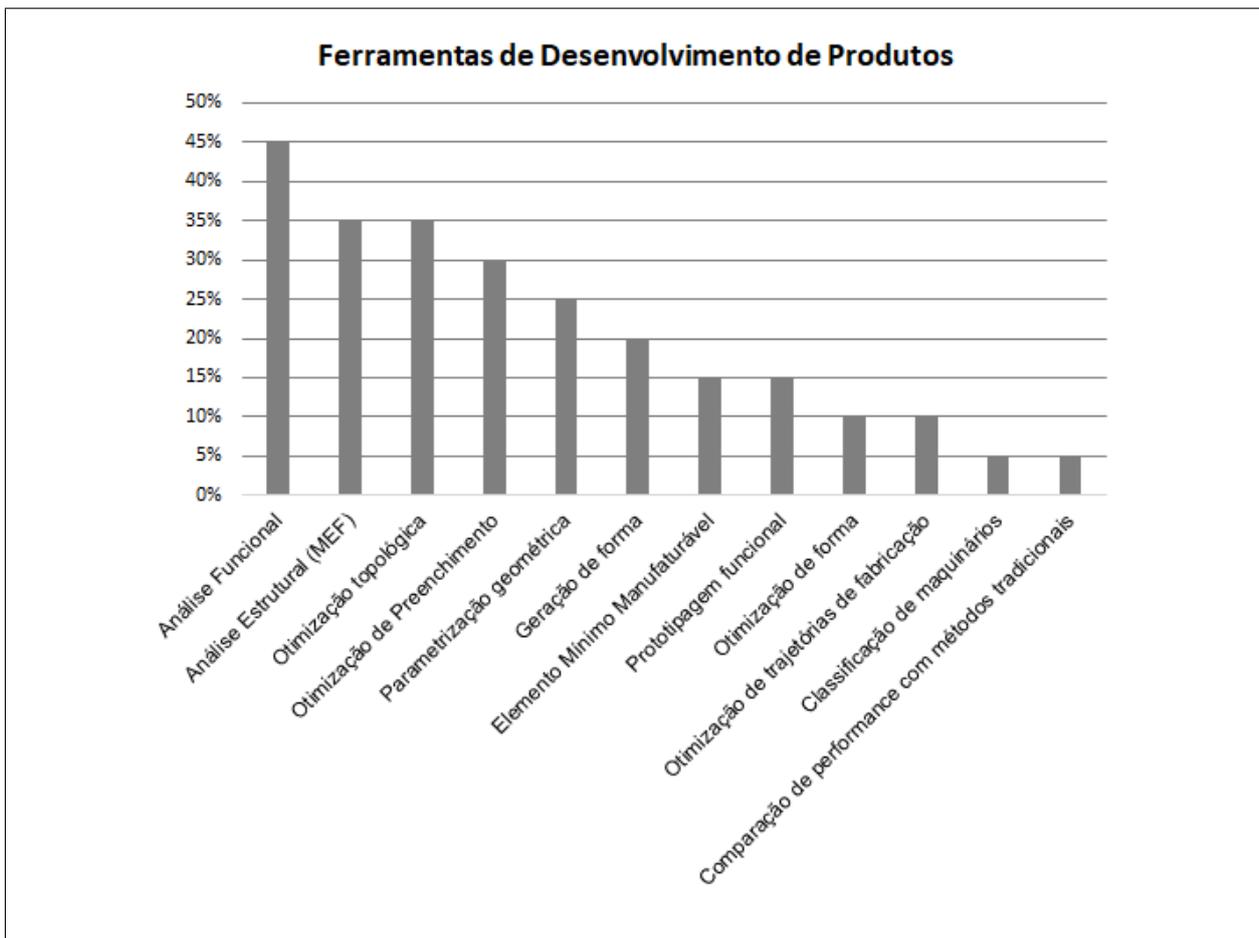


Figura 3.24: Ferramentas de desenvolvimento de produto utilizadas nas publicações selecionadas. Fonte: Autoria própria

aproveitamento das vantagens proporcionadas pela MA é vital para justificar os custos e baixa produtividade dos processos, portanto, antes de desenvolver uma sistemática visando adaptar geometrias para a MA ou otimizar parâmetros do processo, é necessário analisar o projeto e verificar se a MA justifica sua utilização, essa atividade representa a adaptação da macro fase de pré-desenvolvimento para MA.

Posteriormente à etapa de análise do projeto em função das vantagens proporcionadas pela MA, inicia-se a etapa de projeto informacional. A fase de projeto informacional representa um estudo do problema a ser solucionado e possui como principal entrega a definição de requisitos do produto com valores-meta e informações adicionais qualitativas. Dessa forma, não é necessário realizar adaptações nos modelos tradicionais. Após a definição dos requisitos do produto é necessário realizar outra etapa de tomada de decisão, pois o produto em desenvolvimento pode apresentar características que justifiquem a utilização da MA e não se enquadrar dentro das restrições de fabricação do processo. Como descrito na norma ISO/ASTM 52910:2018, diversos fatores podem influenciar nessa tomada de decisão, sejam dimensões máximas, resistência mecânica, acabamento e etc. Assim como na macro fase de pré-desenvolvimento, a principal fonte de informações dessa etapa será a norma ISO/ASTM, apesar de alguns estudo já demons-

trarem atuação nessa etapa do desenvolvimento, como Kumke, Watschke e Vietor (2016).

Como última atividade de viabilidade da MA são selecionados os processos que atendem aos requisitos de produto estipulados. Essa definição é antecipada à etapa de definição de conceitos de solução para poder definir estratégias mais assertivas no processo de criação e seleção de concepções, tendo em vista que as restrições do processo de manufatura são diferentes para as tecnologias de MA.

Após definir a viabilidade dos processos de MA para o produto em desenvolvimento a sistemática deve apoiar a etapa de ideação e seleção de conceitos de solução, levando em consideração as características construtivas ideais e as restrições do processo, visando o projeto de componentes manufaturáveis e representando a fase de projeto conceitual. Com o conceito de produto definido é possível obter a geometria funcional pura da peça e definir as superfícies e volumes funcionais. Para a MA essa ferramenta é de grande relevância, como comprovado na alta porcentagem de utilização nas sistemáticas publicadas.

A forma com que geometrias são fabricadas na MA difere dos processos tradicionais, portanto novas guias de projeto devem ser elaboradas para garantir peças otimizadas em função do processo de fabricação. Nessa fase da sistemática inicia-se a definição da cadeia digital de fabricação. A MA, independente do processo analisado, possui um fluxo digital de dados que inicia no desenvolvimento de um modelo virtual do produto, em um software de CAD, ao final da fase de projeto conceitual esse modelo já deve estar desenvolvido para prosseguir com as etapas de projeto de produto.

Para maximizar as vantagens da MA otimizações podem ser aplicadas nesse estágio do desenvolvimento, com o desenvolvimento de um modelo virtual do produto diversas opções de otimização podem ser aplicadas no modelo de CAD, através de ferramentas de CAE, partindo de redução de peso e maximização de resistência mecânica até otimizações multi-objetivas, considerando o processo de fabricação e propriedades do componente. Partindo da definição de fases da VDI 2221 as otimizações representam o início da fase de projeto preliminar.

Após a conceptualização e otimização do produto o conceito de solução do produto está estabelecido, portanto inicia-se a definição do processo de fabricação. Considerando a cadeia digital de fabricação é necessário entender como cada processo é virtualmente estipulado e posteriormente definir guias para a seleção de parâmetros de processo. Nessa etapa é necessário conhecer não só o processo de MA mas também o maquinário que será utilizado, pois ele irá definir como as informações da peça serão transmitidas e tratadas.

Como o processo para geração de peças via MA é realizado de forma automatizada pelos maquinários, não é necessário desenvolver guias ou instruções para a etapa de fabricação em si. Observando o processo em tempo real é possível identificar falhas prematuramente e evitar o desperdício de material, essas definições são geralmente obtidas de forma empírica à partir de observação e podem também ser definidas de forma teórica, porém, não serão integradas na

sistemática por requererem o desenvolvimento de ferramentas de controle e visão computacional, considerando que o processo não necessita de supervisão do operador durante a fabricação.

Por fim, a metodologia de desenvolvimento deve possuir guias para o pós-processamento de peças e controle de qualidade. Diversos processos de MA possuem a necessidade de algum tipo de pós-processamento, seja para remoção de partes (suportes), controle dimensional e de forma (cura posterior) ou acabamento de superfícies, geralmente definidos pelos requisitos de produto.

À partir das observações, os objetivos definidos para a metodologia de desenvolvimento de produtos para MA foram:

- Realizar a definição por utilizar ou não a MA na macro fase de pré-desenvolvimento;
- Justificar o uso da MA em função do aproveitamento de características específicas dos processos;
- Guiar o processo de ideação de concepção à partir de guias de projeto voltadas para MA;
- Propor metodologias para seleção de concepção baseado no processo de manufatura;
- Definir os principais parâmetros do processo;
- Definir o pós-processamento necessário para o produto;
- Auxiliar no desenvolvimento do controle de qualidade;
- Possuir etapas iterativas durante todo o desenvolvimento para evitar grandes dispêndios de tempo e custo em eventuais adaptações ou alterações de peças;

Com os objetivos definidos a metodologia de desenvolvimento foi elaborada à partir da divisão em cinco etapas: Análise de viabilidade; Projeto para funcionalidade; Definições do Processo; Fabricação e Validação de produto; e Análise de Reprodutividade. A sistemática desenvolvida é ilustrada na Figura 3.25.

3.4.1 Análise de Viabilidade

A primeira etapa definida na sistemática inicia-se com duas atividades relativas à macro fase de pré-desenvolvimento do produto, buscando inicialmente definir o problema e realizar estimativas de fabricação e produção do produto. Essas atividades provêm da macro fase de pré-desenvolvimento elaborada em teorias clássicas do desenvolvimento e devem ser performadas no projeto de produtos independente de visar a MA como processo de fabricação. Elas foram definidas como primeiras atividades na sistemática voltada para MA porque nesse estágio de desenvolvimento é possível estimar se a MA representa alguma vantagem na fabricação do produto.

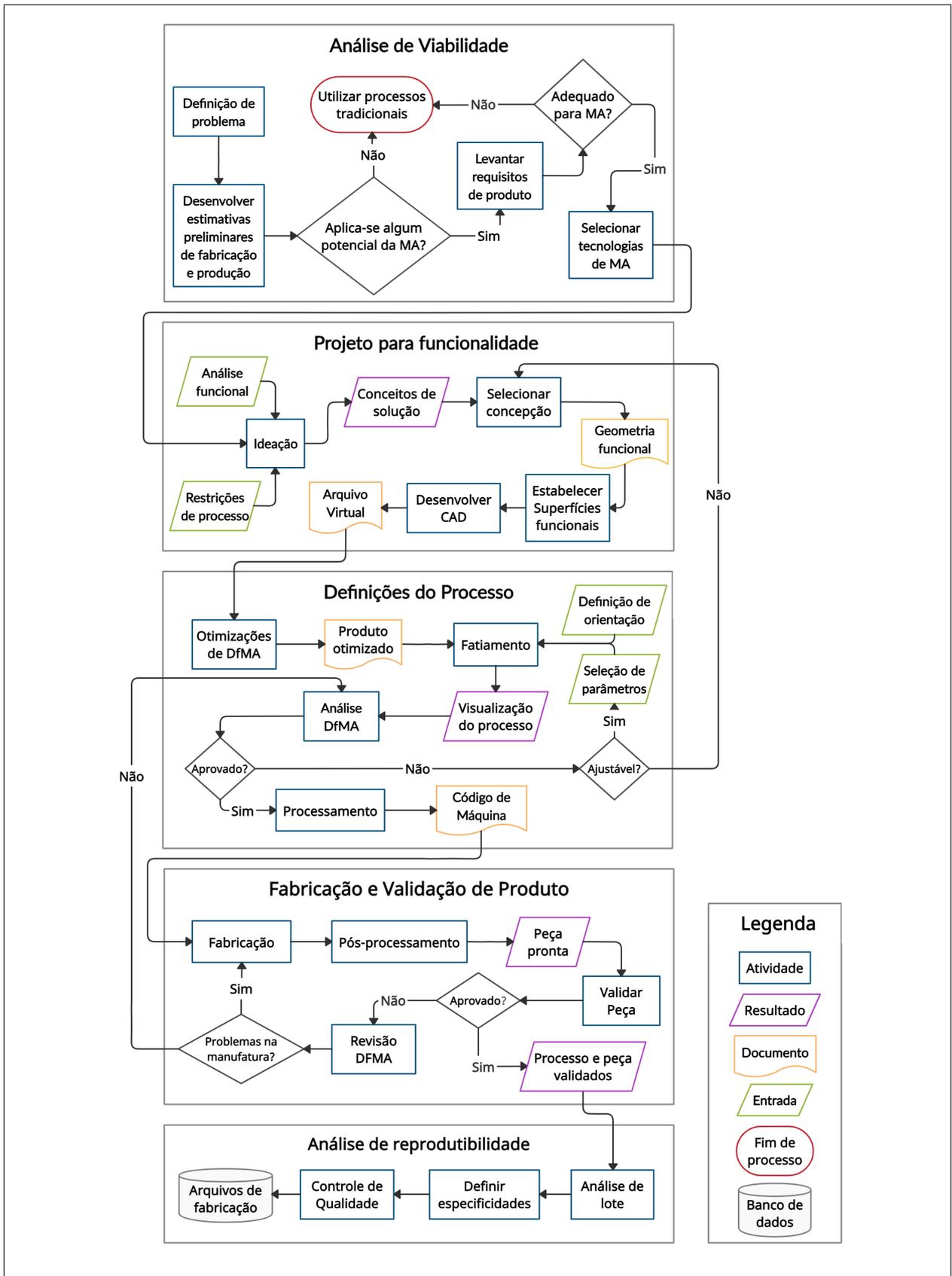


Figura 3.25: Processo de desenvolvimento de produto voltado para MA. Fonte: Autoria Própria

Como apresentado por Ponche et al. (2012), a utilização da MA é pautada no aproveitamento de suas vantagens pois sua escolha é injustificável na comparação com métodos tradicionais em função de custos e produtividade. Essa caracterização provém da análise das estimativas do produto em função das principais vantagens de projeto que a MA proporciona. Na sistemática essa etapa será uma adaptação da norma ISO:ASTM 52910:2018 com adaptações identificadas nos trabalhos correlatos. As vantagens da MA que devem ser observadas em um produto para justificar sua utilização estão listadas no Quadro 3.18, com descrição e exemplos de aplicação para cada item. Sem a observância de ao menos uma dessas características no produto a ser desenvolvido o projetista deve optar por métodos tradicionais de fabricação.

Com a primeira tomada de decisão sendo favorável ao uso da MA, deve-se então definir os requisitos de produto relativos ao problema a ser solucionado. Essa atividade representa os resultados esperados ao final da realização da fase de projeto informacional, seguindo as teorias de desenvolvimento de produto. As atividades do projeto informacional não se alteram em função da adaptação para MA, dessa forma não foram representados na sistemática para além da utilização dos requisitos de produto. O levantamento de requisitos de produtos e a definição de valores-meta para requisitos é uma etapa fundamental do desenvolvimento de produtos. As características definidas nesse estágio irão balizar a realização do restante do desenvolvimento.

A segunda tomada de decisão dessa etapa é relativa à viabilidade dos processos de MA em atender os requisitos de produto. Avaliando se existem processos de MA que atendem aos requisitos levantados e proporcionam o atendimento de especificações-meta. Essa segunda tomada de decisão começa a enviesar o desenvolvimento para alguma tecnologia de MA específica, pois nos requisitos de produto costumam ser desenvolvidas definições de possíveis materiais, necessidades de resistência, condições de uso, acabamento e etc. Os requisitos de produto são estipulados para cada projeto de produto avaliando suas condições de uso e envolvem restrição geométricas, requisitos de acabamento, tolerâncias, restrições impostas pelo ambiente de utilização e possíveis requisitos normativos. Restrições geométricas envolvem dimensões máximas e mínimas do produto, globais ou aplicadas à contornos e volumes funcionais. Requisitos de acabamento são representados por regiões ou produtos que necessitem de controle de rugosidade ou propriedades superficiais específicas. Requisitos de tolerância são aplicados para produtos que necessitam de um controle de dispersão de medidas e que participem de etapas de montagem, sendo aplicados à todo produto ou à regiões específicas. Requisitos normativos variam de acordo com a aplicação do produto, aplicações podem requerer por exemplo restrições envolvendo vedação e fatores de segurança de dimensionamento.

Como descrito, essa segunda tomada de decisão é fortemente influenciada pelo tipo de produto sendo desenvolvido. Por essa razão não foi elaborada um guia específico para essa atividade, deixando em aberto em função dos requisitos levantados. Como forma de exemplificar essa atividade, a Tabela 3.6 apresenta um guia para definir um cenário seguro para componentes de aplicação estrutural publicados em Russell (2018) como critérios definidos pela Agência Espacial

Quadro 3.18: Vantagens e oportunidades da MA

Vantagem	Descrição	Exemplos de aplicação
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.	Fabricação de próteses e guias cirúrgicos baseados no paciente; Fabricação de embalagens customizadas para envio de produtos com alto valor agregado.
Otimização de peso	A MA permite a otimização de peso de peças à partir da liberdade de fabricação de geometrias.	Fabricação de peças de motor e carenagens para engenharia de competição; Fabricação de componentes para indústria aeronáutica.
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.	Fabricação de trocadores de calor com eficiência otimizada; Fabricação de moldes com canais de resfriamento otimizados para reduzir falhas e tempo de ciclos;
Integração Funcional/Consolidação de Partes	A MA permite que projetistas incorporem partes e reduzam etapas de montagem de componentes.	Integração de partes de montagens, reduzindo a quantidade de componentes, tempo de montagem e removendo fixadores;
Superfícies estruturais	Processos da MA, com resolução em micro ou nanoescala, podem criar superfícies, texturas e porosidades personalizadas.	Aumento de eficiência de colagem de componentes; Controle de permeabilidade de superfícies; Integração de superfícies de aderência aos componentes.
Complexidade de materiais	Alguns processos de MA podem produzir peças com diferentes materiais ou propriedades materiais em regiões controladas do objeto.	Fabricação de mecanismos de deformação projetada; Fabricação de componentes com eletrônica integrada; Fabricação de amortecedores de vibração otimizados.
Fabricação sob demanda	Devido à cadeia digital de fabricação da MA, componentes podem ser fabricados somente quando necessário, sem restrições para fabricação unitária.	Fabricação de peças de reposição; Fabricação de gabaritos de fabricação e montagem; Fabricação de protótipos funcionais; Fabricação de peças com alto grau de especificidade.

Tabela 3.6: Critérios para determinar aplicação estrutural. Fonte: Russell (2018), com adaptações.

Propriedade do Material	Critério para aplicação
Condições de carregamento	Carregamentos bem definidos ou limitados
Fatores de degradação	Somente temperatura
Resistência máxima	30% de acima do fator de segurança
Limite de escoamento	20% de acima do fator de segurança
Deformação local	Deformação plástica local <0.005
Fadiga de alto ciclo, superfícies tratadas	4x fator de vida ou penalização de 20% no limite de vida à fadiga
Fadiga de alto ciclo, Superfícies cruas	10x fator de vida ou penalização de 40% no limite de vida à fadiga
Fadiga de baixo ciclo	Sem previsão de deformação plástica cíclica
Resistência ao impacto	10x fator de vida
Fluência	Sem previsão de deformação por fluência

Americana (NASA).

Uma etapa importante que deve ser realizada ao final da checagem de viabilidade técnica é reavaliar os custos envolvidos no desenvolvimento e na fabricação do produto. Como essa tomada de decisão é base para definir o processo de MA que será utilizado na fabricação do produto, as estimativas de custos de fabricação podem ser atualizadas em função da tecnologia de MA selecionada, tendo em vista que a discrepância de custos entre os processos é notável.

3.4.2 Projeto para Funcionalidade

A segunda etapa visa guiar a definição de conceitos para o produto, partindo dos requisitos do produto, da análise funcional e das restrições do processo, aqui representado de forma específica após a seleção de tecnologias de MA realizada na última atividade da etapa de análise de viabilidade.

A primeira entrada da etapa de projeto para funcionalidade é a análise funcional. Como definido na fundamentação teórica, a análise funcional é representada pela definição da principal atribuição do produto, nomeada de função global, que posteriormente é fatorada até o nível de funções elementares. A definição da estrutura funcional de um produto é utilizada para identificar como produto irá atuar para solucionar o problema definido. Uma função significa o que foi projetada para fazer, enquanto desempenho se refere a quão bem a função é realizada. Normalmente, os requisitos de desempenho têm tolerância, enquanto os requisitos funcionais não (YANG; TANG; ZHAO, 2015).

Na atividade de "ideação" os guias de projeto baseados em capacidade dos processos são utilizados para balizar o desenvolvimento de concepções e junto com a análise dos requisitos de produto definem a seleção de uma concepção para prosseguir o desenvolvimento. A geração de

modelos virtuais de todas concepções ou somente da concepção escolhida depende da complexidade do projeto e da capacidade dos projetistas em desenvolver modelagens. No Quadro 3.19 são apresentadas considerações de projeto baseadas nos processos de MA que auxiliam na etapa de ideação, as considerações são baseadas nas premissas de Projeto para Manufatura (DfM) e Projeto para Montagem (DfA).

Quadro 3.19: Considerações de Projeto para MA

Aplicação	Considerações de Projeto
Projeto para Manufatura	A fabricação por camadas e baseada em modelo CAD expande a imaginação de projetistas. Ao contrário dos processos subtrativos e formativos, o processo aditivo pode virtualmente construir peças com qualquer formato
	Peças podem ser projetadas a partir do ponto de vista modular e híbrido, em que as partes são vistas como quebra-cabeças 3D com módulos. Esses módulos são manufaturados separadamente e posteriormente montados com as principais vantagens de possível design alternativo e reduzida complexidade de fabricação
	Possibilita a fabricação de peças com composições de materiais complexas e gradientes de propriedade projetados a partir do processamento em cada ponto ou em cada camada de cada vez
	Os processos de MA permitem a fabricação de complexidade hierárquica em várias ordens de magnitude em escala de comprimento
	As características únicas dos processos de MA tornam possível remanufaturar e reparar com baixo custo e velocidade relativamente alta
Projeto para Montagem	MA facilita a montagem integrada e embutida de componentes por causa das características construtivas de camada a camada ou ponto a ponto
	Juntar vários materiais por MA é um método de montagem viável

Fonte: Yang e Zhao (2015)

A etapa de ideação é uma etapa de predominância de pensamento divergente. O conceito de pensamento divergente é adaptado da metodologia de Design Thinking. Se a fase convergente de resolução de problemas é o que nos leva em direção soluções, o objetivo do pensamento divergente é multiplicar opções para criar escolhas. Podem ser diferentes percepções sobre o comportamento do consumidor, visões alternativas de funcionamento de produtos ou escolhas entre formas alternativas de criar experiências interativas. Ao testar ideias concorrentes entre si, há uma probabilidade maior de que o resultado seja mais ousado, mais criativo e atraente. Mais escolhas significam mais complexidade, o que pode dificultar o desenvolvimento especialmente em função de custos e prazos. A tendência natural da maioria das empresas é restringir os problemas e restringir as escolhas em favor do óbvio e do incremental. Embora essa tendência possa ser mais eficiente no curto prazo, no longo prazo ela tende a tornar uma organização conservadora, inflexível e vulnerável a ideias externas para mudar o jogo. O pensamento divergente é o caminho, não o obstáculo, para a inovação (BROWN; KATZ, 2019).

As ferramentas para a atividade de ideação são diversas, três delas são apresentadas e ava-

liadas na publicação Daly et al. (2016), o brainstorming, a matriz morfológica e a metodologia heurística. Definir ferramentas para criação de soluções não é o principal foco da sistemática desenvolvida e dessa forma a etapa de ideação será mantida somente com a definição teórica. Outra atividade que pode ser realizada utilizando diversas ferramentas é a seleção de uma concepção, onde a mais difundida nesse quesito é a matriz morfológica.

Baseada nos requisitos funcionais, a matriz morfológica aplica pontuações para as concepções de produto idealizadas, à partir da soma de pontuações e considerando pesos de relevância para os scores é realizada a seleção de concepção. Como adaptação para a MA, as restrições e requisitos do processo de manufatura devem ser adicionados aos critérios da matriz morfológica.

A concepção selecionada é então estudada para definir suas superfícies funcionais e consequentemente volumes funcionais, tendo em vista que os volumes funcionais são a representação do preenchimento das superfícies funcionais. As superfícies funcionais são definidas como regiões (faces) da geometria do produto que exercem alguma função dentro da estrutura funcional definida. Estabelecer os requisitos e restrições para regiões funcionais é essencial para garantir o atendimento dos requisitos de produto. Em seguida o arquivo virtual do produto deve ser gerado. Tendo em vista que os processos de MA possuem uma cadeia digital de fabricação que inicia à partir da definição da geometria da peça, obtida através de modelagem em softwares de *Computer Aided Design* (CAD).

3.4.3 Definições do Processo

A terceira fase é referente ao desenvolvimento do processo de fabricação, iniciando com um processo de otimizações de peça baseadas no processo de manufatura, estabelecendo guias para seleção de parâmetros, guias para avaliar o processamento antes de realizar a fabricação e definição da linguagem de programação que deve ser utilizada para envio de informações ao maquinário.

A sistemática parte da aplicação em nível de componente, portanto uma discretização do projeto até esse nível é necessária. Partindo de análises de fatoração e consolidação de partes define-se previamente quais componentes serão utilizados para o produto. Nessa análise os conceitos de Projeto para Montagem (Design for Assembly) são utilizados para otimizar o processo de montagem do produto e reduzir o custo de fabricação. Essa análise foi apresentada no capítulo 2, com suas premissas e considerações. A definição de modularidade de componentes parte de uma premissa que a consolidação de partes é sempre desejável em qualquer projeto, por otimizar etapas de montagem e reduzir custos. Para efetuar essa etapa utiliza-se a ferramenta de matriz indicadora de módulos, que realiza uma avaliação prévia de quais funções podem ser agregadas e definir os módulos do produto.

Segundo Yang, Tang e Zhao (2015), não existe uma estrutura clara para realizar a consolidação de partes extensão do sucesso depende muito da experiência dos designers e compreensão do

funcionamento requisitos. Dessa forma, a busca por multifuncionalidade de componentes costuma balizar a busca por redução dos componentes de um produto. Os aspectos construtivos da MA permitem ao projetista explorações mais ambiciosas das possibilidades de projeto, como por exemplo a utilização de múltiplos materiais em um único componente sem a necessidade de montagens (GIBSON et al., 2014).

A consolidação de partes é a primeira otimização de produto definida na atividade de "otimizações de DfMA". Após a realização da análise de redução de componentes através da consubstanciação é possível realizar otimizações por algoritmos e análises computacionais. Essas otimizações possuem sua base nos softwares de CAE e de programação. Para o desenvolvimento de produtos a principal ferramenta de apoio para otimizações é o Método de Elementos Finitos, como apresentado na Tabela 3.5. Por conta da cadeia virtual de desenvolvimento de modelos para fabricação por MA, os recursos de CAD/CAE podem ser amplamente utilizados para análise virtual de modelos. O uso da análise por elementos finitos (FEA) é uma das ferramentas de CAE mais difundidas atualmente. Seu uso é comum em vários projetos, sendo aplicável para análises térmicas, estruturais, modais e de escoamentos. Devido à especificidade apresentada no comportamento mecânico e térmico de cada processo e do caráter didático da sistemática, os processos de otimização computacional não serão abordados.

Os métodos de otimização buscam melhorar o design de uma peça ajustando os valores das variáveis de design a fim de atingir objetivos desejados, normalmente relacionados ao desempenho ou peso estrutural, da melhor maneira possível e sem violar restrições (GIBSON et al., 2014). Geralmente, os métodos de otimização de estrutura são mais específicos com objetivos concretos. Os métodos de otimização de projetos de estruturas relacionados à MA podem ser classificados por diferentes objetivos, como otimização para rigidez e resistência, deformação e capacidade de fabricação (YANG; ZHAO, 2015).

Pela capacidade da MA de fabricar peças com formatos e composições de materiais muito complexos, os projetistas têm se interessado no desenvolvimento de métodos que lhes permitem projetar peças complexas (ROSEN, 2016). Devido a este nível mais alto de liberdade geométrica, a otimização do projeto se torna mais importante, já que a complexidade da geometria resultante do processo de otimização não é mais um problema. Por outro lado, o número de soluções viáveis aumenta significativamente, portanto, selecionar as alternativas mais adequadas torna-se mais complicado (GARCÍA-DOMINGUEZ; CLAVER; SEBASTIÁN, 2020a).

Segundo Rosen (2016), os métodos de síntese de formas são divididos em quatro categorias:

- Otimização de tamanho - onde valores de dimensões são determinados;
- Otimização de forma - as formas das superfícies das peças são alteradas, normalmente alterando as posições dos vértices de controle para uma curva ou superfície;
- Otimização topológica - as distribuições de material são exploradas;

- Otimização evolutiva - utiliza algoritmos evolutivos, como algoritmos genéticos, para explorar uma variedade de formas.

Com relação à região de otimização, Yang e Zhao (2015) desenvolve uma classificação baseada na previsibilidade do preenchimento interno de peças, separando os métodos entre passivos e positivos. Se o preenchimento interno de peças otimizadas for imprevisível, o método de otimização é definido como passivo; caso contrário, é chamado de otimização positiva. Os métodos de otimização passivos incluem otimização de forma, otimização de tamanho e otimização de topologia. Visto que a otimização da topologia não apenas otimiza os formatos dos limites, mas também altera a topologia interna, ela oferece uma solução melhor para maioria dos requisitos.

Para partes otimizadas positivamente, sua topologia é geralmente em padrões hierárquicos, como estrutura celulares. Este tipo de otimização requer mais interferência humana e conhecimento para interpretar objetivos, como os requisitos de proliferação celular no projeto de estruturas celulares. Mais importante ainda, os resultados da otimização positiva dependem muito dos padrões escolhidos (ou seja, estruturas homogêneas ou não-homogêneas) ao contrário da forma generativa de otimização topológica (YANG; ZHAO, 2015).

Os métodos de projeto que sintetizam automaticamente formas complexas e composições de materiais são naturalmente interessantes e incluem a otimização topológica, a otimização evolutiva e métodos relacionados. Existem bons softwares de otimização topológica comerciais e muitos já são usados pela indústria. Avanços de pesquisa recentes começaram a incluir algumas considerações de MA, que prometem permitir que os designers tirem proveito dos recursos exclusivos da MA de uma maneira eficiente e eficaz (ROSEN, 2016). Atualmente, as tecnologias de manufatura aditiva existentes têm alcançado maior presença e reconhecimento no campo produtivo, e ao mesmo tempo as ferramentas de design e otimização alcançaram a capacidade de responder aos novos desafios que as novas capacidades dessas tecnologias produtivas oferecem aos projetistas. (GARCÍA-DOMINGUEZ; CLAVER; SEBASTIÁN, 2020a).

A atividade de fatiamento é responsável por dividir a geometria em finas fatias, criando assim a divisão da peça em camadas. Nessa etapa são definidos os parâmetros do processo, os parâmetros dependem muito da tecnologia de MA utilizada, o princípio de adição de material utilizado pela tecnologia tende a reger os principais parâmetros. Por exemplo, para tecnologias de laser, a intensidade do feixe, velocidade de varredura e tempo de exposição são parâmetros comuns do processo.

Para a execução do fatiamento, além da definição de parâmetros é necessário também definir a orientação da peça durante a fabricação. Essa etapa pode ser realizada de forma automatizada por softwares, em geral analisando a quantidade de suportes que são necessários para a fabricação à partir da análise de inclinação de parede e disposição das superfícies do produto. Além da quantidade de suportes, a orientação deve ser guiada pelos requisitos de superfícies funcionais, tendo em vista que a orientação de fabricação afeta a resistência e a rugosidade dos componentes

de forma direcional.

Os principais softwares disponíveis para realizar o fatiamento de geometrias possuem ferramentas de visualização do processo em função de camadas, ou seja, é possível visualizar como ficará cada camada fabricada no processo antes de realizar a fabricação. Essa ferramenta é essencial para analisar o processo usando as técnicas de DfMA.

Na visualização do processo deve-se atentar inicialmente para a formação das paredes da camada, observar se existem pontos de descontinuidade de parede que podem gerar falhas prematuras é essencial, dentro dos parâmetros de processo é possível indicar para o programa de fatiamento a proporção de material que pode ser sobreposto para completar regiões, esse parâmetro permite obter geometrias contínuas e prorrogar a vida útil de um componente. A análise da visualização de processo é designada de "Análise DfMA" na sistemática. As análises necessárias e possíveis vão variar bastante em função do processo de MA e pouco em função do software utilizado. Dessa forma, não será totalmente definida, deixando seu complemento para ser realizado de forma individualizada para cada processo de MA.

A tomada de decisão de aprovação do processo de manufatura de definido de forma virtual deve levar em consideração se há alguma falha prematuramente identificável e possível de ser mitigada através da manipulação de parâmetros ou de alterações na geometria da peça, que voltaria à etapa de seleção de concepções para ajustes de forma ou até mesmo de concepção em função do processo.

Constatando a ausência de falhas perceptíveis na visualização do processo, a etapa de processamento deve ocorrer, obtendo como resultado o código de interpretação de máquina. Essa etapa diz respeito principalmente ao maquinário a ser utilizado para fabricação das peças, a maioria das máquinas operam utilizando "códigos G", normatizados pela ISO 1056, porém alguns fabricantes optam por utilizar firmwares próprios e por consequência a codificação de movimentações e ativações pode variar.

3.4.4 Fabricação e Validação de Produto

A quarta fase envolve a fabricação de peças, avaliação de primeiros modelos e guias para realização de pós-processamentos. A etapa de fabricação e avaliação de produto inicia-se na fabricação um modelo do componente projetado. Essa etapa ainda traz resquícios do processo de tentativa e erro que tem caracterizado as aplicações de MA ao longo dos anos. Os softwares atuais de simulação ainda não possuem módulos precisos que permitem simular o processo com exatidão e permitir a retirada dessa etapa dentro de uma metodologia de projeto para MA. Para a atividade de fabricação não são necessários grandes ajustes, tendo em vista que na etapa anterior, de análise de processo, já são gerados os códigos de máquina e os mesmos só devem ser enviados ao maquinário. O envio de código de máquinas pode ser realizado fisicamente, através da utilização de mídias removíveis, através de sistemas de comunicação via serial ou até mesmo

pela internet, a solução dependerá exclusivamente do maquinário.

A partir da fabricação de modelos inicia-se uma etapa iterativa, similar ao processo de ajustes de tryouts realizado nos processos de injeção de peças. A sistemática possui uma etapa de tomada de decisão nesse ponto que permite o ajuste de parâmetros de fabricação ao realizar um ciclo com a atividade de "análise DfMA" descrita na etapa de definições do processo. Esse ciclo é finalizado após obter um modelo aprovado, com a aprovação sendo realizada através dos requisitos de produto, levantados ao final do projeto informacional.

O pós-processamento refere-se aos estágios de acabamento das peças para fins de aplicação. Todas as tecnologias de MA exigem pós-processamento para produzir peças que estão prontas para uso. Este pós-processamento pode variar desde a remoção do material de suporte até a melhoria da qualidade da superfície, a coloração e pintura, e ao envelhecimento para peças de polímero e tratamento térmico para peças de metal (DIEGEL; NORDIN; MOTTE, 2019). Isso pode envolver acabamento abrasivo, como polimento e lixamento, ou aplicação de revestimentos. Esta etapa do processo é muito específica, variando em função da aplicação e do processo de MA. Alguns pós-processamentos podem envolver tratamento químico ou térmico da peça para atingir as propriedades finais da peça. Diferentes processos de MA têm resultados diferentes em termos de precisão e, portanto, pode ser necessário o retrabalho de superfícies para atingir dimensões finais e requisitos de acabamento. Alguns processos produzem componentes relativamente frágeis que podem exigir o uso de preenchimento e/ou revestimentos de superfície para fortalecer a peça final ou ainda processos de cura de material posterior à fabricação (GIBSON et al., 2014). O Quadro 3.20 apresenta o fluxo de pós-processamento em função da categoria de MA, seguindo a nomenclatura normatizada pelas agências ISO e ASTM.

3.4.5 Análise de reprodutibilidade

A quinta e última etapa da sistemática foi desenvolvida para guiar os projetistas no controle de lotes de fabricação, controle de qualidade de peças e identificar toda documentação que deve ser armazenada para possibilitar a reprodução do produto de acordo com a demanda.

Nessa etapa da análise o projeto do componente voltado para fabricação via MA já está concluído, partindo do princípio que a peça fabricada foi validada. Para finalizar a etapa de desenvolvimento é necessário performar primeiramente uma análise de lote de fabricação, essa atividade permite identificar se é possível fabricar mais de uma unidade do componente por utilização do maquinário, reduzindo o período ocioso de máquinas e ampliando a produtividade. De forma geral, parte-se do princípio de que, conhecido o volume útil do maquinário, insere-se a maior quantidade de peças possível de ser encaixada nesse volume, existindo inclusive funções em softwares de fatiamento que performam esse posicionamento automaticamente. Um cuidado essencial que precisa ser tomado nessa etapa é verificar a direção de impressão dos componentes posicionados, que influenciam diretamente no comportamento do componente. Com a definição de tamanho

Quadro 3.20: Fluxo de pós-processamento em função da categoria de MA. Fonte: Diegel, Nordin e Motte (2019) com adaptações

Fusão de metal em cama de pó	Fusão de polímero em cama de pó	Extrusão de material	Fotopolimerização	Jateamento de aglutinante
Retirar plataforma de fabricação da máquina	Retirar peças da cama de pó	Retirar peça da plataforma de fabricação	Drenar e reciclar resina não utilizada	Retirar peças da cama de pó
Remover e reciclar pó em excesso	Remover e reciclar pó em excesso	Remover materiais de suporte	Retirar peça da plataforma de fabricação	Reciclar pó de material restante
Alívio de tensão residual	Jatear peça para remoção de pó superficial	Acabamento superficial	Remover materiais de suporte	Jatear peça para remoção de pó superficial
Tratamento com autoclave	Acabamento superficial	Inspeção	Cura em câmara de luz UV	Cura em forno (se necessário)
Remover materiais de suporte	Inspeção		Acabamento superficial	Reforço de peça por infiltração
Tratamento térmico			Inspeção	Acabamento superficial
Acabamento superficial				Inspeção
Inspeção				

de lote é recomendado voltar para a etapa de fabricação e avaliação de produto, pela MA ser um processo intermitente de fabricação, a fabricação de lotes não representa necessariamente a repetição da fabricação unitária e a validação da fabricação de uma peça não necessariamente valida o processo do lote.

A atividade de “definição de especificidades” é inserida na sistemática para realizar a documentação de qualquer especificidade do processo projetado. Considerações comuns de serem documentadas são o tempo de fabricação, gasto total de insumo e indicações de pós-processamento. Por último a atividade de “controle de qualidade” representa o levantamento dos requisitos funcionais e de produto que são passíveis de serem atestados após a fabricação. Atividades comuns para atestar a qualidade incluem testes não-destrutivos, pesagem de peças e até verificação de estrutura interna via ultra-som.

Como última atividade da sistemática existe a documentação dos arquivos de fabricação. Essa documentação precisa ser bem definida levando em consideração a cadeia virtual de fabricação dos processos de MA. Ao longo do processo de projeto diversos arquivos importantes são desenvolvidos, levando em consideração a fabricação de componentes, somente os códigos de máquina, gerados ao final da etapa de análise de processo são suficientes para garantir a repetibilidade do processo, porém, deve-se documentar a geometria em formato CAD para poder realizar comparações entre o modelo fabricado e o projetado, as informações de especificidades para garantir a repetibilidade de todo processo, as informações de controle de qualidade e eventuais decisões de projeto, que garantam uma modificação menos onerosa do projeto, tendo em vista que a flexibilidade de projeto também é uma premissa de utilização da MA.

Capítulo 4

Aplicação de Sistemática para Fabricação por Filamento Fundido

A definição de uma sistemática de projeto voltada para tecnologias de MA é um primeiro passo para possibilitar a utilização da MA na fabricação de produtos de uso final. O objetivo de formalizar etapas de projeto que permitam utilizar das vantagens da MA no desenvolvimento de produtos foi estabelecido com o desenvolvimento da sistemática de DfMA, permitindo utilizar as especificidades e requisitos dos processos de MA desde etapas iniciais do desenvolvimento e garantindo o caráter flexível e iterativo, identificados à partir do levantamento das necessidades da sistemática.

Algumas etapas e atividades da sistemática foram descritas como dependentes do processo de MA selecionado. Para exemplificar como o processo influencia nas atividades e definir uma sistemática completa para desenvolvimento de produtos para ao menos uma tecnologia de MA foi desenvolvida a aplicação para o processo de FFF. Para um projeto voltado para a manufatura por FFF existem parâmetros do processo de fabricação que precisam ser analisados durante a etapa de projeto conceitual, de forma à contornar restrições e características intrínsecas ao processo de fabricação e identificar as especificidades que precisam ser levadas em consideração no desenvolvimento de produtos.

Os processos de otimizações não foram adicionados para proporcionar o caráter didático do processo, otimizações envolvem conhecimentos avançados em programação de algoritmos de seleção e em metodologias de caracterização de peças, sendo o Método de Elementos Finitos com o auxílio de algoritmos de seleção e otimização, a metodologia mais difundido nesse quesito. Como uma das propostas da metodologia é possibilitar o ensino do DFMA em ambiente acadêmico, a utilização de ferramentas complexas de otimização dificultariam o entendimento do processo de projeto, principal foco da presente dissertação. Dessa forma, o processo irá trabalhar com os conceitos da fabricação por FFF apresentados no capítulo 2 e principalmente com guias de projeto publicados na literatura.

Para complementar a sistemática com informações específicas da tecnologia de FFF a primeira atividade foi caracterizar o processo que ocorre durante a fabricação, identificando etapas e transformações. Essa análise permite identificar os parâmetros que influenciam na fabricação e entender as restrições de projeto. Após a caracterização a apresentação de adaptações e conceitos voltadas para a tecnologia de FFF foi sequenciada em função da sistemática de desenvolvimento de produtos desenvolvida.

A tecnologia de FFF é atualmente o processo de MA mais difundido, grande parte do reconhecimento da tecnologia partiu da queda da patente da empresa Stratasys Inc. para o processo de *Fused Deposition Modelling* (FDM) e do projeto de máquinas de prototipagem auto replicantes, desenvolvida por Adrian Bowyer em 2004 e publicado online com licença pública (RE-PRAP, 2020). Desde então, o processo vem sendo amplamente discutido e disseminado através de fóruns de tecnologia e agregou uma numerosa comunidade de entusiastas e desenvolvedores que trabalham continuamente na evolução de maquinários e conceitos. Toda essa disseminação de conhecimento ajudou a baratear os maquinários e recursos para a fabricação, tornando a tecnologia acessível e melhorando a relação de custo-benefício para fabricação de modelos. Por conta dessa popularização da tecnologia e do fácil acesso à recursos para fabricação e validação da sistemática, o processo foi escolhido para ser desenvolvido no presente trabalho.

4.1 Análise do processo de FFF

Processos de fabricação são processos onde a entrada é representada por insumos e energia, e a partir de etapas pré-definidas obtêm-se como resultado um produto. Os processos tradicionais de fabricação por extrusão utilizam matéria-prima granular ou peletizada com uma extrusora do tipo parafuso. Para o processo de FFF as matérias-primas típicas são filamentos de polímero termoplástico amorfo com um diâmetros padrões de 1,75mm e 3 mm (TURNER; STRONG; GOLD, 2014). Atualmente já existem soluções que adotam material peletizado como insumo para máquinas de deposição de material fundido, porém, apesar de possuírem vantagens em relação à utilização de filamentos, não serão tratadas no presente trabalho.

A entrada de energia comum a todas máquinas de FFF é a energia elétrica, utilizada para alimentar os diversos componentes envolvidos no processo. Para identificar as etapas envolvidas, precisamos mitigar o processo e identificar as diferentes transformações que ocorrem. Como etapas macro podemos separar o processo em duas fases, processamento e pós-processamento, e a partir das duas decompor as transformações de matéria envolvidas. A Figura 4.1 ilustra essa primeira etapa de decomposição do processo de FFF.

A fase de processamento envolve a transformação do filamento em uma peça crua, na presente dissertação será apresentado processo de FFF simples, sem tratar de processos com adição de materiais durante a fabricação, como adição de fibras contínuas durante o processo de deposição, ou

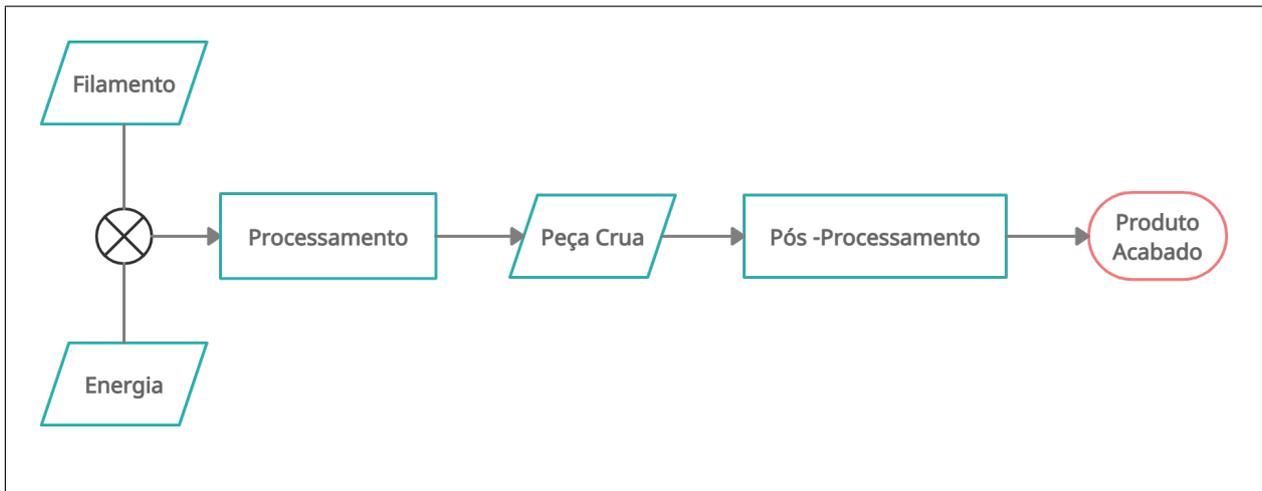


Figura 4.1: Processo de FFF decomposto em etapas macro. Fonte: Autoria Própria

processos com diferentes materiais em uma mesma peça. As variantes do processo representariam etapas adicionadas que não serão tratadas. Para definir a etapa de processamento a mesma lógica de decomposição de processos será utilizada. A Figura 4.2 apresenta a decomposição do processamento em duas etapas.

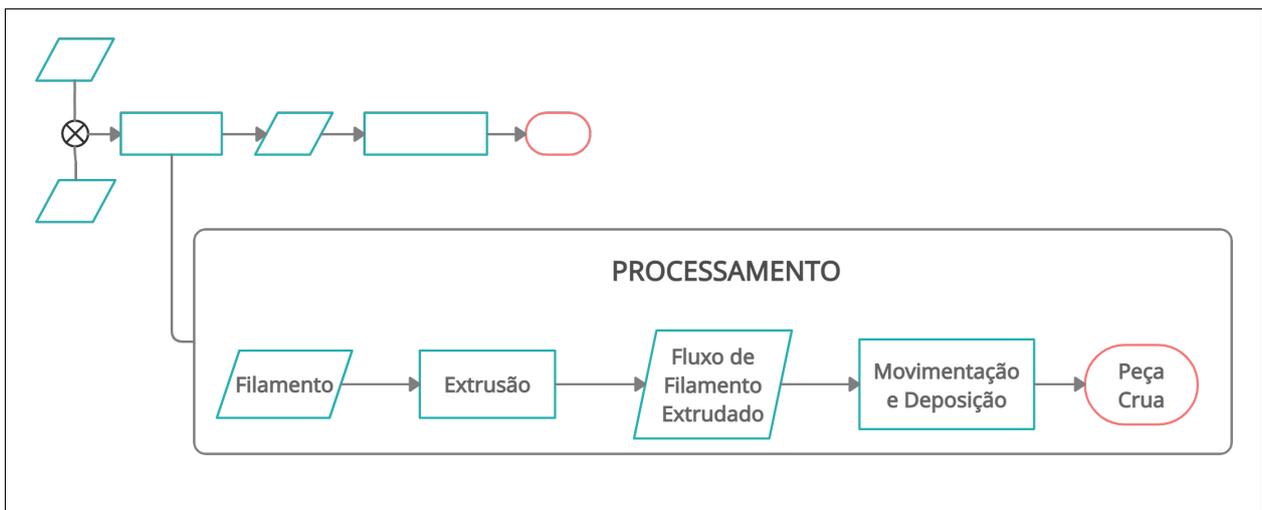


Figura 4.2: Etapa de processamento. Fonte: Autoria Própria

Analisando a Figura 4.2 identifica-se dois processos, extrusão do filamento e movimentação e deposição. Na etapa de extrusão é necessário decompor o processo para identificar transformações de estado que ocorrem no filamento. Na etapa de movimentação e deposição também é necessário dividir a etapa em função do eixo de coordenadas utilizado, tendo em vista que o processo é periódico quando analisado em função de camadas, tendo uma forma de movimentação para concluir cada camada e outra para separar as camadas.

Para definir o processo de extrusão precisamos dividir a etapa em três fases diferentes, (1) alimentação de filamento, (2) aquecimento do filamento e (3) conformação de forma. Durante o processo de fabricação essas etapas ocorrem simultaneamente, constituindo um fluxo. O fila-

mento necessita ser continuamente conformado para alimentar a adição de material no substrato e representar a fabricação aditiva. A decomposição do processo de extrusão é apresentada na Figura 4.3.

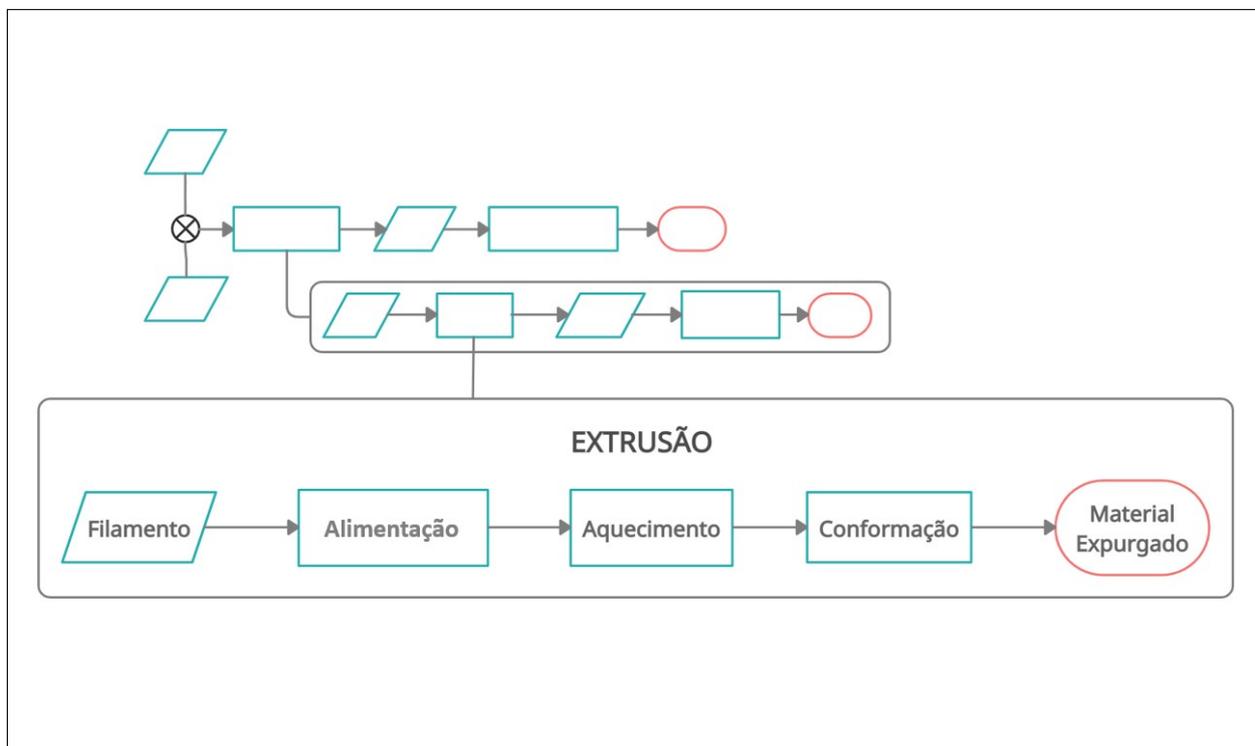


Figura 4.3: Processo de Extrusão. Fonte: Autoria Própria

A partir da decomposição do processo de extrusão, é possível começar a definir sistemas envolvidos no processo de FFF. A etapa de alimentação de filamento é realizada pelo sistema da extrusora da máquina, o aquecimento é realizado no cabeçote de aquecimento e a conformação pelo bico de extrusão. Na literatura é possível encontrar referências que nomeiam como extrusora o conjunto do cabeçote de aquecimento e do sistema de alimentação. No presente trabalho a nomenclatura "extrusora" será denominada somente para o sistema de alimentação. Na decomposição dessas etapas já são introduzidas algumas necessidades do processo, sendo representadas por controle de qualidade do insumo, necessidades energéticas, seleção de componentes e materiais. A Figura 4.4 apresenta a divisão da etapa de alimentação de acordo com as funcionalidades que precisam ser performadas.

Na Figura 4.4 o filamento é substituído por um objeto circular de diâmetro constante, representando a primeira necessidade de controle de qualidade de insumo no processo. Possuir um filamento com controle sobre o diâmetro permite identificar um fluxo controlado de deposição de material fundido ao final do processo de extrusão, variações de diâmetro representariam variações na quantidade de material expurgada pelo bico de extrusão, o que levaria à falhas na peça final. Essas falhas são tratadas como super-extrusão e sub-extrusão, a super-extrusão representando falhas onde a quantidade de material expurgado é acima da programada e sub-extrusão quando a quantidade expurgada é menor que a planejada. Ambas falhas diminuem a resistência e funcio-

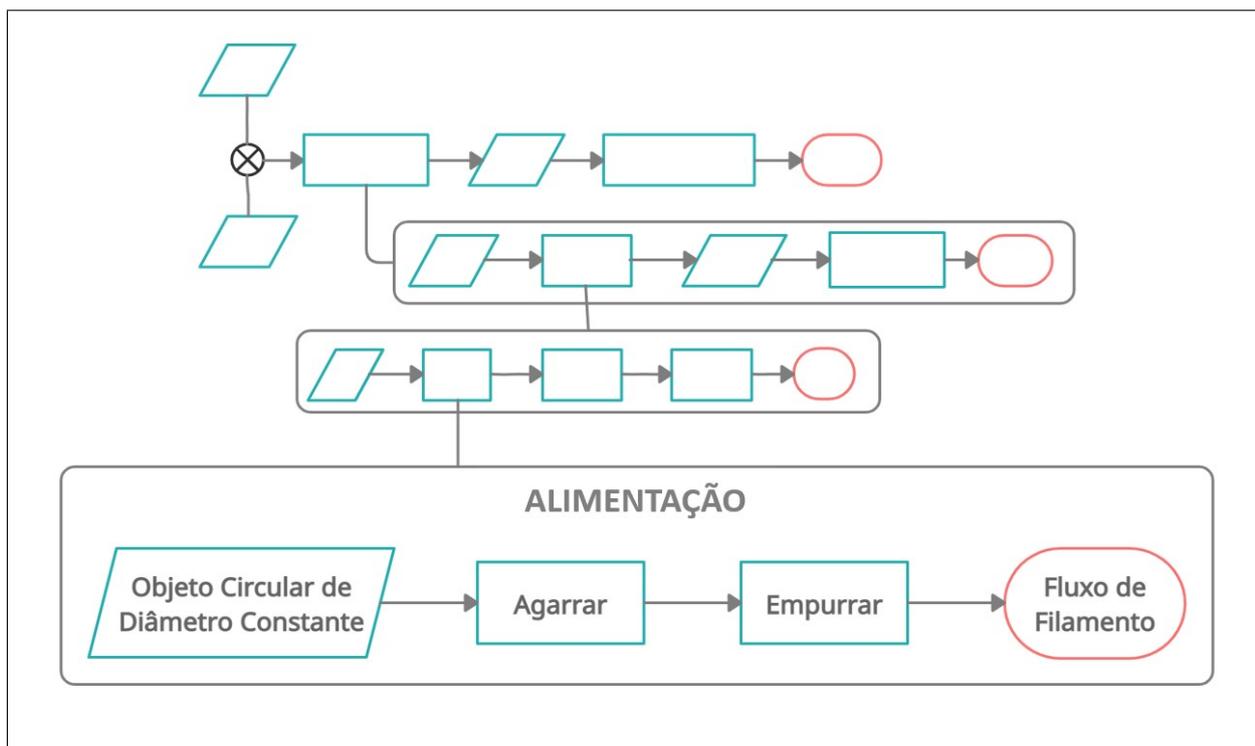


Figura 4.4: Etapa de alimentação de filamento no processo de extrusão. Fonte: Autoria Própria

nalidade da peça final, tendo em vista que geram um ponto ou região de fragilidade da peça.

Na definição da etapa de alimentação de filamento, duas funções necessitam ser realizadas, a primeira trata de agarrar o filamento e a segunda de empurrar. A solução adotada em maquinários de FFF utiliza polias estriadas para realizar as funções de agarrar e empurrar o filamento. A solução mais utilizada comercialmente é representada por um motor de passo, com controle realizado via firmware, uma polia estriada, fixada ao eixo do motor, um elemento de tensão, que força a polia estriada contra o filamento e um batente móvel. Variantes podem ser encontradas em maquinários comerciais, como sistemas de redução para aumentar o torque aplicado pelo motor, polias emborrachadas ao invés de estriadas e a utilização de duas polias estriadas para garantir maior aderência e evitar falhas. Analisando o sistema da extrusora, identifica-se a primeira necessidade energética do processo, sendo a energia convertida para mover o filamento. Na solução apresentada a entrada de energia se limita à operar o motor de passo, tendo em vista que o elemento de tensão geralmente utilizado é representado por molas helicoidais.

Atualmente existem dois tipos de extrusoras adotadas nos maquinários comerciais. A diferenciação entre os modelos é a posição do sistema de alimentação em função do cabeçote de aquecimento. O tipo de extrusora denominado de direto, posiciona o sistema de alimentação acima do cabeçote de extrusão, dessa forma o filamento é alimentado diretamente na região de aquecimento.

O segundo tipo de extrusora é denominado de Bowden, a nomenclatura é herdada do sistema de freios para bicicletas patenteado por Ernest Monnington Bowden em 1897 (Patente inglesa: GB189714402A), onde um cabo de aço desliza por dentro de um tubo para realizar o aciona-

mento das sapatas de freio. Nesse tipo de extrusora, o sistema de alimentação é posicionado em uma região fixa da máquina e após ser empurrado o filamento desloca por um tubo até o cabeçote de aquecimento. Os dois tipos performam a mesma função, porém o sistema do tipo Bowden diminui o peso das partes móveis da máquina e com isso permite um maior controle sobre a movimentação. Como desvantagem, o sistema atribui um menor controle sobre o filamento empurrado, tendo em vista que enquanto percorre o tubo de alimentação o filamento pode sofrer deformações por flambagem.

Como resultado da etapa de alimentação, obtêm-se um fluxo de filamento em estado cru, a partir desse fluxo é necessário aquecer o insumo para posteriormente conformar e concluir a etapa de extrusão. Na etapa de aquecimento o polímero termoplástico é aquecido até a temperatura de processamento. A temperatura de processamento é tipicamente próxima à temperatura de fusão, recomendada para moldagem por injeção. Ao entrar no bloco de aquecimento, o filamento é considerado rígido até atingir sua temperatura de transição vítrea; seu módulo de cisalhamento então diminui significativamente e pode ser tratado como um fluido de diluição de cisalhamento com viscosidade que depende da temperatura e da taxa de cisalhamento. O calor é transferido por condução das paredes aquecidas do aquecedor, cuja temperatura total é controlada usando um sensor de temperatura embutido. Na Figura 4.5 o processo de aquecimento é apresentado.

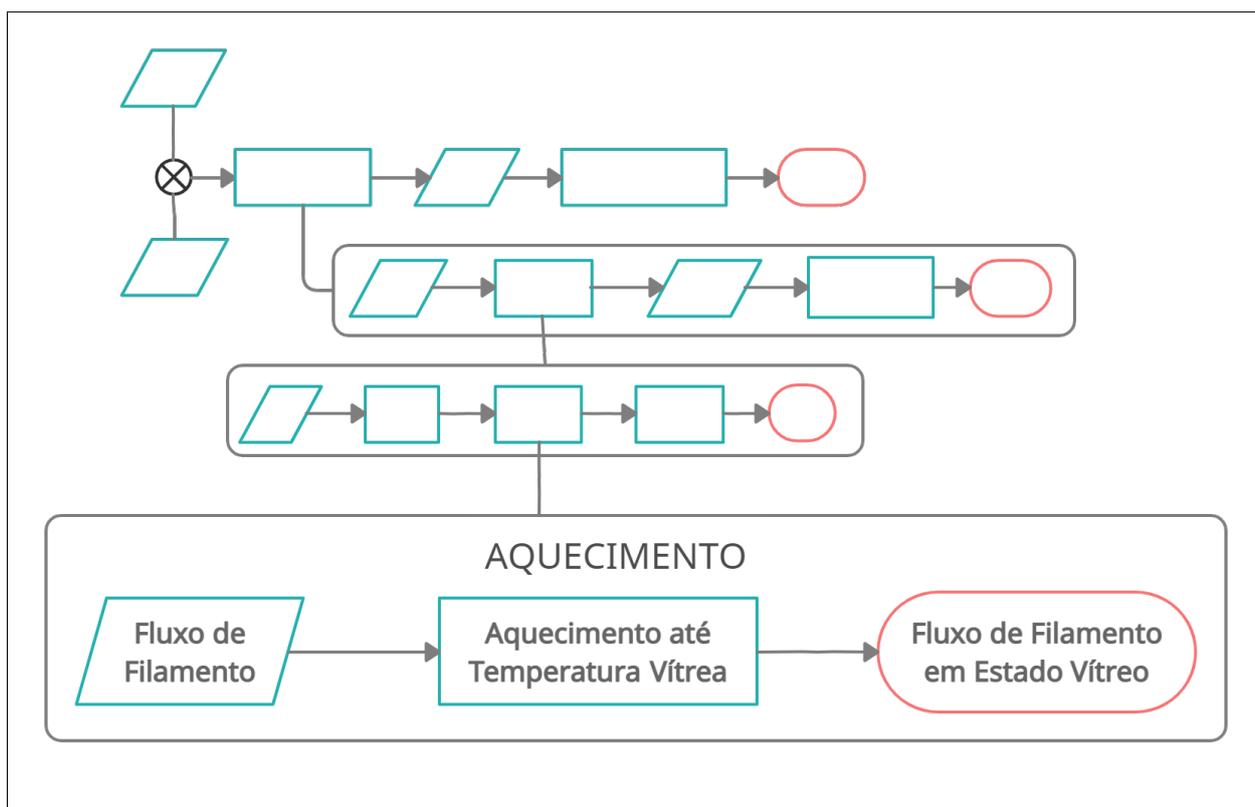


Figura 4.5: Etapa de aquecimento no processo de extrusão. Fonte: Autoria Própria

A geração de calor à partir de energia elétrica é um processo conhecido e com diversas possibilidades de ser performedo. Cronologicamente as soluções passaram por fios de Níquel e Cromo e

passa a ser controlar a movimentação do bico de extrusão para realizar a deposição do material em estado vítreo de forma a coordenada, possibilitando a adição de material para constituir cada camada da geometria projetada. Nesse processo precisamos dividir a movimentação em dois referenciais, um representando a movimentação paralela às camadas (horizontal) e outra perpendicular às mesmas (vertical). A ilustração desse processo é apresentada na Figura 4.7.

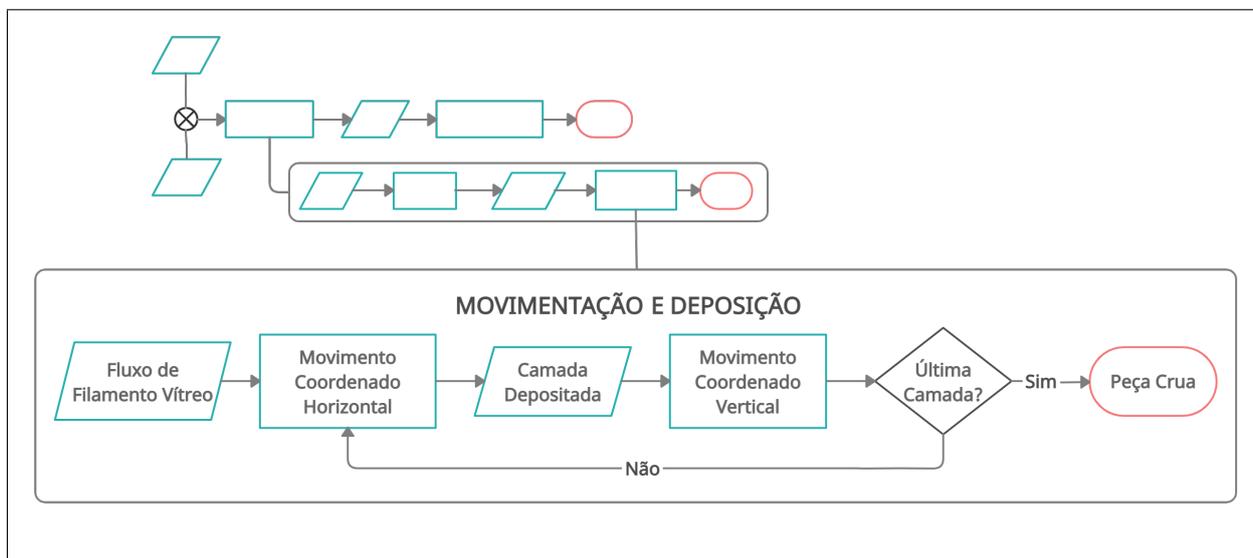


Figura 4.7: Etapa de movimentação e deposição no processamento. Fonte: Autoria Própria

A movimentação horizontal controla a forma que será realizada a deposição de cada camada. Essa movimentação depende de parâmetros de processo para definir a estratégia de preenchimento da camada. A estratégia utilizada influencia diretamente a resistência da peça, o controle dimensional e a estética da peça, tendo em vista que o ponto de início e conclusão de camadas tendem a ser visíveis na peça final. Por ser tratar de um maquinário com controle numérico as soluções adotadas para os mecanismos de movimentação provêm de soluções utilizadas para centros de usinagem. Como as partes móveis de equipamentos de FFF tendem a possuir menor peso e complexidade quando comparados à centros de usinagem as soluções são simplificadas com a utilização de correias e guias menos complexas e consequentemente com menor custo.

A movimentação vertical durante o processo não se limita ao final de cada camada, dependendo do material sendo manipulado existem técnicas que realizam pequenos deslocamentos ao final de cada deposição contínua, de forma a evitar que o material liquefeito escorra do bico durante movimentações livres. Porém, para a descrição do processo a movimentação vertical considerada será relativa à movimentação de magnitude idêntica à espessura da camada que ocorre antes do início da deposição da mesma. Essa etapa do processo não possui grande complexidade, sendo necessário um controle da movimentação para possibilitar deslocamentos com precisões de décimos de milímetros. Durante o processo de deposição da camada o eixo vertical precisa ser mantido estático (salvo em casos com malha de controle para correção de distorções de alturas na plataforma de fabricação) e possui pequenos deslocamentos esporádicos ao final de cada camada, por essa razão o sistema construtivo dos maquinários comerciais utilizam fusos para controlar

a movimentação do eixo vertical. Dentre as máquinas comerciais duas soluções são adotadas. Possuir um grau de liberdade na plataforma de fabricação que movimenta toda mesa na direção vertical ou movimentar o cabeçote de extrusão, as duas soluções apresentam resultados similares.

Para o processo de FFF o pós-processamento possui relação direta com o polímero utilizado como insumo. Como etapa independente, a remoção de suportes, utilizados na fabricação como base para locais em que o material depositado não possui um substrato, é realizada para qualquer insumo selecionado. No processamento os suportes são definidos de forma à facilitar sua remoção, ou de preferência extingui-los, e de maneira geral são removidos facilmente por esforço mecânico, geralmente auxiliado por ferramentas como alicates e limas. Para o processo de acabamento superficial de peças inicia-se a relação com o material de insumo.

4.2 Avaliação por etapas da sistemática

4.2.1 Validação preliminar

Na etapa de validação preliminar a única atividade influenciada pela tecnologia de MA é a seleção das tecnologias passíveis de atenderem aos requisitos de produto. No processo de FFF além de requisitos de fácil avaliação, como dimensões máximas e mínimas da peça, tolerâncias e requisitos de resistência mecânica, a principal característica que deve ser observada na avaliação de viabilidade é relativa à anisotropia de estruturas. Anisotropia é o termo usado para descrever as propriedades de uma peça nas quais as propriedades mecânicas não são as mesmas em todas as direções. Todas tecnologias de MA, possuem certa anisotropia na direção vertical, entre as camadas. Isso ocorre porque a resistência mecânica da ligação entre cada camada pode ser um pouco mais fraca do que a resistência mecânica dentro da própria camada (DIEGEL; NORDIN; MOTTE, 2019). Em algumas tecnologias AM, essa anisotropia pode ser insignificante ou eliminada por meio de pós-processamento, mas no processo de FFF seu efeito deve ser levado em consideração sempre que for realizar o desenvolvimento de algum produto. Para o processo de FFF a resistência na adesão entre camadas é consideravelmente inferior quando comparada com a resistência no plano de deposição, as peças impressas terão resistência à tração sensivelmente maior ao longo do eixo X-Y (horizontal à direção de impressão). A resistência à tração no eixo Z (vertical à direção de impressão) é comparativamente baixa, mas a resistência à compressão do eixo Z é normalmente boa (RUCKLE et al., 2017).

Para auxiliar na etapa de seleção de tecnologia em função dos requisitos e características preliminares do produto algumas das principais características do processo foram listadas no Quadro 4.1 abaixo. Algumas características variam muito com o insumo selecionado para a peça, como caracterização mecânica, resistência à luz UV e acabamento superficial. Para esses valores o recomendado é levantar à partir de ensaios ou contato direto com fornecedores. Por conta da discrepância entre valores obtidos entre fornecedores e principalmente pela diferente caracterização

dos polímeros disponíveis, esses quesitos não irão ser desenvolvidos no presente estudo. Como forma de avaliação de viabilidade os valores apresentados em Tymrak, Kreiger e Pearce (2014) para os polímeros mais difundidos para FFF, PLA e ABS, foram colocados para referência.

Quadro 4.1: Características do processo para definição de viabilidade. Fonte: Diegel, Nordin e Motte (2019) com adaptações

Característica	Valor
Altura de camada	0.1 - 0.75 mm
Precisão	~ 0.1 mm
Tolerância	~ 0.25 mm
Tamanho mínimo de detalhes	~ 1 mm
Angulação máxima de fabricação sem necessidade de suportes	~ 45°
Espessura mínima de parede para aplicações leves	1 mm
Espessura mínima de parede para aplicações industriais	3 mm
Resistência à tração	28.5 MPa (ABS) / 56.6 MPa (PLA)
Módulo de elasticidade	1087 MPa (ABS) / 3368 MPa (PLA)

4.2.2 Projeto para Funcionalidade

NA etapa de projeto para funcionalidade as adaptações relativas ao processo de MA selecionado são relativas à entrada de restrições de processo. Para guiar nessa etapa o Quadro 4.2 foi desenvolvido com as principais restrições observadas na literatura para o processo de FFF. Para facilitar a interpretação das características de projeto, é essencial para o processo de FFF existir alguma previsão da direção de impressão a ser utilizada. A atividade de definição da direção de fabricação é performada apenas na etapa subsequente do desenvolvimento, porém, como o processo de FFF tem a maior influência anisotrópica dentre os processos de MA essa característica é ressaltada desde a etapa de análise de viabilidade. As informações contidas no Quadro 4.1 e na análise de viabilidade também devem ser utilizadas para guiar a etapa de ideação.

Com a manufatura subtrativa convencional, nos esforçamos para que a máquina faça o mínimo de trabalho de corte possível para que, em nosso projeto, deixemos qualquer material que não atrapalhe o funcionamento da peça, pois removê-lo custaria tempo e dinheiro. Com AM, no entanto, é o contrário. Quanto mais material desnecessário houver, mais trabalho o sistema AM terá de fazer, mais tempo demorará a peça e mais custará (DIEGEL; NORDIN; MOTTE, 2019)

Quadro 4.2: Características de projeto para FFF. Fonte: Autoria própria

Característica de projeto	Recomendação
Folga horizontal entre partes com movimentação relativa	~2x altura de camada
Folga vertical entre partes com movimentação relativa	~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 de parede para aplicações leves	1 - 2.5 mm
Espessura de parede para aplicações industriais	3 - 5 mm
Espessura para ribs	75% espessura da parede
Altura para ribs	<3x espessura do rib
Espaçamento de ribs	>2x espessura do rib
Regiões vazias	Desenvolver volumes vazios sempre que possível
Conexão de superfícies	Sempre que possível arredondar cantos da peça

4.2.3 Definições do Processo

Na etapa de definições do processo a tecnologia de MA selecionada afeta a sistemática nas atividades de "Otimizações de DfMA", "Fatiamento" e "Análise DfMA". Por se tratar das principais adaptações em função da tecnologia de MA essa seção será dividida em subtópicos para facilitar a apresentação.

4.2.3.1 Otimizações DfMA

A análise de consolidação de partes foi detalhada na apresentação da sistemática e denotada como a primeira etapa de otimização. Como apresentado, o projeto para MA deve ser elaborado desde as primeiras etapas do desenvolvimento com a consolidação de partes como uma premissa, adicioná-la como uma etapa de otimização é uma redundância proposital, forçando o projetista a reduzir ao máximo a lista de componentes do produto. Após a verificação da possibilidade de consolidar partes e módulos a sistemática avança para otimizações guiadas por softwares de CAE e algoritmos de seleção.

A aplicação do método de elementos finitos (MEF) para dimensionar geometrias fabricadas por FFF é dificultada pelo processo de fabricação influenciar nas características da peça. Como a fabricação por extrusão envolve um processo térmico, o MEF auxilia na predição de distorções da geometria projetada e na definição de tensões residuais provenientes do rápido resfriamento que ocorre durante a fabricação da peça. Conseqüentemente, a exposição do material a grandes variações de temperatura afetam a análise estrutural dos material. Com isso, existem algumas formas de analisar geometrias, sendo inicialmente distintas por apresentar análises estruturais acopladas ou desacopladas da análise do processo de fabricação.

Para simular o processo de deposição de material extrudado vários modelos podem ser observados na literatura, incluindo técnicas de ativação e desativação de elementos, como observado em Zhang e Chou (2006), Stender et al. (2018), Zhang e Chou (2008), reconstrução de peças a partir de códigos de máquina para representar a estrutura de forma fiel, apresentado em Górski et al. (2015) e Krol, Seidel e Zaeh (2013).

As trocas de calor envolvidas no processo são baseadas em condução e convecção térmicas. A condução térmica ocorre entre o material sendo extrudado em estado vítreo e o substrato, representado pela mesa de fabricação na primeira camada e pelo material solidificado nas camadas subsequentes. Como o processo de deposição ocorre de forma semi contínua, o formato do substrato altera com o tempo, tornando a análise onerosa em termos computacionais. A convecção térmica ocorre continuamente entre o ambiente externo e o material extrudado, essa análise depende de características do maquinário, principalmente da existência de carenagens e do controle de temperatura interna. Em termos gerais, os estudos tendem a considerar uma temperatura estável de câmara de fabricação, com ventilação controlada, simplificando a análise, porém ainda mantendo

a dependência da etapa do processo para definir a área de troca de calor.

A característica anisotrópica de peças fabricadas por FFF também dificulta a utilização de métodos de análise computacionais, por possuir relações entre tensões e deformações mais complexas, sendo representadas por um tensor constitutivo mais completo, aumentando o número de variáveis a serem analisadas pelo solver. A metodologia utilizada para simulações estruturais de componentes fabricadas por FFF provém da Teoria Clássica dos Laminados. Essa teoria foi desenvolvida para possibilitar a descrição do comportamento mecânico de materiais compósitos, representados pela heterogeneidade de materiais constituintes, obtendo características mecânicas superiores aos materiais puros. O concreto armado, materiais fabricados a partir de fibras em meio à resinas poliméricas e a madeira são exemplos bem difundidos de materiais compósitos.

Um material laminado é constituído de várias lâminas empilhadas, a descrição do comportamento mecânico de uma única lâmina forma a base com a qual o comportamento mecânico do laminado é descrito, podendo-se assim obter uma formulação matemática que quantifique a rigidez estrutural do laminado. Na teoria dos laminados, cada camada é caracterizada individualmente em função da direção das fibras, para o processo de FFF a direção é determinada pela direção do preenchimento das camadas, sendo esse um parâmetro de processo. (ALMEIDA, 2007)

Em Stender et al. (2018) é apresentado um processo para análise de elementos finitos de peças fabricadas por LENS acoplado com o processo de fabricação, ilustrado na Figura 4.8. No passo a passo apresentado é possível determinar a complexidade necessária para simular o processo. Inicialmente precisa-se definir a ativação de um elemento, que representa o momento em que uma quantidade pré-determinada de material é adicionado à peça. Diversos critérios podem ser utilizados para definir o momento de ativação do elemento, no caso ilustrado, como no processo de LENS o pó metálico é fundido para aderir ao substrato, a temperatura de fusão do material foi utilizado como critério de ativação. Com a definição de elementos ativos e inativos, inicia-se a análise de dissipação térmica, no processo de LENS, apresentado na Figura 4.8 temos trocas de calor por radiação, convecção e condução, passando para o processo de FFF teríamos descartado o processo de condução térmica por radiação, pela diferença de fonte de energia e emissão térmica do material. Com a análise térmica finalizada procedesse para o mapeamento de alteração de propriedades mecânicas causadas pela variação térmica, baseado basicamente no comportamento do material após o stress térmico causado pela adição do material ao substrato. Como últimas etapas do processo temos uma análise estrutural para definir tensões atuantes na geometria e determinar a resistência mecânica da peça.

Para simular a fabricação de uma geometria utilizando a técnica de ativação de elementos, temos que repetir todo esse processo para cada unidade de elemento adicionado à geometria ao longo do tempo, a grandeza do elemento é definida através do processo e o nível de confiabilidade desejado para os resultados. Para o processo de FFF, o tamanho de elemento é geralmente definido pelo volume mínimo de extrusão, onde considera-se o diâmetro do bico, a largura de camada e

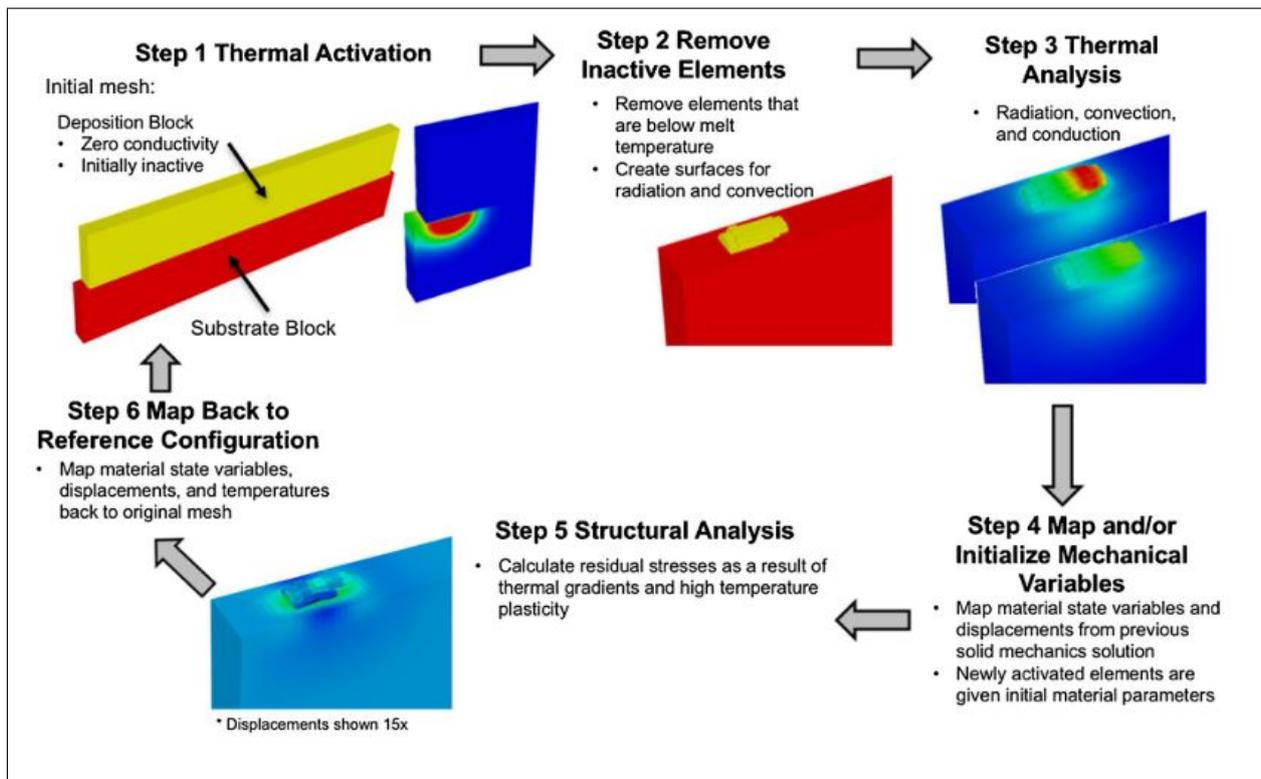


Figura 4.8: Processo para análise por elementos finitos para processo de LENS. Fonte: Stender et al. (2018).

a altura de camada. Ou seja, para uma peça fabricada por FFF com um bico de diâmetro de 0,6mm, largura de camada de 0,72mm e altura de camada de 0,4mm, teremos um elementos com 0,72x0,6x0,4 [mm] ativados à cada unidade de tempo. Essa unidade de tempo também é determinada à partir do processo, definido pelo tempo característico para extrudar a quantidade de material do elemento de ativação.

Na publicação de Górski et al. (2015), uma metodologia de simular a resistência mecânica de peças fabricadas por FFF é obtida através da discretização da geometria da peça a partir de dados de movimentação de máquina retirados de códigos numéricos do padrão ISO 1056. A metodologia se mostra otimista na previsão de deformações e resistência mecânica, mas os erros obtidos na comparação entre o resultado numérico e experimental, principalmente no sentido de descolamento de camadas, demonstram a dificuldade de representar o processo numericamente. A Figura 4.9 ilustra o gráfico de análise de tensão com a tensão resultante sendo calculada pelo método de Von Mises. Com a discretização da peça a partir do código de movimentação de máquina, a fidelidade do modelo é aumentada, porém, o custo computacional é aumentado por consequência. No trabalho de Górski et al. (2015) o tempo computacional para realizar a simulação de um teste de deformação normalizado pela ISO 178 excedeu 100 horas de tempo computacional, valor considerado impraticável em termos de desenvolvimento de produto. Principalmente levando em consideração a geometria simplificada do corpo de prova normatizado.

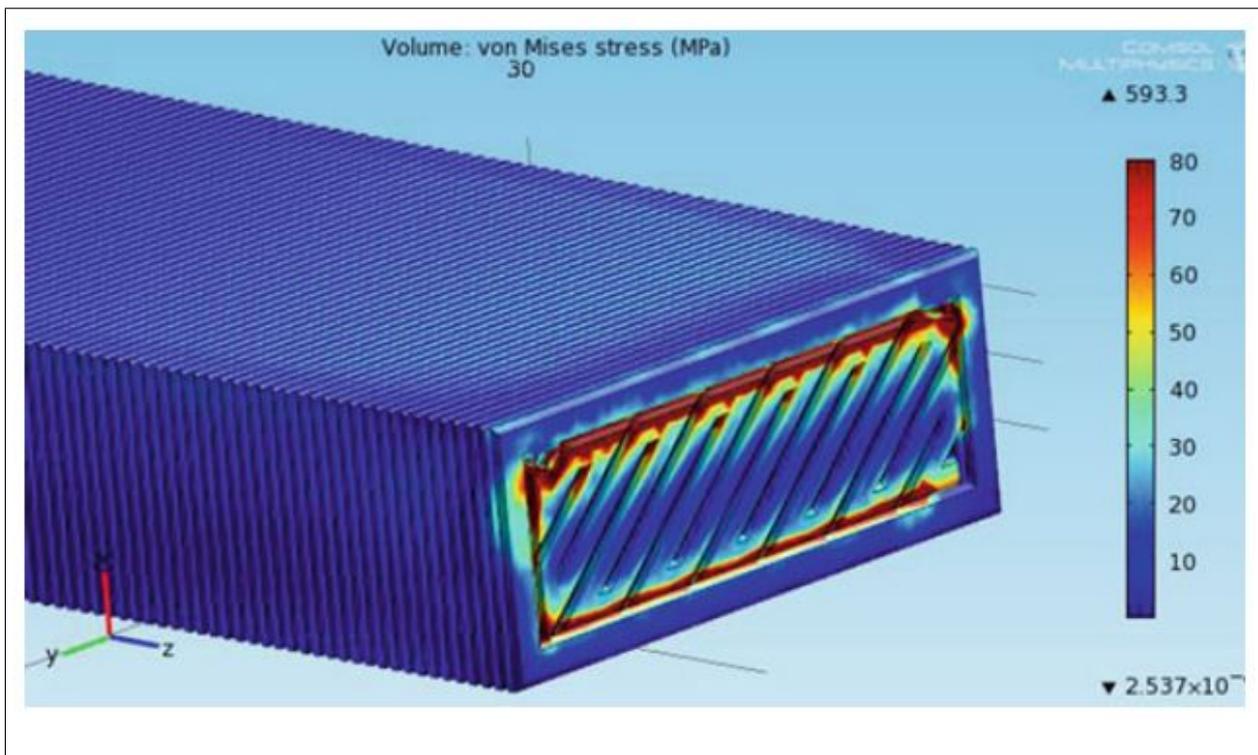


Figura 4.9: Exemplo de ensaio por Elementos Finitos de peça discretizada a partir de trajetórias. Fonte: Górski et al. (2015)

4.2.3.2 Fatiamento

A atividade de fatiamento representa a definição do processo de manufatura da peça, nessa atividade são aplicados os parâmetros do processo que junto com a geometria definem toda fabricação da peça. Para essa atividade duas entradas precisam ser definidas, o compilado de parâmetros do processo e a definição da orientação da geometria durante a fabricação. A direção de fabricação é pensada desde a etapa de verificação da adequação do processo de MA para os requisitos de produto estipulados, especialmente para o processo de FFF, tendo em vista o alto nível de anisotropia observados nas peças. Nessa etapa do desenvolvimento do produto ela é destacada por ser um dos inputs necessários para a atividade de fatiamento.

A seleção de parâmetros depende do software de fatiamento que está sendo utilizado. Pelo fato do processo de FFF ser tão disseminado, diversas técnicas e modificações são desenvolvidas diariamente, através de fóruns de desenvolvedores e entusiastas, e algumas são incorporadas aos softwares para otimizar cada vez mais a fabricação. Portanto, é comum observar o aumento de parâmetros à cada atualização dos softwares. Os softwares que dão maior suporte ao projetista costumam possuir perto de uma centena parâmetros, entre parâmetros de ativação e definição de valor. Os principais conjuntos de parâmetros de controle do processo são identificados no Quadro 4.1, com a descrição da influência na peça a ser fabricada.

É importante possuir perfis de impressão calibrados e salvos para uso geral, perfis são definidos como conjuntos de parâmetros pré-selecionados, definidos em função do material sendo

Tabela 4.1: Principais parâmetros do processo de FFF. Fonte: Autoria própria

Parâmetros	Definição e influência
Diâmetro do bico	O diâmetro do bico de extrusão instalado na máquina. Influencia nas definições principais do processo, como altura de camada (25% a 75% do diâmetro do bico) e largura da extrusão (120% do diâmetro).
Retração	Conjunto de parâmetros que caracterizam o movimento de retração do filamento após completar uma etapa de deposição, parâmetro importante no processo para evitar falhas.
Altura de camada	Representa o passo vertical da máquina no processo de fabricação. Influencia diretamente no aspecto da peça, no tempo de impressão e na rugosidade das superfícies no eixo vertical.
Quantidade de camadas	Determina a quantidade de camadas de base, topo e parede. São parâmetros que influenciam na resistência da peça final, no aspecto das superfícies e na tolerância dimensional.
Primeira camada	A primeira camada de impressão é extrudada diretamente sobre a plataforma de fabricação, dessa forma precisa ter parâmetros próprios para garantir a aderência no substrato.
Preenchimento	Como demonstrado nas metodologias de DfMA a possibilidade de otimizar o preenchimento das peças representa um dos potenciais da MA, dessa forma diversos parâmetros tendem à otimizar seu formato.
Suporte	A definição dos suportes é essencial para a fabricação por FFF, são usados para apoiar recursos da peça que sofreriam deformações por não terem substrato para apoio durante o processo de deposição.
Temperaturas	Os polímeros utilizados nos processo de FFF são sensíveis à variações de temperatura, como na extrusão necessitam estar em estado vítreo é importante controlar esse parâmetro. A temperatura da plataforma de fabricação também influencia no processo de resfriamento do material depositado evitando distorções e favorecendo a aderência entre camadas.
Velocidades	Os parâmetros de velocidade de movimentação são essenciais para o controle do processo, eles influenciam diretamente no fluxo de material sendo extrudado continuamente e no acabamento da peça final.

extrudado, dos requisitos de produto (acabamento, resistência mecânica, rugosidade) e do maquinário. Definir características de peças em função de parâmetros e indicar valores de referência é um processo que depende do maquinário utilizado, do software de fatiamento e das estratégias de produção.

Com os parâmetros selecionados, a geometria da peça definida e a definição de direção de impressão a atividade de fatiamento é performada, dividindo a geometria em várias camadas, com espessura controlada por parâmetro, e traduzindo as movimentações e deposições necessárias para a geração de formas para a linguagem de programação do maquinário utilizado.

4.2.3.3 Análise DfMA

A atividade de análise DfMA foi adicionada à sistemática como ferramenta para prever possíveis falhas e ajustar os parâmetros do processo ou a geometria da peça. Para o processo de FFF as principais falhas possíveis de serem identificadas são referentes à suportes. Na visualização é possível verificar se existem partes da peça sendo depositadas sem substrato e verificar a necessidade de suportes. Na Figuras 4.10 e 4.11 é ilustrada a percepção de recursos da peça sendo depositados sem substrato, o que causaria falhas e distorções na peça final.

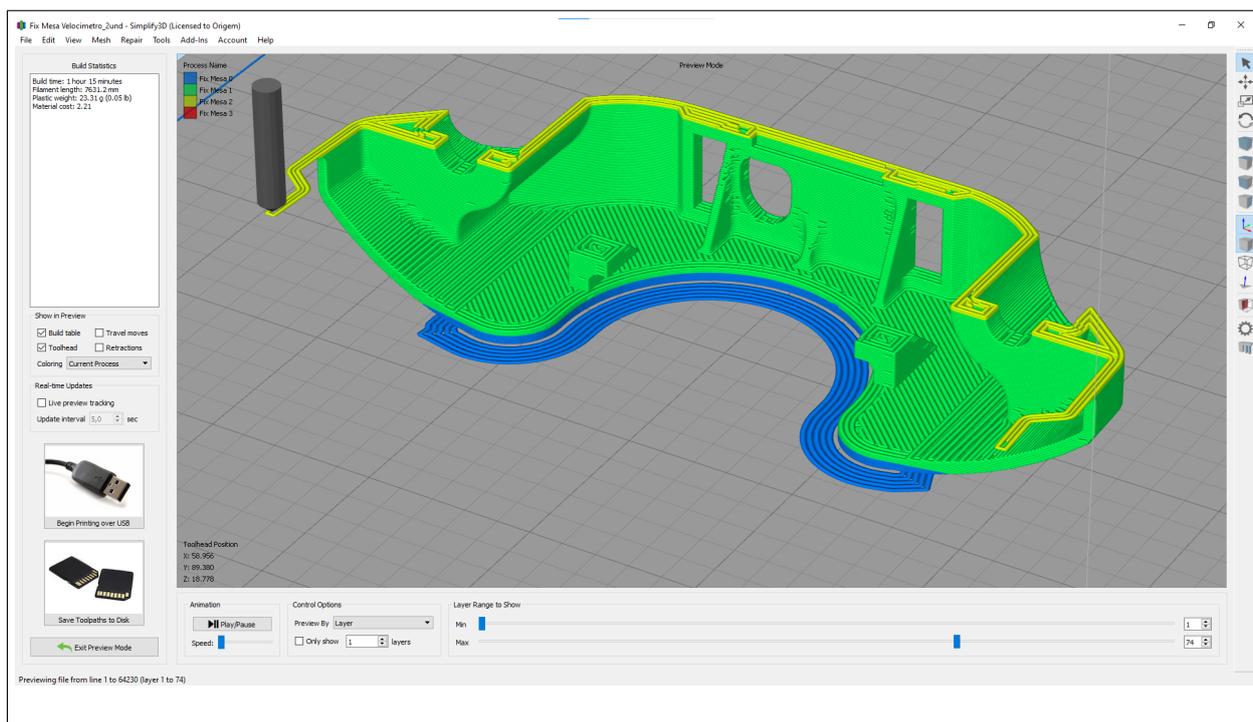


Figura 4.10: Visualização de processo sem suportes. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos Ltda

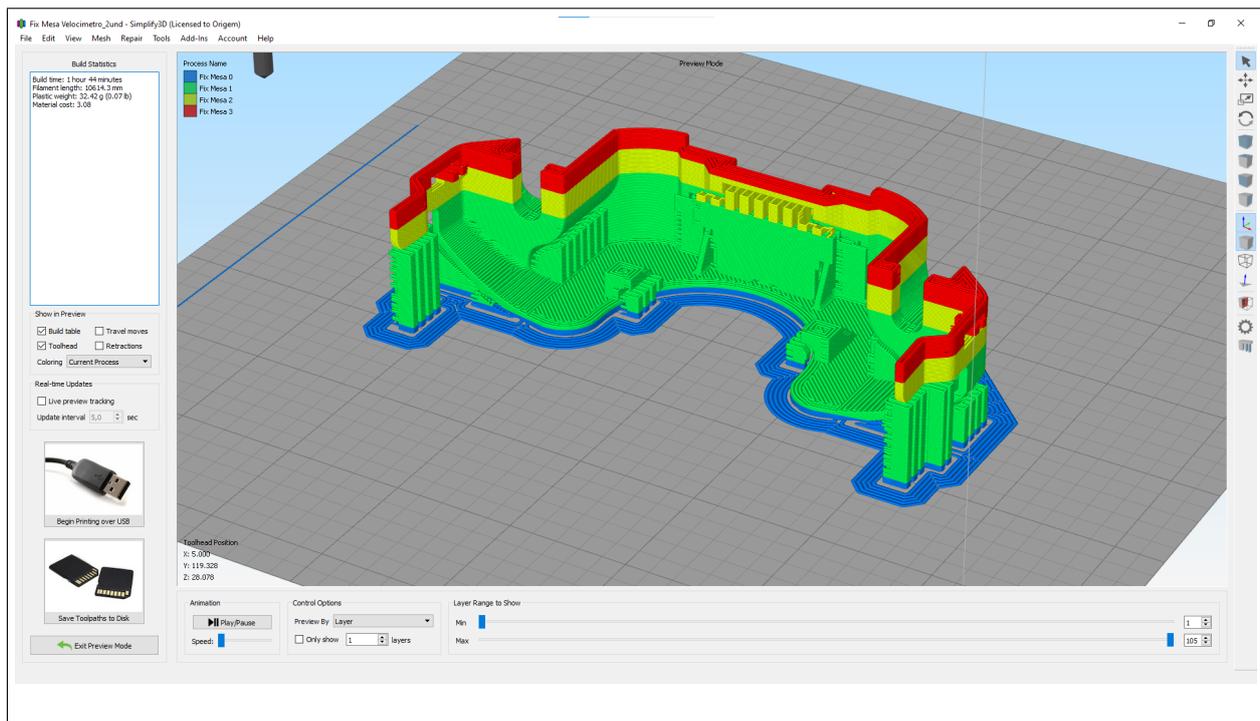


Figura 4.11: Visualização de processo com suportes. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos Ltda

4.2.4 Fabricação e Avaliação de Produto

A etapa de fabricação e avaliação de produto envolve a fabricação de ao menos uma unidade para validar o processo desenhado na etapa anterior. Como adaptação ao processo de FFF temos inicialmente a etapa de fabricação, depois o pós-processamento específico para peças fabricadas por extrusão de filamento e posteriormente a revisão caso a peça não seja validada.

Na atividade de fabricação o processo de FFF necessita de algumas preparações de máquina e insumo, sempre dependendo do insumo selecionado. Na preparação existem materiais que necessitam do aquecimento da plataforma de fabricação, principalmente materiais que apresentam níveis maiores de deformação por ciclo térmico, como o ABS e o PETG, esse aquecimento prévio permite uma maior aderência da primeira camada à plataforma e mantém o material já depositado à uma temperatura mais próxima do material sendo extrudado, diminuindo o gradiente de temperatura e reduzindo o efeito de empenamentos e distorções de peça durante o resfriamento. Atualmente são desenvolvidos diversos produtos que ajudam na aderência da primeira camada à mesa, sua necessidade vai depender das características da peça e novamente do insumo selecionado.

Outro fator importante de ser avaliado antes do início da fabricação é a necessidade de retirada de umidade do insumo, alguns polímeros utilizados no processo de FFF como o PETG e o Nylon são altamente higroscópicos, ou seja, capazes de absorver a umidade presente no ambiente. Esse fenômeno aumenta a quantidade de água no material e causa falhas durante a extrusão, devido à

evaporação dessa umidade durante o processo de extrusão de material vítreo.

A calibração de máquina também é um fator importante para a fabricação, porém não será tratado no presente estudo por se tratar de cuidados específicos com maquinário e a sistemática possuir enfoque no desenvolvimento de produtos. Durante a fabricação o processo não necessita de acompanhamento. Á partir do momento que todas preparações foram realizadas é necessário abastecer o maquinário com o insumo e aguardar o processo de deposição seriada até a conclusão da geometria da peça. Falhas durante o processo podem ocorrer, as falhas relacionadas à seleção de parâmetros serão avaliados na etapa de revisão DfMA, que trata da análise de falhas e possíveis alterações de parâmetros. Por ser uma análise muito específica e com caráter empírico, somente fontes de resolução serão apresentadas, com guias de fabricantes e desenvolvedores de softwares de fatiamento, o Quadro 4.3 apresenta algumas fontes confiáveis para análise de falhas.

Quadro 4.3: Referências de guias para resolução de problemas de fabricação por FFF. Fonte: Autoria própria

Autores	Descrição	Acesso
Simplify3D	Empresa responsável pelo desenvolvimento de um dos principais softwares de fatiamento	Site da companhia
All3DP	Primeira revista dedicada à Manufatura Aditiva voltada para iniciantes e profissionais	Site da revista
Rigid.ink	Fabricante de insumos para FFF estabelecida na Inglaterra	Site da companhia
MatterHackers	Uma das principais fornecedora de serviços de manufatura aditiva, atuando desde venda de maquinários e insumos até serviços de consultoria	Site da companhia
RepRap	Repositório público de projetos e discussões sobre manufatura aditiva com enfoque no projeto de máquinas autorreplicadoras de FFF	Site do repositório

Como apresentado no Quadro 3.20 o processo de FFF possui como pós-processamento ao menos duas etapas, remover suportes e acabamento superficial. Para a geração de suportes três técnicas podem ser utilizadas (DIEGEL; NORDIN; MOTTE, 2019):

- Material de suporte igual ao de peça, porém com parâmetros diferentes, deixando-os fácil de remover por esforço mecânico;
- Material de suporte com material diferente, com baixa interação entre o suporte e a peça, utilizando materiais mais baratos para geração de suportes e assim reduzindo custos. Também removido via esforço mecânico;

- Material solúvel para geração de suportes. Alguns materiais disponíveis para o processo de FFF podem ser dissolvidos em solventes específicos ou até em água (PVA).

As estratégias de imprimir os suportes com materiais diferentes são comuns nas aplicações industriais, para aplicações de menor valor agregado sua utilização é menos difundida por necessitar de maquinários com ao menos cabeçotes de extrusão e materiais mais difíceis de encontrar, para o caso de suportes solúveis.

Para o tratamento de superfícies existe a dependência direta do insumo selecionado, a utilização de lixas e vibro acabamento (tamboreamento) são aplicáveis para todos insumos, com dificuldade variada, como por exemplo a utilização de lixas para acabamento de PLA é um processo mais complexo pela baixa temperatura de amolecimento do material e também baixa dureza, deixando o material emplastado na lixa durante o processo.

Alguns polímeros para FFF possibilitam o acabamento superficial com a utilização de vapor de solvente, como o ABS com a utilização de vapor de propanona (CH_3COCH_3), conhecida popularmente por Acetona. Vale ressaltar que todos solventes utilizados para polímeros apresentam níveis de toxicidade, inclusive a acetona, que deve ser utilizada na forma pura para obter resultados aceitáveis no tratamento de superfícies. Alguns solventes que podem ser utilizados dependendo do material são o clorofórmio, diclorometano, tetraidrofurano e Metil-Etil-Cetona (MEK).

Capítulo 5

Estudo de Caso

Para analisar a aplicabilidade da sistemática em cenário real foi desenvolvido um estudo de caso na empresa Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos Ltda. A Origem é uma empresa de desenvolvimento de soluções elétricas de mobilidade urbana, que realiza o projeto e fabricação dos produtos e opera no sistema de locação de veículos. Para o estudo de caso foi analisado o desenvolvimento de componentes para um modelo de motocicleta elétrica em desenvolvimento.

Todo processo de desenvolvimento é realizado dentro da própria empresa desde projeto, desenvolvimento de arquivos de fabricação e a manufatura. A empresa utiliza o processo de FFF para fabricação de protótipos, possuindo uma área de fabricação no parque de operações fabris.

O estudo de caso analisou o processo de FFF para fabricação de peças funcionais utilizadas no lote piloto, responsável pelas etapas de homologação e início de operação. O desenvolvimento dos produtos foi realizado em parceria com a equipe de desenvolvimento da empresa. Na parceria, a equipe de desenvolvimento da empresa, se dispôs à seguir a sistemática para o desenvolvimento de componentes, buscando validar as atividades propostas e verificar a utilização.

Para cada componente selecionado foi realizado o desenvolvimento utilizando a sistemática de desenvolvimento de produtos voltados para MA como base para o projeto. Pela complexidade do produto em desenvolvimento, cada componente desenvolvido foi tratado como um produto de uso final, com um processo de desenvolvimento completo, analisando as etapas de desenvolvimento, fabricação e montagem.

A estratégia de produção para os componentes foi desenvolvida tendo em vista a fabricação de um lote piloto com objetivo de fabricação de 50 unidades de motocicletas em um período de 3 meses. Dessa forma o cálculo de produtividade foi ajustado para uma unidade do produto à cada dia. A análise de produtividade dos componentes não levou em consideração a capacidade fabril da empresa, sendo cada componente tratado de forma independente sem considerar logísticas de disponibilidade de máquina, capacidade de montagem e estoque. Dessa forma os requisitos de produção se resumem à fabricação da quantidade de componentes necessários para montagem de

Tabela 5.1: Tabela de Propriedades dos Insumos

Propriedade	PLA 1	PLA 2	ABS	PETG	Retardante de chamas
Resistência á tração [MPa]	144,8	26,5	42,2	28,0	42,7
Alongamento na Ruptura [%]	160	56	30	130	22
Módulo de Flexão [Mpa]	3861,0	2650	2451,7	2160	2255,5
Dureza [R]	-	-	107	106	104
Resistência ao Impacto IZOD [J/m]	0,3	0,3	2,55	4,5	2,4

uma moto à cada 24 horas.

Na apresentação do estudo de caso cada etapa da sistemática foi separada em um tópico, identificando o fluxo de desenvolvimento. Para o estudo os componentes selecionadas foram:

- Envólucro de bateria;
- Sistema de fixação de linha de freio;
- Envólucros de Placas de Circuito Impresso (PCB's).

Para facilitar o acesso à insumos e reduzir a complexidade de estocagem, uma premissa adotada pelo estudo de caso foi a utilização de um material único para desenvolvimento dos componentes. Para o estudo os materiais disponíveis são apresentados na Tabela 5.1, com a caracterização fornecida pelo fornecedor.

O veículo selecionado para o estudo é de uso urbano, ficará sujeito à ação de raios solares durante o uso. Dentre os polímeros apresentados o que possui melhor resistência à degradação por luz UV é o PETG. Limitado no estudo à cor preta.

5.1 Envólucro para bateria

O envólucro da bateria da motocicleta foi o primeiro componente analisado sob a ótica da sistemática. O componente possui como função principal envolver o conjunto de células de bateria desenvolvido para a moto, junto com uma placa de controle das células, responsável por controlar a descarga de cada célula e proteger o conjunto de distúrbios de funcionamento. O envólucro ainda possui a função de abarcar os dispositivos de conexão da bateria, realizando o processo de alinhamento e conexão com o conector da motocicleta.

5.1.1 Análise de Viabilidade

A primeira atividade da etapa de análise de viabilidade é a definição do problema. Para o componente o problema que ele deve solucionar é proteger as células e o sistema de controle contra impactos e intempéries externas. As estimativas preliminares de projeto e produção foram:

- Fabricação de um envólucro completo no prazo máximo de 24h;
- Processo de fabricação flexível para abarcar alterações do sistema de controle e do modelo de células;
- Abarcar o sistema de conexão da bateria com a moto;
- Suportar as temperaturas de trabalho das células de bateria;
- Possuir resistência mecânica suficiente para suportar o peso do conjunto de células.

Analisando as estimativas preliminares a primeira tomada de decisão deve ser realizada. Dos potenciais da MA descritos no Quadro 3.18, a complexidade de estruturas internas, a integração funcional e a presença de superfícies funcionais foram identificadas no componente. A complexidade de estruturas internas e a integração funcional foram observadas pela necessidade de incorporar o sistema de conexão da bateria ao envólucro. A presença de superfícies funcionais pela necessidade de realizar o alinhamento da bateria durante a inserção da mesma na motocicleta. Além das oportunidades descritas, a baixa tiragem e a flexibilidade necessária para o projeto também aproveitam das vantagens oferecidas pela MA. A flexibilidade é necessária por conta do rápido e contínuo desenvolvimento no mercado de células de baterias. Como a autonomia do veículo possui relação direta com a capacidade das células, a atualização do modelo é sempre avaliada com o lançamento de células com maior capacidade.

Após comprovar a presença de potenciais da MA o processo de levantamento de requisitos de produto teve como resultado os requisitos:

- Suportar o peso do conjunto de células e do sistema de controle (aproximadamente 11 kg);
- Suportar a temperatura de trabalho das células (40°C);
- Proporcionar a vedação completa do conjunto de baterias;
- Fixar os terminais fêmeas de conexão;
- Possuir recurso para pegar e levantar o componente que sejam confortáveis para o usuário;
- Permitir o alinhamento dos conectores sem interferência do usuário;
- Possuir resistência à ação de luz UV natural.

5.1.2 Projeto para funcionalidade

A primeira atividade necessária para a etapa de projeto para funcionalidade é realizar a análise funcional do produto, para o envólucro da bateria a análise é ilustrada na Figura 5.1.

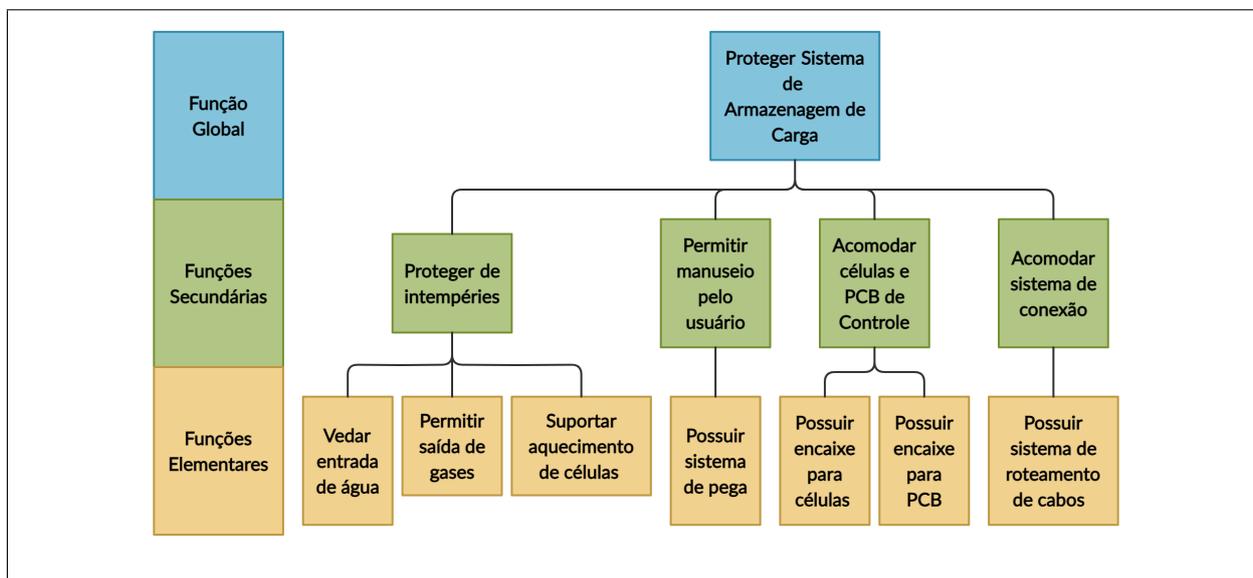


Figura 5.1: Análise funcional do envólucro de bateria. Fonte: Autoria Própria

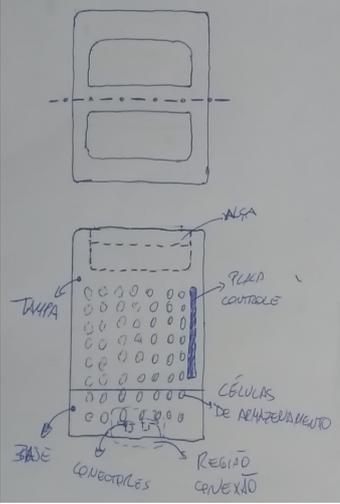
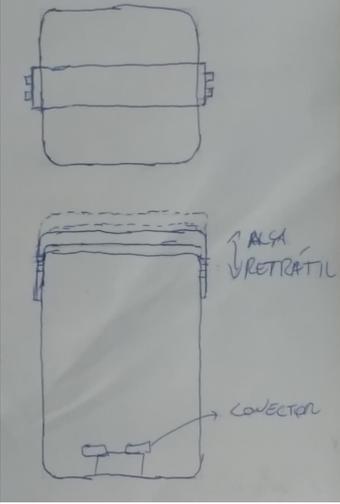
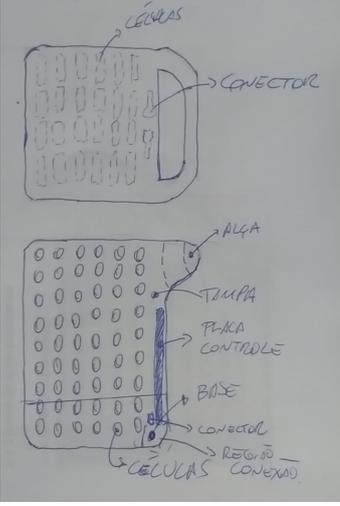
A análise funcional é um dado de entrada na sistemática para realizar a etapa de ideação, a entrada de restrições de processo foi definida no capítulo de aplicação da sistemática para o processo de FFF. Os esboços realizados para o envólucro de bateria na atividade de ideação estão listados no Quadro 5.2. As características dos componentes do sistema de armazenamento são meras representações, a real representação do sistema não foi liberada para divulgação.

A seleção do conceito partiu das premissas de menor volume de empacotamento, permitindo que a motocicleta possua uma região de fixação da bateria com as menores dimensões possíveis, obtendo um produto mais compacto. Levando em consideração o processo de FFF, o menor volume também representa vantagens, tendo em vista que é possível fabricar o componente em maquinários de menor dimensão e o gasto de material tende a ser inferior, auxiliando na análise de viabilidade econômica e reduzindo o tempo de fabricação. Considerando o processo de FFF, que possui características anisotrópicas intrínseca as peça na peças fabricadas, o terceiro conceito apresenta uma melhor distribuição de esforços, tanto no movimento de suspender a bateria quanto durante movimentações. Tendo em vista que a peça fica "tombada" pelo posicionamento da haste. Dessa forma o terceiro conceito foi selecionado.

As superfícies funcionais identificadas no invólucro são representadas pela superfície de pega da alça de suspensão da peça, os recursos das paredes internas que são responsáveis por travar a movimentação dos sistema de armazenamento e as superfícies que compõem a região de fixação dos conectores. O modelo virtual da peça é ilustrada na Figura 5.2.

Com o desenvolvimento da modelagem em software de CAD inicia-se a cadeia virtual de

Tabela 5.2: Conceitos para envólucro de bateria

Conceito	Descrição
	<p>Baseado em uma pesquisa de benchmarking e nas características dos componentes do conjunto de armazenamento de energia. O produto é dividido em duas partes, uma tampa e uma base, a alça é composta pelo mesmo material e deve ser impressa junto com a parte superior, recursos internos são responsáveis por travar as células e a placa de controle. A conexão da bateria foi desenvolvida utilizando a fixação dos conectores selecionados pela empresa através de elementos de fixação do tipo "snap-fit".</p>
	<p>O segundo conceito proposto possui a região interna similar ao primeiro. Como principal distinção do primeiro modelo foi desenvolvido um sistema diferente de alça, que permite reduzir as dimensões do produto e otimizar o posicionamento das baterias e do conector.</p>
	<p>O terceiro conceito foi pensado de forma a reduzir ao máximo as dimensões de empacotamento do produto. Para isso a alça foi posicionada na diagonal do componente, permitindo preencher todo volume interno com as células de carga e a placa de controle, sem penalizar o conforto do usuário ao suspender o produto.</p>

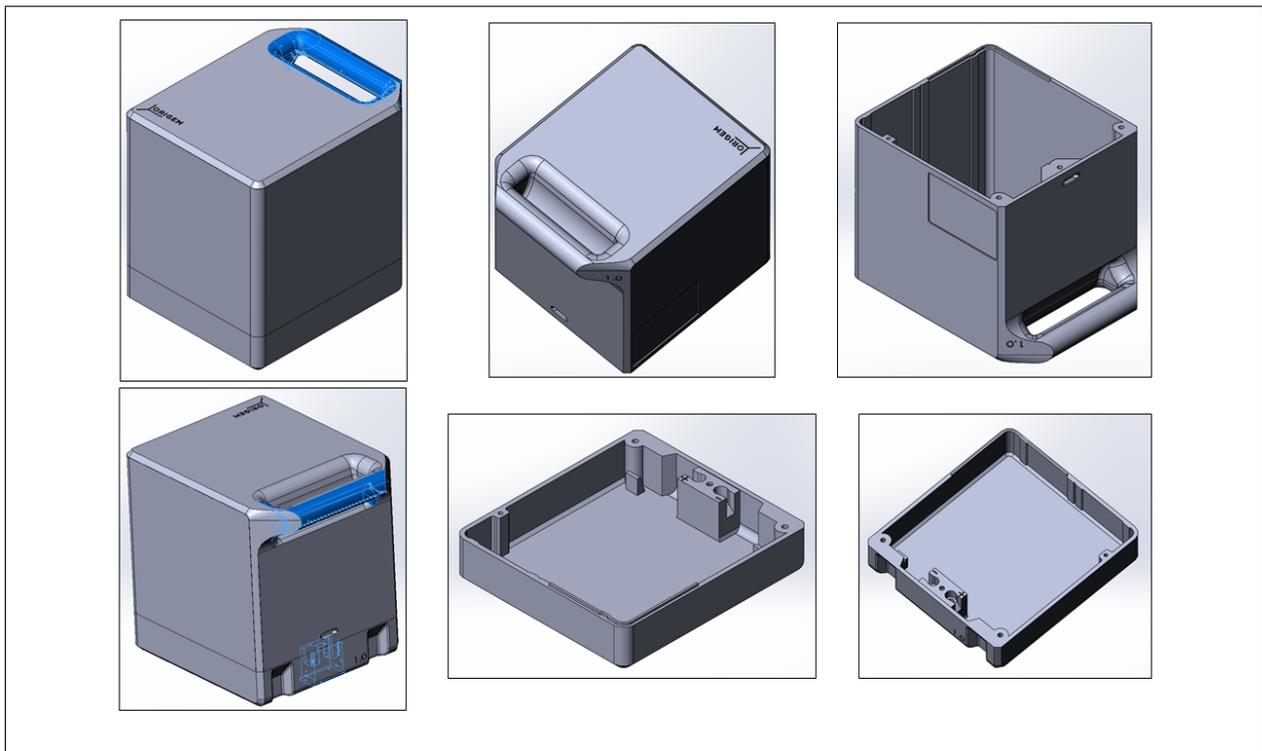


Figura 5.2: CAD de case de bateria. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos LTDA.

desenvolvimento do produto, como descrito anteriormente, otimizações envolvendo algoritmos e metodologias de CAE não serão abarcadas nesse estudo. Para otimizar a geometria em função do processo de FFF foram utilizados guias de projeto, apresentados na bibliografia. As alterações estão ilustradas na Figura 5.3. Na Figura 5.3(a) são ilustrados os recursos utilizados para o fechamento do invólucro, na modelagem original as torres possuíam ângulos retos em sua extremidade, para otimizar a fabricação foram adicionados chanfros de 45° nas extremidades, permitindo a fabricação sem a utilização de suportes, sem realizar penalizações no funcionamento do fechamento e economizando material de suporte e tempo de pós-processamento. Na Figura 5.3(b) é possível visualizar que a alça da bateria possui todas regiões de encontro de superfícies com a presença de filetes, tornando a peça esteticamente mais agradável, reduzindo a concentração de tensões e auxiliando no caminho de deposição, tendo em vista que cantos vivos representariam quebra de movimentação e maior complexidade de processamento e movimentação para a máquina. Além disso, as faces paralelas à plataforma de fabricação reduzem a necessidade de suportes quando são filetadas. Outro aspecto que pode ser visualizado na Figura 5.3(b) e 5.3(c) é a marcação de versionamento, pela flexibilidade do processo, as peças podem ser versionadas para facilitar a identificação posterior. A Figura 5.3(c) também ilustra outro exemplo de superfície que foi chanfrada em 45° para retirar a necessidade de suportes e ainda marcações de polaridade na bateria, aumentando a confiabilidade do processo de montagem por representar um indicativo visual para montagem.

Além dos detalhes indicados na Figura 5.3, os guias de projeto apresentados nos Quadros 4.1

e 4.2 foram aplicados para determinação de folgas e tolerâncias e recursos do componente.

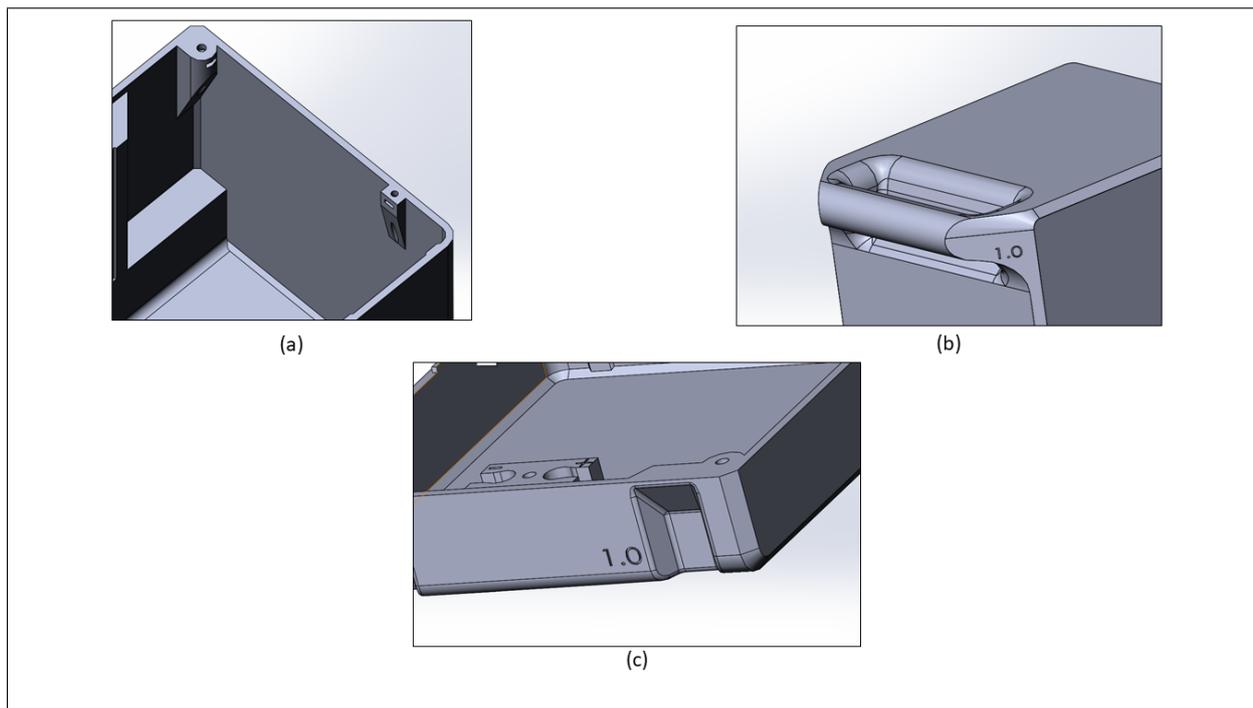


Figura 5.3: Otimizações do envólucro de bateria baseado no processo de FFF. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos LTDA.

5.1.3 Definições do Processo

O envólucro da bateria é dividido em duas partes, denominadas de base e tampa, como ilustrado na Tabela 5.2. Para seguir com a sistemática de desenvolvimento o próximo passo é realizar o fatiamento dos dois componentes. A seleção de parâmetros é dependente do material, de forma generalizada, os parâmetros são disponibilizados pelo fabricante do insumo, porém, sempre é importante validar e calibrar esses parâmetros em função do maquinário utilizado. Para os estudos de caso os parâmetros não serão expostos ou calibrados, parte-se do princípio que, por se tratar de um ambiente fabril, existem parâmetros voltados para os maquinários disponíveis previamente testados e otimizados.

A orientação de cada componente foi decidida buscando reduzir a quantidade de suportes necessário para a impressão. Dessa forma, os componentes foram posicionados com a parte plana e preenchida voltada para a mesa, necessitando de suportes somente para a deposição de detalhes, em sua maioria internos. Como descrito por (DIEGEL; NORDIN; MOTTE, 2019), a fabricação de grandes superfícies planas tende a apresentar maior empenamento na peça, porém, à partir de técnicas para aumentar a adesão da peça na mesa esse fenômeno pode ser diminuído e para as peças em questão, o gasto com suportes seria muito elevado e aumentaria consideravelmente o tempo de impressão. Com os parâmetros e a orientação da peça definidos o fatiamento pôde ser

realizado e à partir da visualização do processo a análise de DfMA performada. As visualizações dos processos já com a revisão da atividade de análise DfMA são ilustradas na Figura 5.4, os detalhes ajustados são apresentados na Figura 5.5.

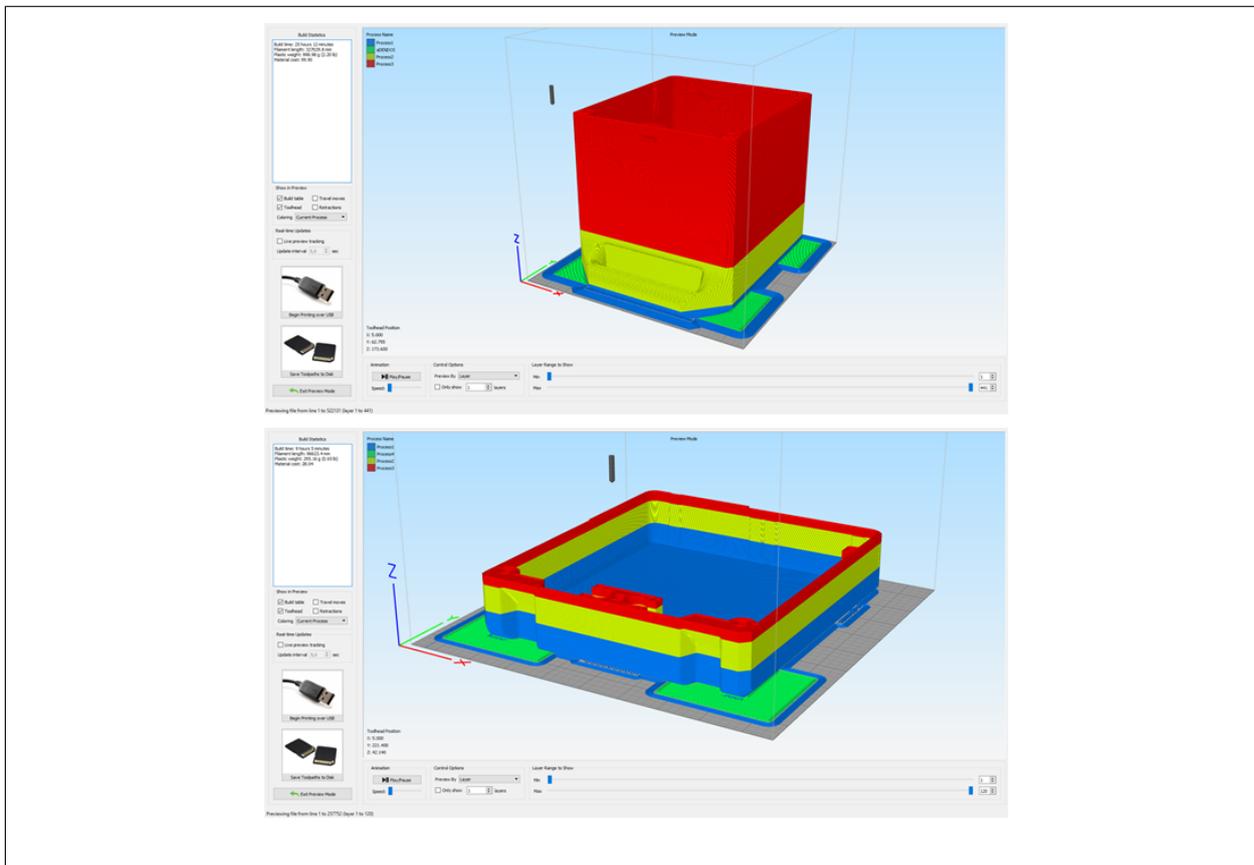


Figura 5.4: Visualização de processos de fabricação para envólucro de bateria. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motocicletas LTDA.

Na Figura 5.5(a) foi necessário adicionar uma película para aumentar a região de aderência da peça à mesa, é possível visualizar que é uma região complexa de ser fabricada, tendo em vista os filetes nas extremidades da peça, a película garante a aderência da extremidade da peça e é de fácil remoção no pós-processamento. Na Figura 5.5(b) foi realizada uma alteração da porcentagem do preenchimento da peça, para otimizar o tempo de fabricação e reduzir o consumo de material. Na Figura 5.5(c) é possível visualizar a alteração na altura de camada, técnica também utilizada para reduzir o tempo de fabricação, para essa aplicação é necessário observar a complexidade da região onde a altura de camada é aumentada. Esse artifício tende a reduzir a tolerância da peça fabricada. A Figura 5.5(d) ilustra o processo oposto ao apresentado em 5.5 (c), reduzindo a altura de camada para fabricação da região logo acima dos suportes, por ser uma superfície funcional.

Após a definição do processo, a geração do código de máquina é simples, como é possível observar na Figura 5.4, o software possui uma função de envio automático para o maquinário ou de salvar o código para ser carregado na máquina via mídia removível.

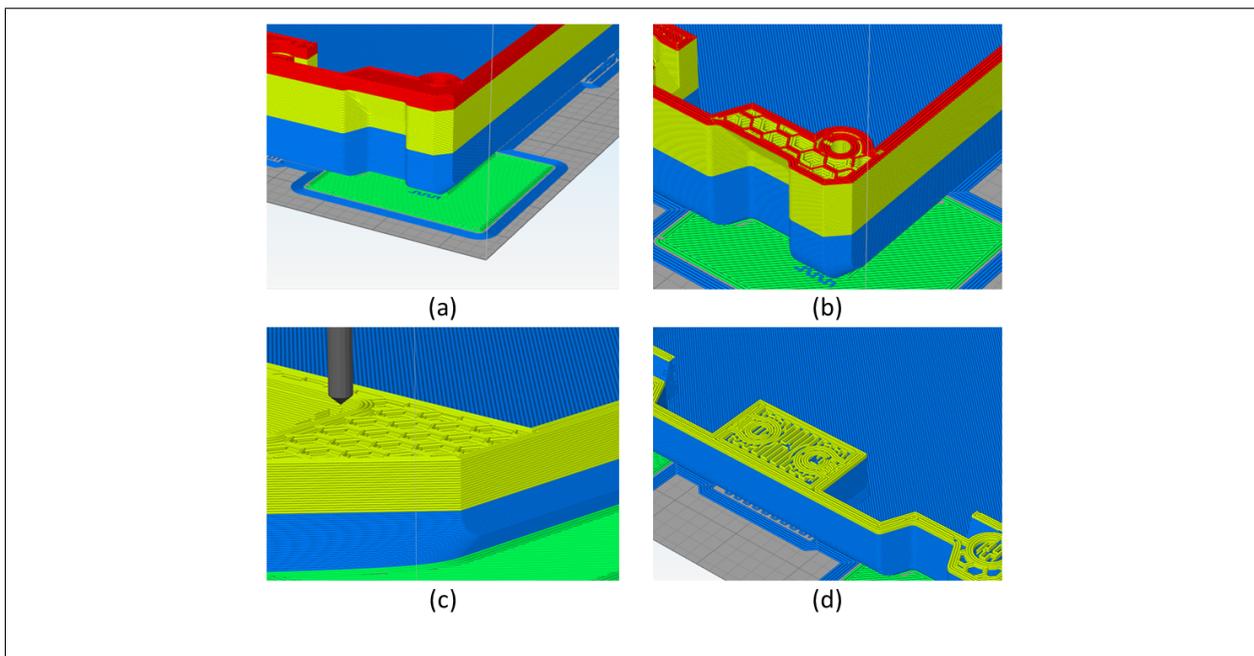


Figura 5.5: Detalhes de otimização do processo para envólucro de bateria. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos LTDA.

5.1.4 Fabricação e Validação de Produto

A fabricação é automatizada para o processo de FFF, o envio para os mquinários disponíveis foi realizado via mídia removível. A peça crua fabricada é ilustrada na Figura 5.6.

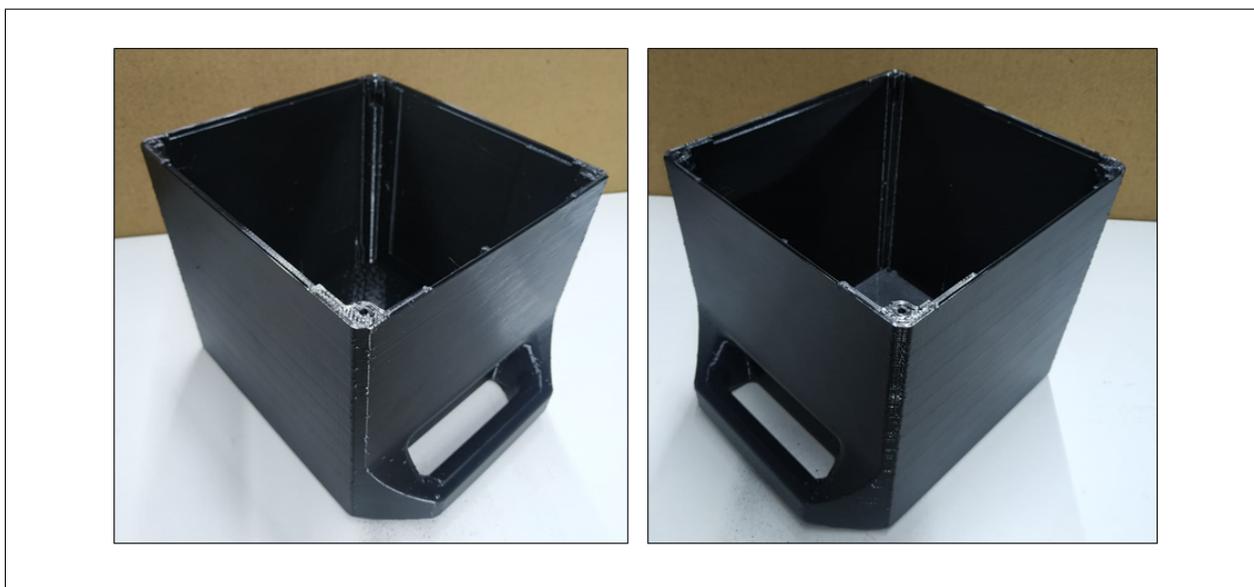


Figura 5.6: Tampa do envólucro impressa e acabada. Fonte: Autoria própria

O pós-processamento para as peças fabricadas pela empresa é simplificado ao máximo durante o projeto da peça, sendo necessário somente a retirada dos suportes e a inspeção da peça a procura de falhas de fabricação. A inspeção realizada para validar o modelo fabricado é visual, buscando por pontos de falha no processo de deposição. Na observância de pontos de falha são

realizados testes pontuais para averiguar a integridade da peça. As falhas são caracterizadas entre parâmetros mal utilizados e geometrias que precisam de modificações baseado nos guias de avaliação indicados no Quadro 4.3.

A montagem do produto foi realizada com a utilização de parafusos, conectando a base à tampa. Para garantir a vedação da peça, foi adicionada uma etapa de aplicação de silicone neutro nas superfícies de contato entre as peças. A montagem com as etapas de colocação do sistema de armazenamento de carga na peça e o produto montado são apresentados na Figura 5.7.



Figura 5.7: Envólucro de bateria montado. Fonte: Autoria própria

5.1.5 Análise de reprodutibilidade

Na etapa de análise de reprodutibilidade a primeira atividade relativa à análise de lote ficou simplificada pelas dimensões das peças. Como os dois componentes ocupam mais de 50% da região da plataforma de fabricação não existe a possibilidade de otimizar o lote para impressão de mais de uma unidade por lote de fabricação.

As especificidades definidas para a peça no processo de fabricação é somente a utilização de spray de aplicação sobre a plataforma, para promover a aderência da peça à plataforma.

A duração estimada da fabricação é de 23 horas e 12 minutos para a tampa e de 9 horas e 5 minutos para a base, além de necessitarem de 990 gramas e 295 gramas, respectivamente. Dessa forma, falhas de fabricação causariam atrasos na entrega de veículos, com isso a fabricação via FFF foi mapeada como de alto risco para continuar a fabricação desse componente durante toda fabricação do lote piloto. Com sugestão de ser utilizada para fabricação de primeiros modelos e posteriormente substituída por outro método de fabricação.

As etapas de controle de qualidade e documentação foram realizadas de acordo com as diretrizes da empresa, para o controle de qualidade todos componentes são inspecionados visualmente e de esforços pontuais, principalmente de separação de camadas, são aplicados de maneira controlada para averiguar a integridade do componente.

Os arquivos de fabricação devem ser salvos no sistema de versionamento da empresa. Para garantir a correta documentação, todos os modelos são versionados durante as etapas de desenvolvimento e fabricação. Dessa forma o caráter iterativo da sistemática de desenvolvimento pode ser performedo sem a necessidade de desfazer alterações. Os principais arquivos documentados foram:

- Esboços de conceitos levantados, escaneados e salvos em formato Portable Network Graphics (.png), com um documento de texto explicando a seleção, como ilustrado no Quadro 5.2;
- Arquivos de CAD gerados, versionados de acordo com as diretrizes da empresa;
- Arquivos de programação de peça para facilitar a edição de parâmetros caso seja necessário para calibração em função de maquinários. Para facilitar a edição e possibilitar o acesso á versões anteriores o arquivo também foi salvo no software de versionamento da empresa;
- Códigos de máquina, com nomenclatura da peça e parâmetros julgados como mais relevantes para a operação: diâmetro do bico, consumo e tipo de filamento e tempo de fabricação.

5.2 Fixação da linha de freio

O segundo componente desenvolvido utilizando a sistemática foram as travas da linha de freio da motocicleta. O sistema de freio utilizado pela companhia foi selecionado à partir da seleção de produtos de prateleira disponíveis no mercado, dessa forma, foi necessário desenvolver travas para a linha de freio, tendo em vista que não são vendidas no mercado de peças de reposição. A linha de freio deve ser fixada à coluna de direção da moto e também à bengala da suspensão dianteira. Além do sistema de freio, a coluna de direção e o conjunto de suspensão dianteira também foram selecionados à partir da análise de opções disponíveis no mercado. Portanto, a fixação da linha deve ser realizada nos suportes presentes nos componentes pré-selecionados, sem a possibilidade de realizar alterações nos mesmos. Pelas dimensões e baixa complexidade funcional, o conjunto deve possuir um prazo máximo de fabricação de 2 horas, prazo estipulado pela empresa para justificar sua fabricação por MA.

5.2.1 Análise de Viabilidade

Para as travas da linha de freio as estimativas de projeto e produção foram:

- Fabricação em prazo máximo de 2h;
- Aproveitar as fixações presentes na motocicleta;

- Permitir a fabricação de itens necessários para uma semana de fabricação (5 conjuntos) em apenas uma rodada de fabricação;
- Montagem simples e que possa ser realizada após a instalação do sistema de freio na motocicleta;

Na atividade de análise de potenciais da MA, não foram observadas características no conjunto que justifiquem sua utilização em detrimento de métodos tradicionais de fabricação. Dessa forma o projeto deveria ser descartado para fabricação por MA, porém, dentre as estratégias de produção da empresa foi identificado que a fabricação por MA aceleraria o desenvolvimento e reduziria os custos iniciais de fabricação, pois não necessita de investimento em moldes e outras ferramentas de fabricação. Como o processo de FFF já é utilizado pela empresa para prototipagens funcionais, utilizá-lo para fabricação de produtos finais representa uma economia no custo de desenvolvimento das primeiras unidades do produto. As peças utilizadas em veículos que utilizam o sistema selecionado são fabricadas a partir de arame dobrado, a dificuldade por encontrar a peça no mercado de reposição leva oficinas especializadas na manutenção de motos a realizar o produto de forma artesanal. Essa técnica de fabricação foi descartada pela empresa por representar muito tempo de fabricação e deixar manufaturar peças não uniformes, devido à possibilidade de falha humano na conformação das dobras das peças. Levando em consideração o exposto, a estratégia de fabricar o produto pelo processo de FFF foi mantida mesmo sem observar potenciais da MA.

Definido o processo de FFF como meio de fabricação, os requisitos de produto para o conjunto de fixação da linha de freio foram:

- Suportar os esforços cíclicos de carregamento com vida útil indeterminada;
- Permitir que a linha de freio corra por dentro da fixação para evitar dobras excessivas;
- Fixação por parafusos, aproveitando os recursos já presentes nos componentes selecionados para a motocicleta;
- Não realizar alterações na distância entre a linha de freio e os componentes da motocicleta observados pelo fornecedor das peças;
- Possuírem formato discreto e preferencialmente na cor da linha de freio;

5.2.2 Projeto para funcionalidade

Como primeira atividade, a análise funcional desenvolvida para o conjunto é ilustrada na Figura 5.8.

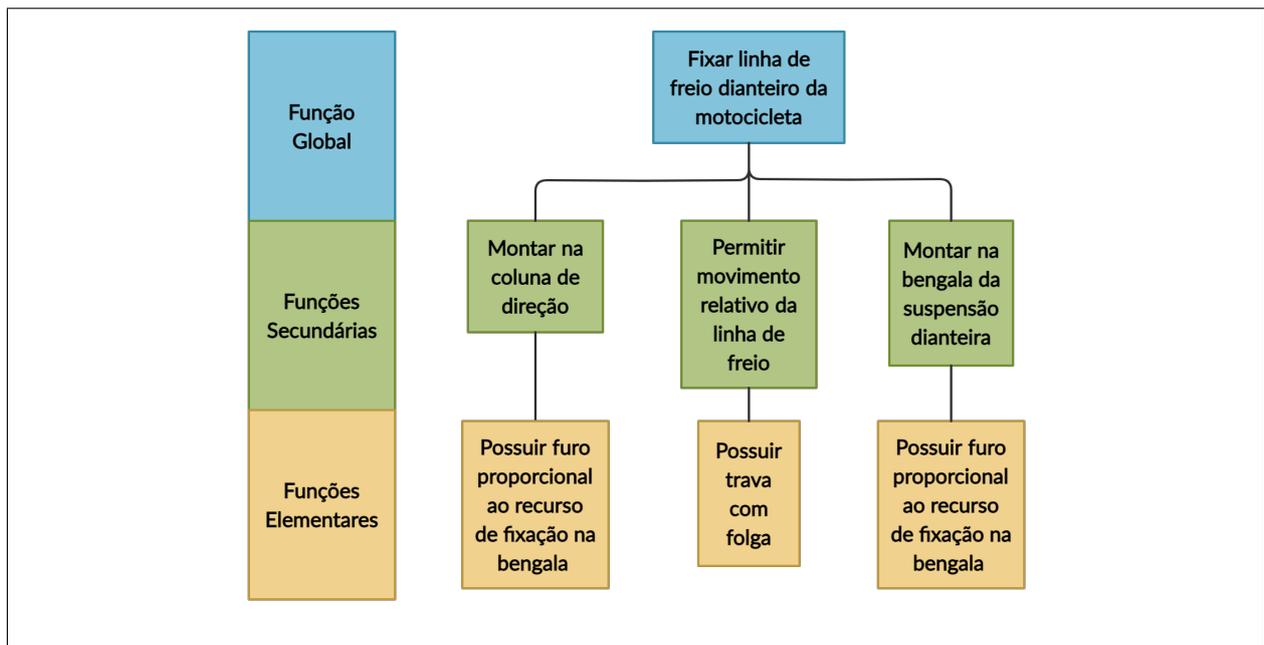


Figura 5.8: Análise funcional do conjunto de fixação da linha de freio. Fonte: Autoria Própria

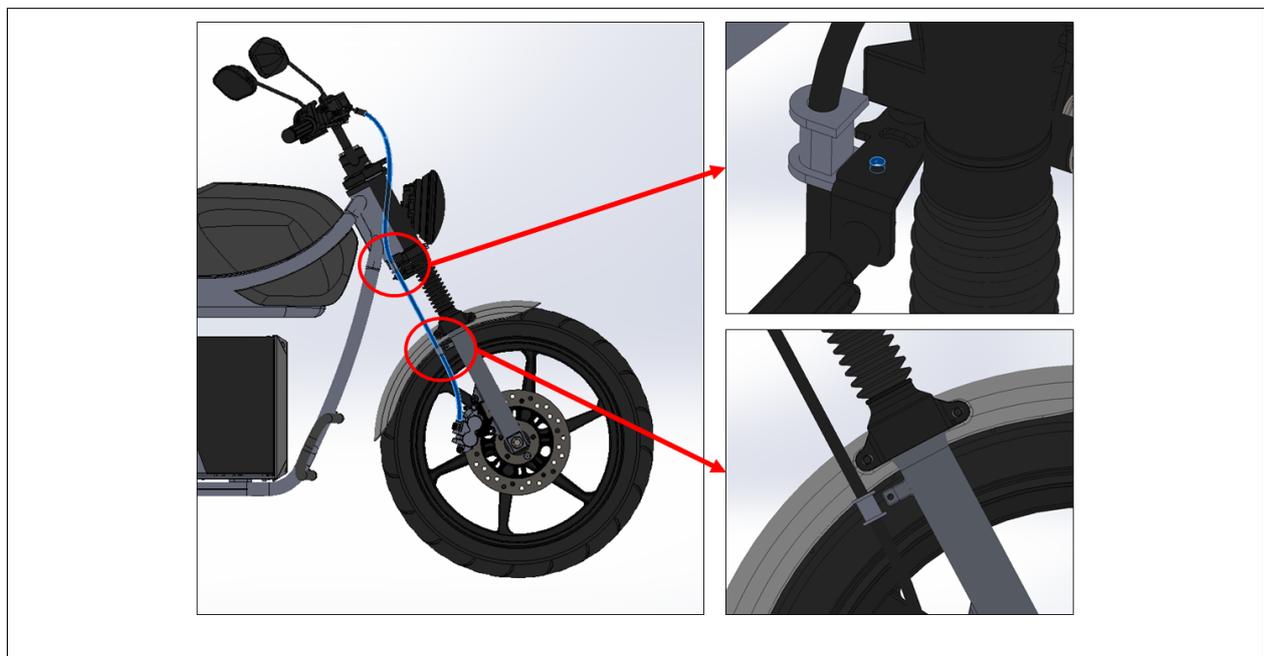


Figura 5.9: Ilustração da utilização do conjunto de travas. Fonte: Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos LTDA.

Para ilustrar a aplicação da peça, o CAD do produto é utilizado na Figura 5.9 com as restrições indicadas.

Na Figura 5.9, é possível observar que as restrições do projeto são bem fechadas, sem permitir margem para soluções mais criativas. Como descrito anteriormente, a peça não possui vantagens observáveis para a fabricação por MA, mas demonstra um outro potencial, não apontado no desenvolvimento da sistemática, a possibilidade de fácil integração à restrições de projeto com menor

liberdade. A diferença observada nas restrições de fabricação da MA para os métodos tradicionais facilita para o projetista na adaptação da peça à produtos de prateleira. Os componentes em cinza na linha de freio representam borrachas para fixação que já são incorporadas no sistema de freio adquirido. Sua utilização também foi adotada como requisito do projeto, tendo em vista que são utilizados para proteger a linha de freio e impedir seu rompimento.

Pela simplicidade do modelo, as concepções de solução foram desenvolvidos direto em ambiente CAD. Ilustrados com marcações no próprio modelo CAD de modelo na Figura 5.10.

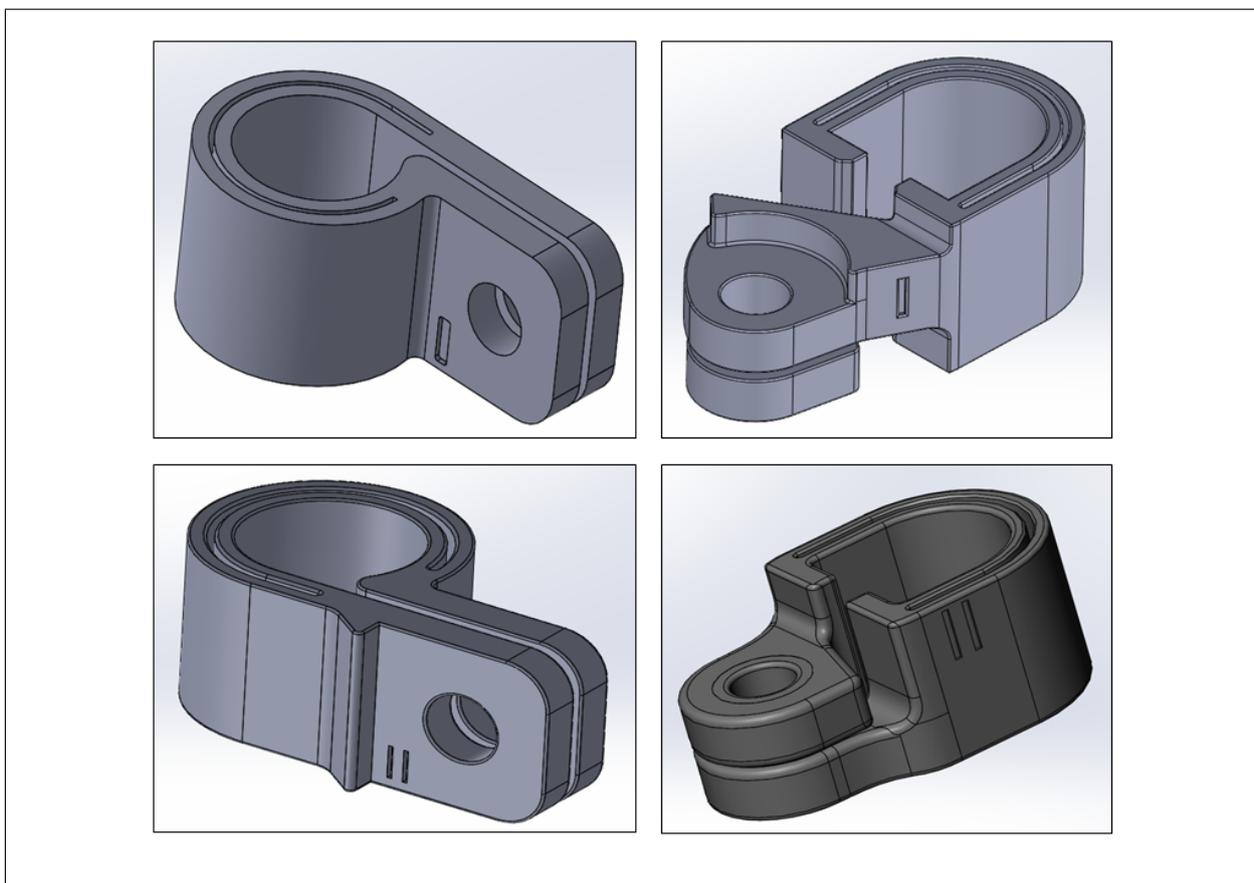


Figura 5.10: Conceitos para presilhas de linha de freio. Fonte: Autoria Própria

As concepções foram desenvolvidos de forma muito similar, os conceitos do processo de FFF utilizados foram:

- Esforço cíclico aplicado para flexão de camadas;
- Utilização de espaços vazios para possibilitar a deformação da peça na instalação e não prejudicar a integridade da peça;
- Manter sempre uma superfície contínua e plana para região de contato com a plataforma de fabricação;
- Arredondar todos os cantos;

As concepções marcadas com algoritmo romano "II" foram selecionadas para as duas presilhas. Para as presilhas do lado esquerdo da Figura 5.10, que ficam localizadas na bengala da suspensão dianteira, a segunda concepção foi selecionada por possuir um batente lateral, que impede a movimentação da presilha durante o uso. Para a presilha fixada na coluna de direção (à direita da Figura 5.10) o primeiro modelo foi inicialmente selecionado, por possibilitar o travamento da presilha na mesa inferior da coluna de direção, porém, para o segundo conceito, foi possível migrar a peça da coluna de direção para o furo destacado na Figura 5.9 e por isso o modelo foi selecionado.

Para o componente de fixação na coluna de direção, duas faces serão impressas uma acima da outra, representadas pela região de aperto do parafuso e responsáveis por permitir a abertura da presilha para montagem. A distância entre as superfícies foi modelada de acordo com os guias de projeto para partes móveis, deixando assim a distância entre as faces de 0.3 mm, permitindo a fabricação direta, sem necessidade de suportes e garantindo que após a fabricação as regiões não vão estar aderidas uma à outra.

5.2.3 Definições do Processo

Na realização do fatiamento da peça a orientação de posicionamento das peças já foi definida na etapa de geração dos conceitos de solução. Os parâmetros foram inseridos à partir da base de dados da empresa. As visualizações dos processos são apresentadas na Figura 5.11.

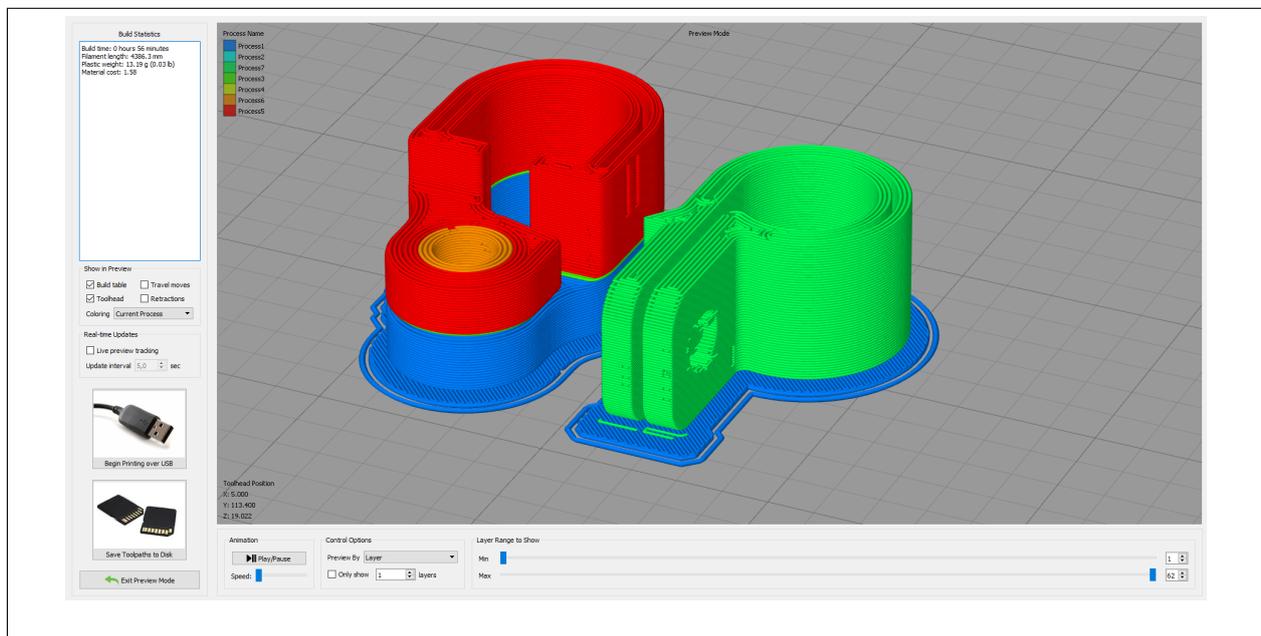


Figura 5.11: Visualização dos processo para presilhas de freio Fonte: Autoria Própria.

Como é possível observar na Figura 5.11, sete processos diferentes foram necessários para fabricar os dois componentes. Para a presilha de fixação na bengala, apenas um processo foi definido, portanto não foi necessário realizar alterações de parâmetros para a fabricação. No caso da

Tabela 5.3: Processos para fabricação da presilha de fixação na coluna de direção

Processo	Cor	Explicação
1	Azul escuro	Processo utilizado para as primeiras camadas do modelo, sem qualquer alteração de parâmetro
2	Azul claro	Devido à fixação por parafusos, a região que será comprimida foi separada em outro processo para ser fabricada de maneira sólida e não permitir o achatamento na aplicação do torque de montagem
3	Verde	Primeira camada da falange superior de fixação da peça, fabricada com velocidade inferior por possuir substrato afastado (final da falange inferior)
4	Amarelo	Similar ao processo 2, porém para a falange superior do componente e com velocidade reduzida como o processo 3, por também estar com substrato afastado por representar a mesma camada do processo 3
5	Vermelho	Mesmos parâmetros do processo 1. Pela falta e complexidade das regiões da peça os parâmetros originais foram estabelecidos
6	Laranja	Igual ao processo 2

presilha de fixação na coluna de direção, foram necessários seis processos, com as descrições apresentadas na Tabela 5.3. Além disso, foi utilizada uma técnica chamada de "raft" para a fabricação das peças, nessa técnica são depositadas camadas de material entre a peça e a plataforma de fabricação, essa técnica é utilizada para auxiliar na adesão da peça na plataforma durante a fabricação, como as dimensões dos modelos são reduzidas, sua área de contato com a plataforma é insuficiente para garantir a aderência da peça durante todo processo de fabricação, o uso da técnica permite que o objeto seja manufaturado sobre uma superfície já aderida à plataforma e portanto a confiabilidade do processo é aumentada.

5.2.4 Fabricação e Validação de Produto

Na Figura 5.11 é possível visualizar que o tempo estimado de fabricação da peça é 56 minutos, ficando abaixo da metade do tempo estipulado nos requisitos preliminares de produção. O gasto total de insumo é de 13,2g para os dois componentes. O pós-processamento da peça também foi planejado para ser simples e rápido. Para os dois componentes existe a necessidade de retirar os suportes e também os *raft's*. Ambos são retirados à partir de esforço mecânico, utilizando alicates para evitar danos ao operador por superfícies cortante que podem ser formadas na retirada dos suportes. O processo de validação foi realizado em campo, instalando as peças e verificando se as mesmas suportam os esforços gerados na linha de freio à partir do movimento da suspensão.

A montagem das peças foi realizada utilizando parafusos de fixação com características compatíveis com a fixação original dos componentes da moto. As presilhas montadas na motocicleta são apresentadas na Figura 5.12

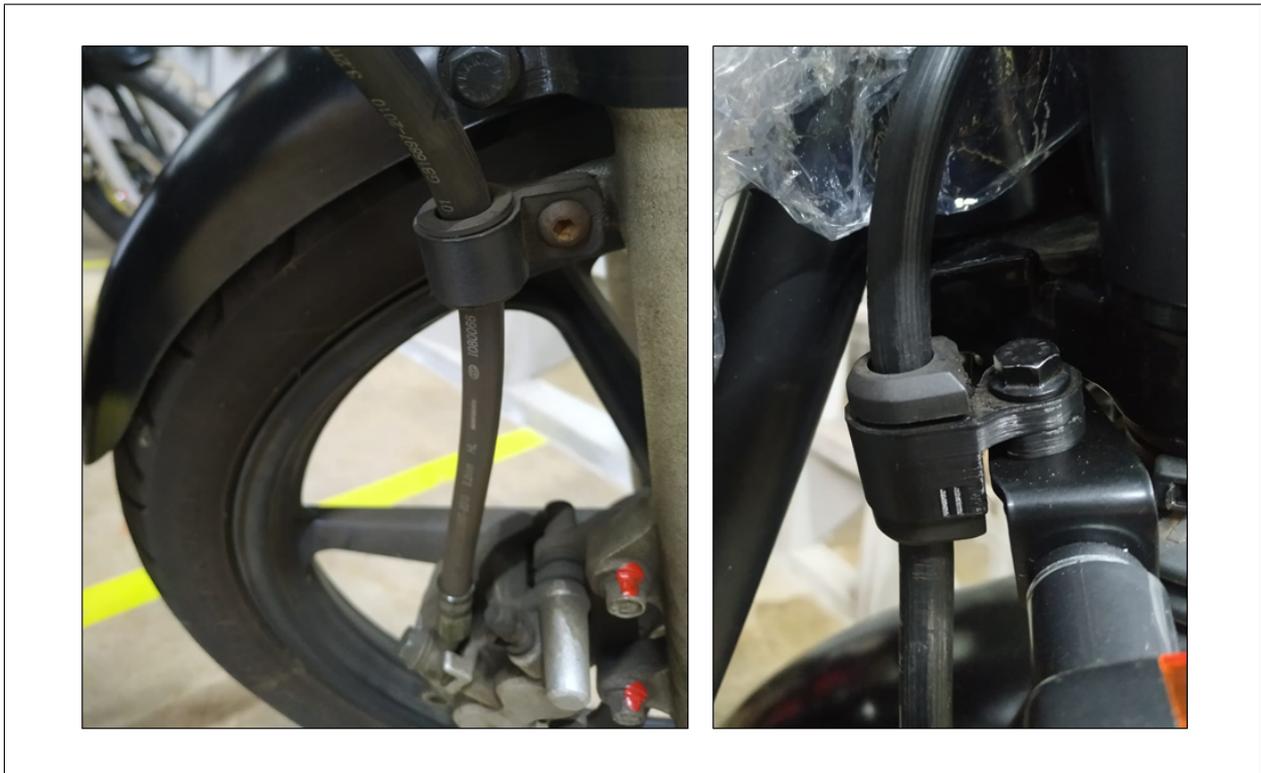


Figura 5.12: Presilha de freio instalada no veículo. Fonte: Autoria Própria

5.2.5 Análise de reprodutibilidade

Como requisito de produção, foi estabelecido que a produção semanal deve ser realizada em apenas uma rodada de fabricação, portanto foi preciso copiar as peças e parâmetros para realizar cinco unidades de cada componente. Como o processo já estava validado para uma peça de cada componente e mesmo com os cinco a região de preenchimento da plataforma ficou satisfatória, a complexidade da geração do lote é baixa. A visualização do processo com todos os dez componentes é ilustrado na Figura 5.13.

O processo definido possui como especificidade somente a aplicação de spray para aderência na plataforma. O controle de qualidade e a documentação seguiu os mesmos princípios detalhados para o envólucro de bateria.

5.3 Envólucro de proteção para PCB

O último componente selecionado para o estudo de caso foi o envólucro para uma das PCB's utilizada na motocicleta. A PCB que será inserida no componente é responsável por receber os sinais dos componentes da parte frontal da moto. Os componentes que realizam comunicação com a PCB são: farol, chave de partida, dispositivos de segurança para ativar a moto, acelerador, velocímetro, PCB principal da moto, setas, buzina, tomada de carregamento via USB de 12V e

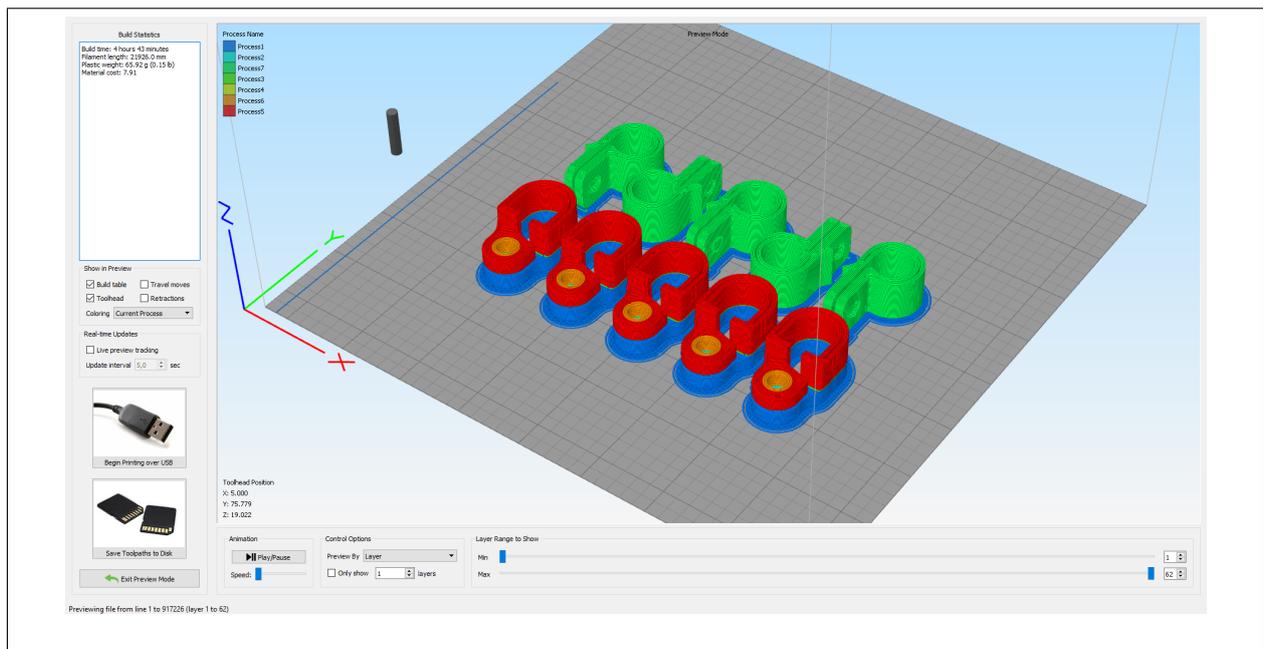


Figura 5.13: Visualização de processo para cinco conjuntos de presilhas de freio Fonte: Autoria Própria

tranca. Dessa forma o envólucro deve possuir previsão para inserção dos conectores de todos esses componentes, fixar a placa de forma firme e segura, garantindo a estabilidade das conexões mesmo com as vibrações provenientes da movimentação da moto e garantir proteção à PCB contra intempéries climáticas. Assim como o projeto dos conjunto de fixação da linha de freio da motocicleta, esse desenvolvimento possui restrições de fabricação pouco flexíveis, pois os componentes que devem ser conectados à PCB são produtos de prateleira, os conectores já estão definidos e o formato da PCB também. A definição da fixação do envólucro representa outra restrição do projeto, tendo em vista que o espaço de posicionamento da PCB já é definido em função da proximidade com os componentes que realizam conexão na mesma e a fixação foi definida previamente para poder fixar o farol da motocicleta.

Devido à quantidade de restrições, as etapas de concepções de solução não foi realizada para esse produto. A utilização da sistemática foi aplicada somente na otimização do produto em função do processo de fabricação. Considerando todas restrições de projeto impostas ao componente o desenvolvimento partiu de uma geometria simples, gerada em ambiente de CAD levando em consideração as superfícies funcionais impostas pelos requisitos do produto. O CAD é apresentado na Figura 5.14 com os componentes que interagem com o produto em desenvolvimento.

Para gerar a geometria ilustrada na Figura 5.14 as guias de projeto para FFF apresentadas no Quadro 4.2 foram utilizadas para contornar a PCB e realizar as superfícies de guia para os conectores. Para a espessura de parede da região da PCB foi utilizada uma dimensão de 2,5mm e para a região de guia do conector 1,5mm.

Dessa forma, o desenvolvimento desse produto partiu da etapa de definições do processo,

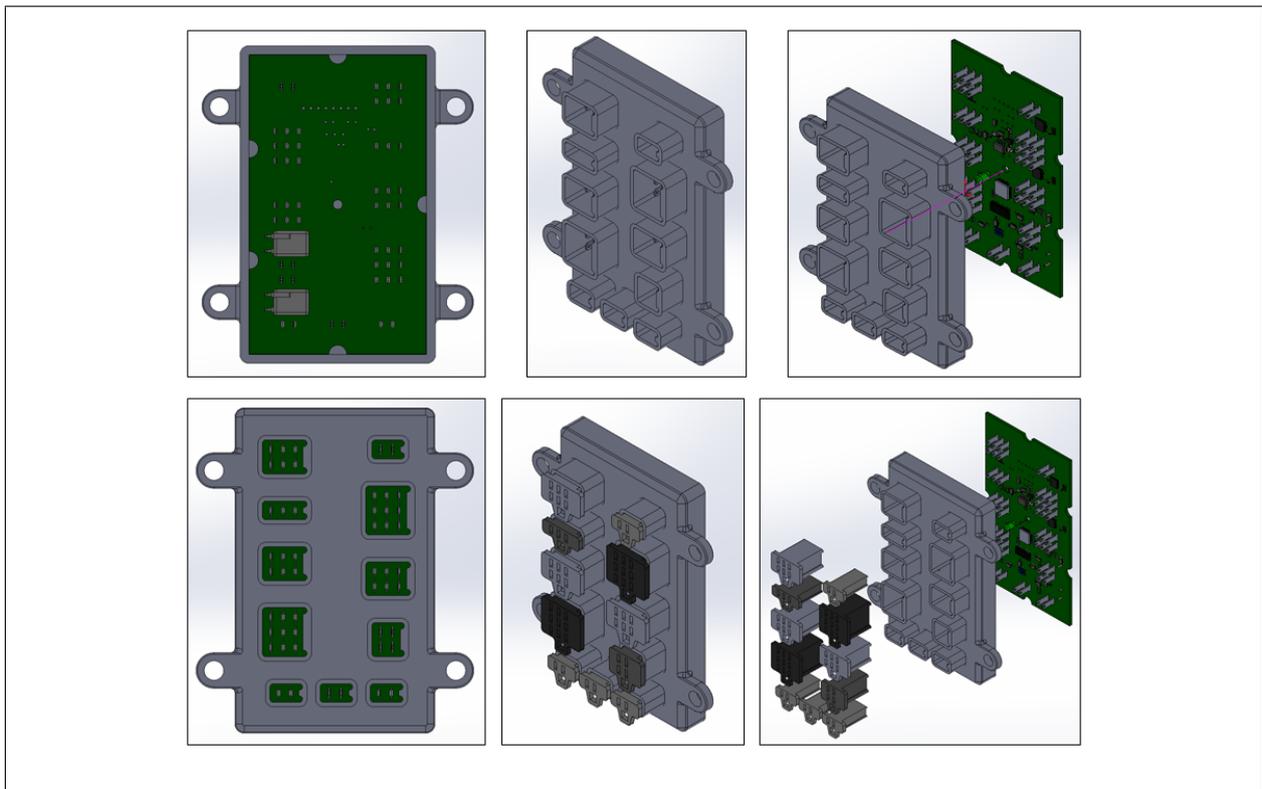


Figura 5.14: CAD para envólucro de PCB baseado nas restrições de projeto. Fonte: Autoria própria

tendo em vista que as restrições do projeto eram tão inflexíveis que partir de um modelo geométrico mínimo e otimizá-lo em função do processo de FFF foi definido como a abordagem.

5.3.1 Definições do Processo

Para o envólucro da PCB a atividade de Otimizações de DfMA possui uma maior complexidade pois será a atividade base para desenvolvimento do produto. A primeira definição para a atividade foi de projetar um recurso para realizar a fixação da PCB no envólucro. Analisando, como ilustrado na Figura 5.15, a posição da PCB é definida por batentes nas extremidades do case e também no contorno dos conectores

Partindo do conceito que geometrias anguladas podem ser realizadas no processo de FFF sem necessidade de aumentar a complexidade da manufatura, a trava foi desenvolvida com um recurso de encaixe rápido, desenvolvido na parede lateral de maior comprimento para proporcionar uma maior flexibilidade no encaixe e evitar grandes esforços na PCB ou no envólucro. A fixação projetada é mostrada em detalhe na Figura 5.16. Outro recurso que foi disponibilizado para fixação da PCB no desenvolvimento da mesma foi o furo central, pensado pela equipe de desenvolvimento da placa. Levando em consideração a possibilidade de realizar a fixação sem a utilização de fixadores, à partir da definição de travas incorporadas ao próprio envólucro a solução proposta representa uma otimização no processo de montagem e redução do número de componentes do

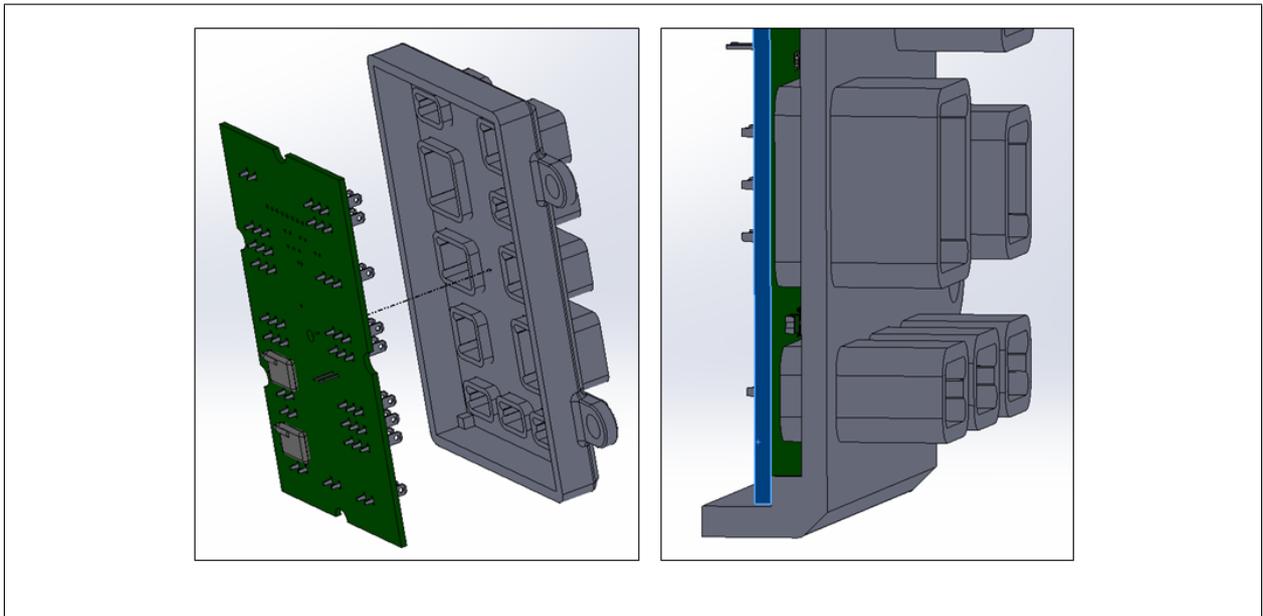


Figura 5.15: Detalhe de batente para PCB. Fonte: Autoria Própria

produto.

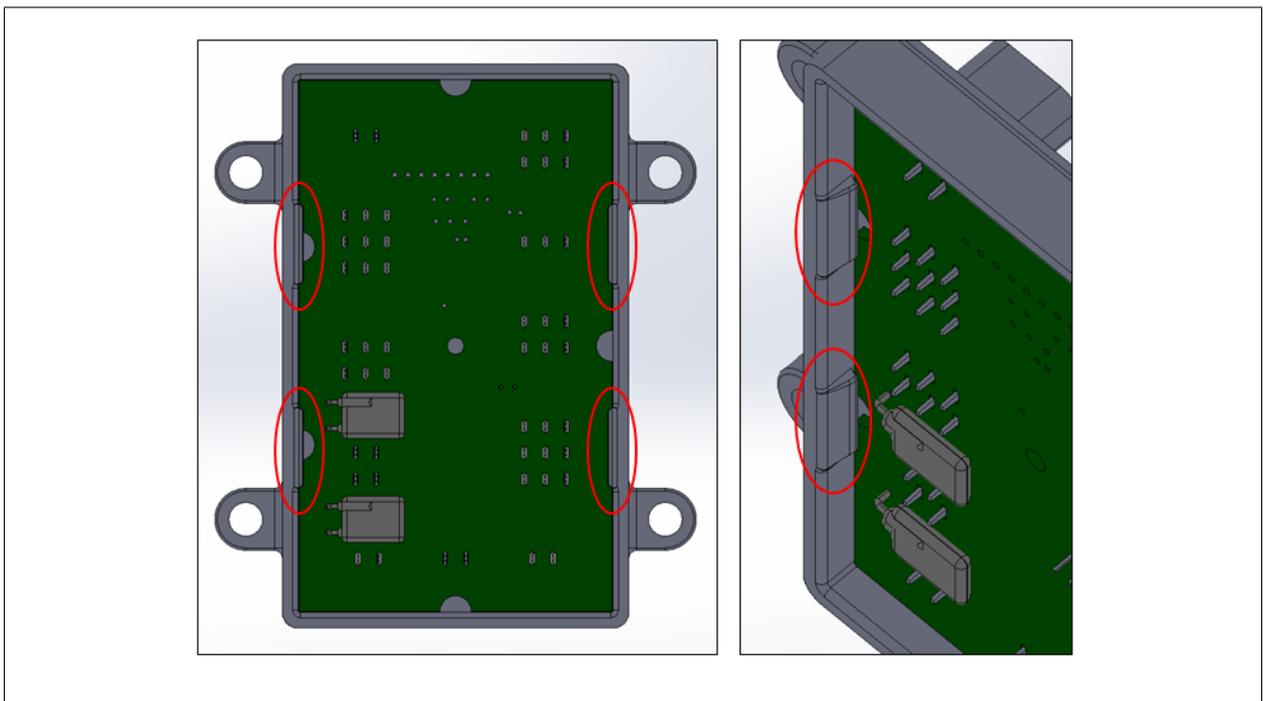


Figura 5.16: Detalhe de trava para PCB. Fonte: Autoria Própria

Com o sistema de fixação definido, os requisitos são todos contornados para o projeto. Para fabricar a peça como projetada até essa etapa a necessidade de suportes é alta, tendo em vista que o modelo é composto por regiões vazias. Para otimizar a fabricação o projeto baseou no princípio da impressão de superfícies com ângulo máximo de inclinação de 45°. Com isso, a parede externa da região de encaixe dos conectores foi inclinada nessa direção, permitindo a fabricação sem utilizar suportes.

Ao mesmo tempo de aplicação da otimização em função da inclinação de superfícies a PCB da motocicleta passou por alterações, trocando a quantidade de pinos de conexão de dois conectores e adicionando outro conector, na região superior da peça. A flexibilidade do processo de manufatura garantiu que as alterações não alterassem de forma significativa o custo de desenvolvimento do produto. Com as alterações da PCB e ainda a alteração visando o processo de FFF o modelo ficou como apresentado na Figura 5.17.

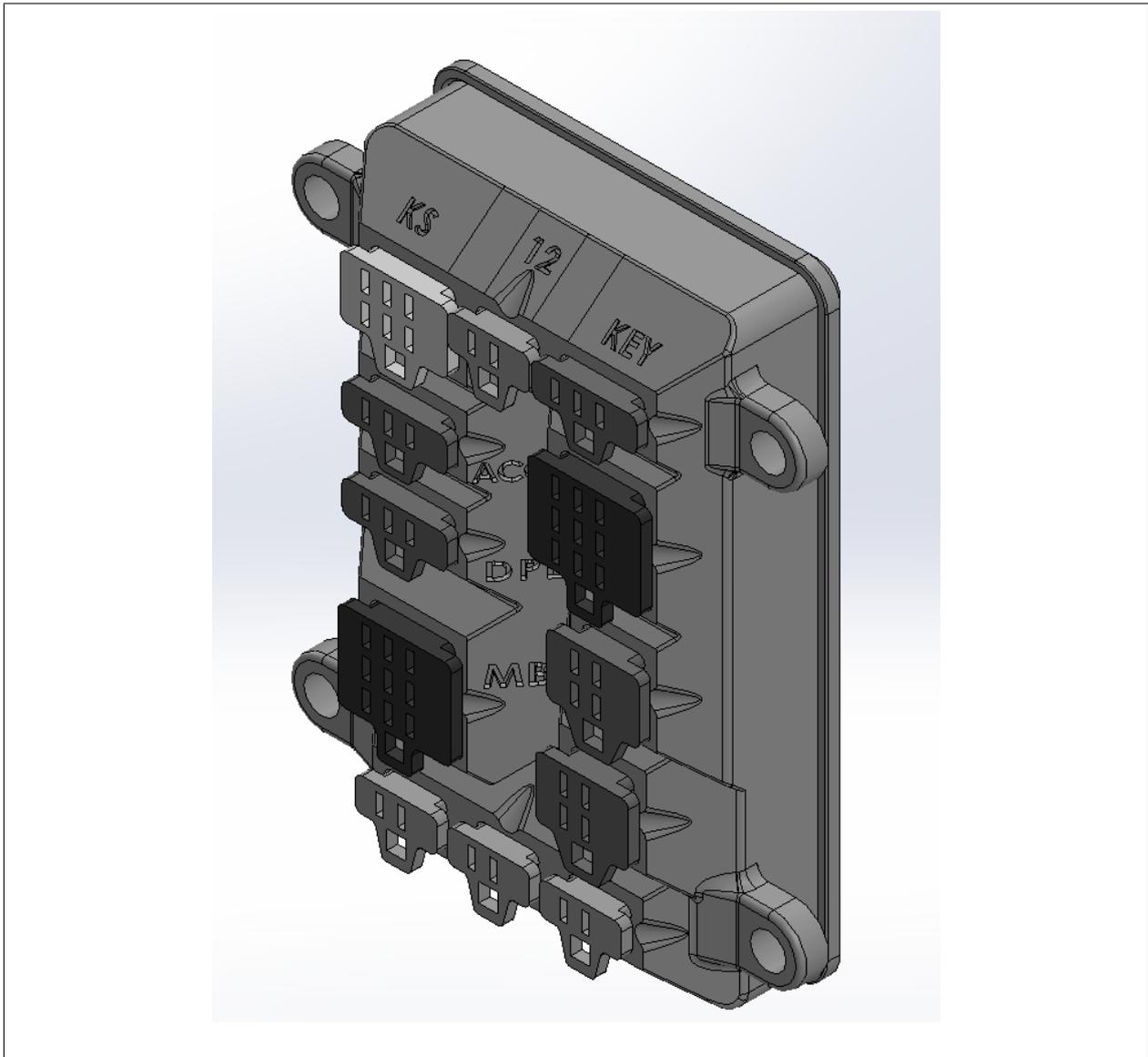


Figura 5.17: CAD de modelo final de envólucro para PCB. Fonte: Autoria Própria

No modelo apresentado na Figura 5.17, foram ainda adicionados um componente para realizar a vedação da parte de trás da PCB, que antes tinha intenção de receber um revestimento próprio para placas, denominados de *potting*, porém por inviabilidade econômica passou a necessitar de proteção na mesma face e ainda marcações para guiar na montagem e manutenção do sistema, indicando a função de cada conector. A montagem do envólucro de PCB na moto é ilustrada na Figura 5.18.

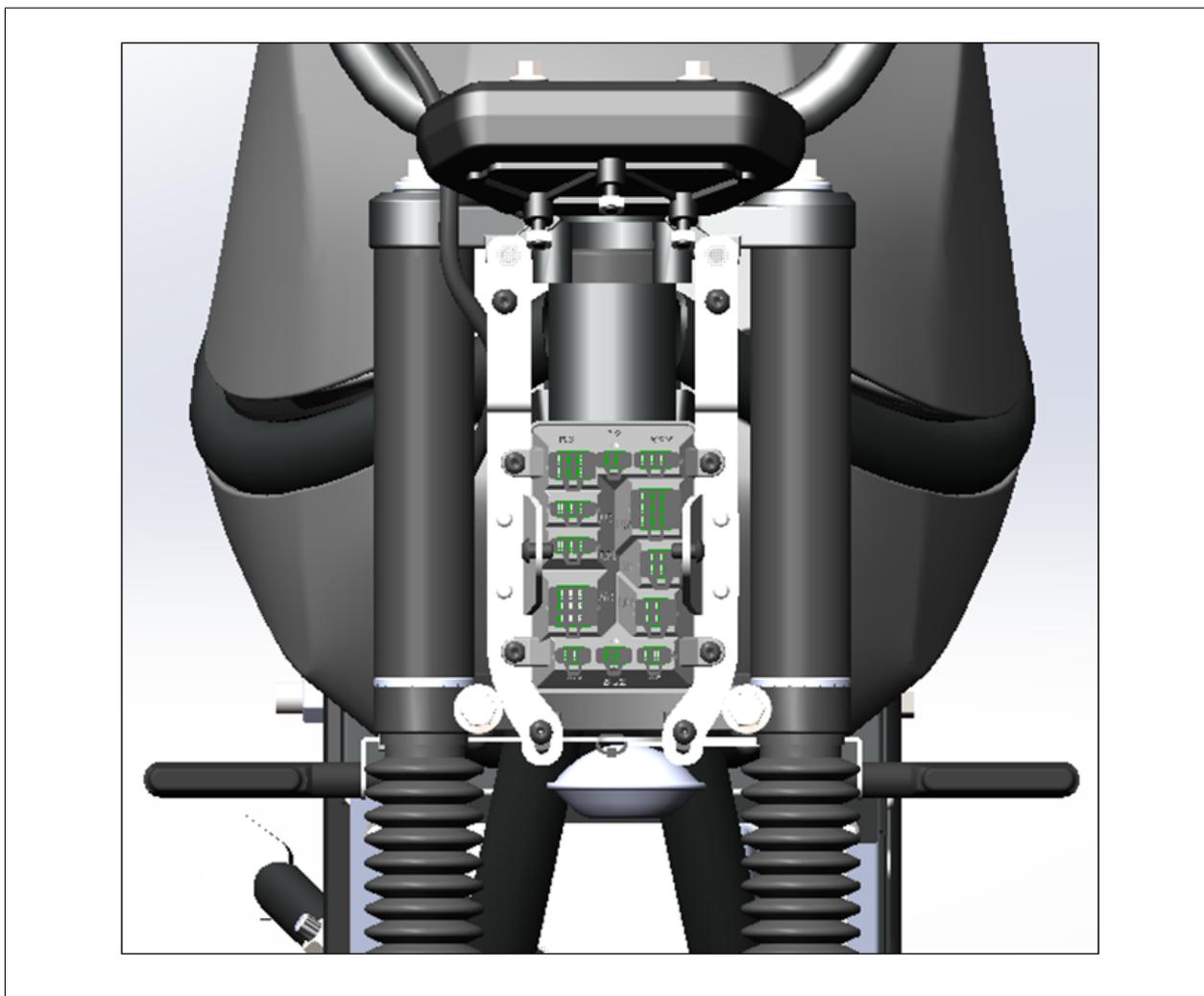


Figura 5.18: Ilustração da montagem do envólucro da PCB na motocicleta Fonte: Autoria Própria

O fatiamento do modelo seguiu os parâmetros de processo pré-estabelecidos no banco de dados da empresa. A visualização do processo é apresentada na Figura 5.19. No fatiamento dois processos foram definidos, a alteração realizada no segundo processo é relativa à altura de camada, deixando a camada mais espessa para reduzir tempo de impressão, tendo em vista que as regiões de maior complexidade da peça, representadas pelas superfícies inclinadas, região acima de suportes para fabricação das abas de fixação e marcações de conectores, já foram fabricadas.

Devido à estratégia de definir um modelo inicial baseado somente nas restrições de projeto e otimizar à partir de definições do processo de FFF, a etapa de fabricação e validação e produto foi realizada junto da etapa de definições de processo. A cada alteração, a peça era fabricada para validar o funcionamento do recurso projetado, sendo assim ao final do desenvolvimento da solução, a validação já estava realizada. O modelo final impresso com parâmetros de produção é ilustrado na Figura 5.20.

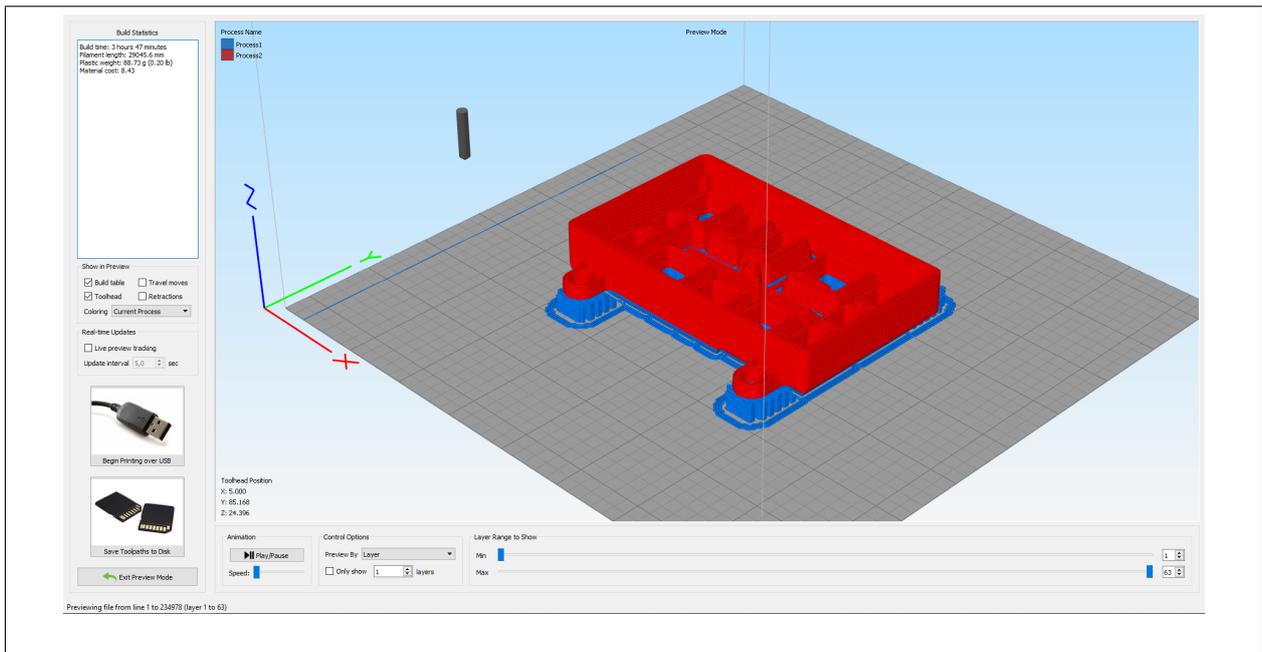


Figura 5.19: Fatiamento de envólucro para PCB. Fonte: Autoria Própria

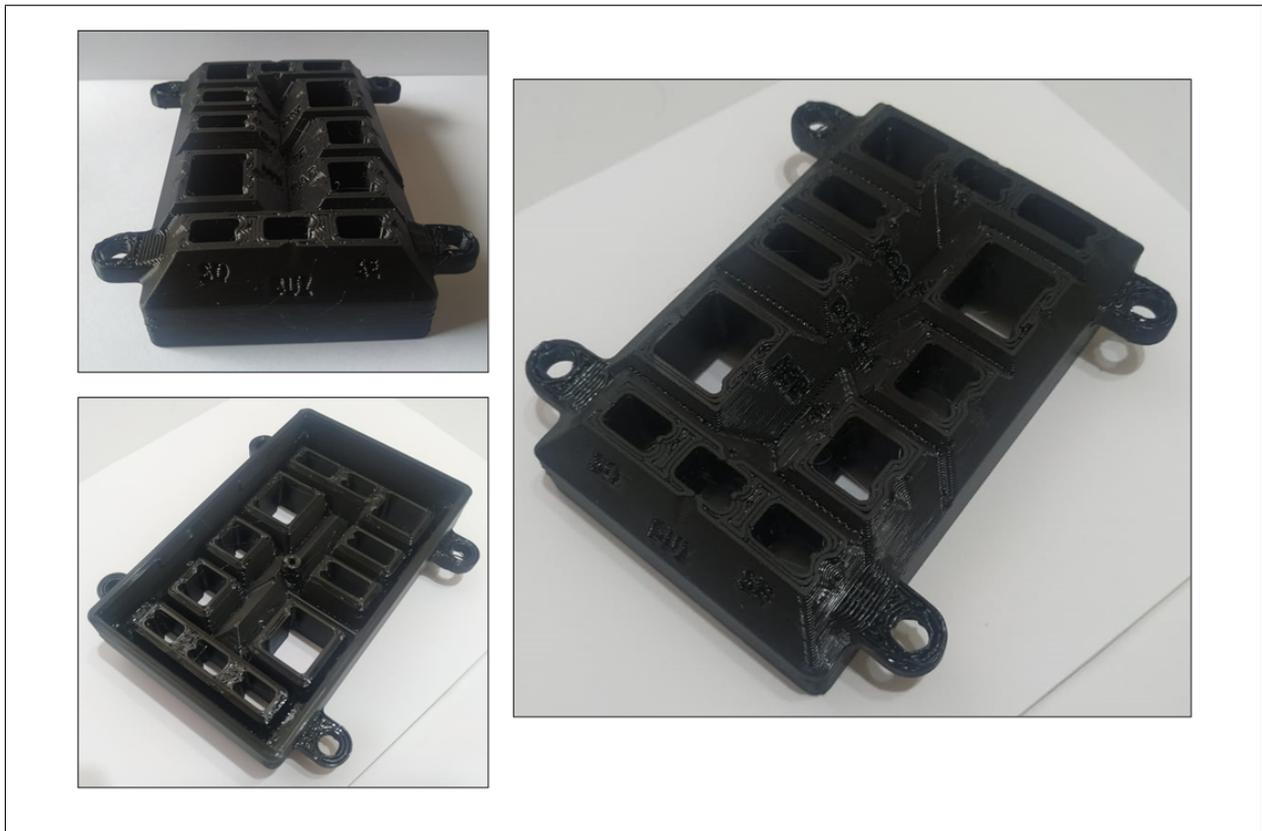


Figura 5.20: Modelo final do envólucro de PCB manufacturado. Fonte: Autoria Própria

5.3.2 Análise de reprodutibilidade

Como observado na Figura 5.19 o tempo de fabricação do envólucro é de quase quatro horas. Seria possível, analisando as dimensões da peça e da plataforma de fabricação, colocar duas ou

mais peças para serem impressa a cada rodada de produção, porém, por se tratar de um processo de duração considerável, colocar mais de uma peça para manufaturar por processo aumentaria o risco de perder os componentes por falhas durante a deposição de material.

Para especificidades do processo novamente a única necessidade é de aplicar spray de fixação sobre a plataforma antes do processo iniciar. Com as etapas de controle de qualidade e documentação seguindo as mesmas diretrizes dos componentes descritos anteriormente nesse estudo de caso.

Capítulo 6

Conclusões

Como uma das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 a Manufatura Aditiva tem apresentado a necessidade de ampliar sua utilização como meio de produção de produtos finais. A MA permite a flexibilização dos meios de produção, a customização em massa e a redução da complexidade das cadeias de fornecimento, propagando assim pilares da Indústria 4.0.

Apesar de ser uma metodologia consolidada para fabricação de protótipos, a MA ainda possui pouca aplicação na produção de produtos finais. Por ser um processo que apresenta baixa produtividade e alto custo, quando comparado com métodos tradicionais de fabricação, sua aplicação é atualmente limitada à peças otimizadas e de alto valor agregado.

O processo de migração de um componente de algum método de fabricação tradicional para a MA dificilmente se prova economicamente viável quando não existem alterações na peça. A busca por analisar peças dentre o portfólio de empresas que possam ser viáveis de migrar para fabricação aditiva é apresentado em publicações recentes como demonstrado por Paritala, Manchikatta e Yarlagadda (2017), Rodrigues et al. (2017) e Thompson et al. (2016). Porém, essa migração é justificada quando analisada para peças de reposição que possuem demanda muito baixa de mercado e portanto são justificáveis para fabricação sob demanda e a MA oferece vantagem por não necessitar de cadeias complexas de estoque e fornecimento, além de não necessitar de moldes e gabaritos para a fabricação.

Para ampliar a utilização da MA na fabricação de produtos finais é necessário utilizar metodologias que permitam sua consideração como processo de manufatura desde etapas iniciais de desenvolvimento, identificando potenciais da MA para serem explorados no projeto de produtos. Como primeiro objetivo do presente trabalho, o estado da arte de processos de desenvolvimento de produtos foi levantado à partir da análise de normas e publicações científicas.

Analisando os trabalhos publicados, que possuem propostas de processos de desenvolvimento de peças voltados para a MA, a problemática de guiar o processo de desenvolvimento desde etapas iniciais de pré definição de estratégias de produção e projeto não foi abordada. A maioria das me-

metodologias abordam principalmente a etapa de projeto preliminar de produto, onde a incorporação de guias de projeto baseadas nos processos de MA são aplicadas aos conceitos de produto já estabelecidos. Essa característica é consequência da aplicação de requisitos dos processos de MA apenas após a definição de uma solução para os requisitos de produto, deixando as metodologias responsáveis por adaptar formas e geometrias em função de guias de processo, sem auxiliar na etapa de idealização do produto. Dessa forma, as metodologias costumam levar aos mesmos resultados de estudos que procuram avaliar a viabilidade de migração de processo produtivo sem alterações de componentes.

Buscando estabelecer uma sistemática que apoie o desenvolvimento de produtos voltados para fabricação via MA desde etapas iniciais do projeto, foi realizado um levantamento das ferramentas de projeto utilizadas nas metodologias publicadas. Na análise das metodologias e normas foi estabelecido que antes da utilização de qualquer ferramenta de projeto que favoreça a fabricação via MA é necessário estabelecer uma tomada de decisão para verificar se a MA apresenta alguma justificativa de utilização. Essa tomada de decisão foi então desenhada levando em consideração as vantagens identificadas nas publicações.

As ferramentas de desenvolvimento de produtos utilizadas nas metodologias não apresentam diferenças significativas no processo de desenvolvimento. Por se tratar de uma manufatura digital, pautada em um fluxo virtual de desenvolvimento, as ferramentas de CAD e CAE são aplicadas em todas metodologias, com o desenvolvimento de algoritmos e técnicas que adaptam restrições do processo, como performado, por exemplo, para processos de injeção de polímeros. Portanto, a principal necessidade observada é o domínio das características dos processos, para permitir a incorporação de etapas de desenvolvimento específicas, como determinar orientação de peça e geração de suportes.

Partindo dos levantamentos, a sistemática desenvolvida abarcou as necessidades do Projeto para MA, possibilitando a incorporação de etapas de tomadas de decisão no início do desenvolvimento e com resultado positivo, permitindo aplicar todo potencial de otimização de peças e de processo ao longo do desenvolvimento.

No desenvolvimento da sistemática, buscou-se definir etapas lógicas para o processo de desenvolvimento. Estabelecendo um fluxo de atividades baseado na cadeia digital de desenvolvimento de peças para MA. A sistemática buscou abarcar as atividades de maneira superficial, com objetivo de estabelecer um fluxo de desenvolvimento. As ferramentas para o desenvolvimento de cada atividade foram apresentadas sem o detalhamento necessário para seu uso direto. Essa abordagem foi definida para possibilitar o estabelecimento de um fluxo completo, permitindo a adição de conteúdo específico em trabalhos futuros.

A aplicação para o processo de FFF desenvolvida no trabalho permitiu identificar como deve ser analisado um processo específico de MA para adaptação da sistemática. Como o campo de MA é amplo, envolvendo tecnologias que atuam em diferentes tipos de insumo e com métodos de adição de material para formação de geometrias distintos, é necessário realizar a adaptação

de etapas e atividades da sistemática em função do processo. A sistemática desenvolvida possui atividades generalizadas exatamente para poder ser aplicada de forma universal dentre os processos de MA, a definição de guias de projeto e caracterização do processo é essencial para sua utilização.

Levando em consideração a necessidade de caracterização de processos de MA para utilização da sistemática, o estudo de caso, elaborado para verificar a eficiência da metodologia de desenvolvimento de produtos, foi aplicado visando somente a FFF como processo de fabricação. O estudo de caso foi desenvolvido na Origem Projetos, Indústria e Locação de Motos Ltda. e comprovou a eficácia do processo com sua utilização para desenvolvimento de três produtos distintos. A utilização da sistemática se provou suficiente para obter geometrias fabricáveis pelo processo de FFF, apesar de ainda depender muito da experiência do projetista por basear em guias de projeto estabelecidos para o processo de manufatura. O sucesso no estudo de caso foi, em grande parte, proporcionado por ter sido desempenhado junto à uma equipe de desenvolvimento de produto com larga experiência no projeto de produtos plásticos. A sinergia da equipe e a abertura para repensar concepções baseadas no processo de FFF foi essencial para obter geometrias otimizadas sem a utilização de algoritmos de processamento e seleção.

No desenvolvimento do estudo de caso, foi possível definir estratégias para utilização dos potenciais da MA, que geraram princípios de solução e caracterização de produtos. Durante o desenvolvimento do estudo de caso foram desenvolvidas técnicas para desenvolver soluções que obtiveram ótima performance e provam a necessidade de estabelecer um banco de dados de DfMA. Com a estruturação de um banco de dados de soluções de projeto, baseados no processo de MA selecionado e na aplicação do produto, é possível estabelecer, de forma prévia, um conjunto de técnicas de desenvolvimento de geometrias que podem ser aplicados no produto. Por exemplo, no desenvolvimento do sistema de travas da linha de freio, foram estabelecidas estratégias para o projeto de peças que necessitam de grandes deformações para montagem ou funcionamento, através da utilização de regiões vazias na geometria da peça. Os resultados obtidos no projeto poderiam ser aplicados em diversas situações e possibilitar a catalogação dessas estratégias de projeto de peças poderia facilitar a adoção da MA para outros componentes que possuam requisitos similares.

O uso da sistemática para desenvolvimento dos produtos foi diferente para cada situação. Para o envólucro de bateria todas etapas da sistemática foram performadas, definindo um desenvolvimento que partiu das etapas iniciais de projeto com justificativas de uso da MA à partir das estimativas preliminares de projeto e produção. Para os outros dois produtos, a MA não era justificada pelas características levantadas, porém, o desenvolvimento continuou sendo enviesado para o processo de FFF por estratégias de produção da empresa e por representarem economias no desenvolvimento quando analisado todo ciclo de vida do produto, principalmente do desenvolvimento. Aproveitando da característica da MA de não necessitar da fabricação de moldes ou gabaritos para produção de peças. Essa fato reforça a necessidade de incorporação de soluções de

MA para indústrias e empresas desde o início do desenvolvimento de produtos, tendo em vista que soluções viáveis, técnica e economicamente, podem suprir necessidades específicas na fabricação de componentes de uso final.

O uso da sistemática é definido como o desenvolvimento de produtos para MA. O estudo de caso comprova sua utilização para o desenvolvimento de produtos de baixa complexidade, possibilitando o uso da sistemática durante as diversas etapas de desenvolvimento de um produto até a obtenção de um produto final. O estudo de caso foi estruturado em um lote piloto de fabricação de um modelo de motocicletas, de forma a contornar possíveis riscos e falhas que a incorporação da MA como método de produção poderia acarretar. As peças desenvolvidas no estudo estão sendo utilizadas pela empresa, em uso ambiente controlado. Até a publicação desse trabalho apresentam resultados satisfatórios e estão sendo mapeadas para utilização na fabricação de lotes de produção em série dos modelos atuais e futuros lançados pela empresa.

Analisando o caráter de fluxo, que foi estabelecido como um dos objetivos no desenvolvimento da sistemática, é possível utilizar a sistemática para o ensino da MA e sua aplicabilidade para desenvolvimento de produtos. Adaptar um curso à partir das etapas e atividades definidas seria um processo simples, mas que dependeria da seleção de ferramentas de PDP para ser estabelecido de forma clara e didática.

6.1 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros para a continuidade do presente trabalho destaca-se inicialmente a aplicação da metodologia utilizada para adaptar a sistemática para o processo de FFF para as demais tecnologias de MA. Propiciando a especificação para mais processos de MA a sistemática se torna uma metodologia universal de desenvolvimento de produtos para MA.

Etapas e atividades foram desenvolvidas de forma genérica, sem especificar ferramentas de PDP necessárias para obter os resultados esperados. Por exemplo, na atividade de levantamento de requisitos de produto da etapa de análise de viabilidade, não foram descritas ferramentas para definir esses requisitos, que fazem parte da entrega final do projeto informacional. Dessa forma, o uso da sistemática fica pautado em conhecimento prévio do usuário. Para possibilitar o uso didático da sistemática essas ferramentas devem ser elencadas, permitindo a utilização da metodologia de projeto por usuários com pouco conhecimento prévio da teoria de desenvolvimento de produtos.

Para ampliar a robustez da sistemática de desenvolvimento de produtos para MA é necessário desenvolver com maior detalhes e clareza a atividade de análise de adequação das tecnologias de MA com os requisitos de produto, realizando uma metodologia de análise de viabilidade econômica e técnica. A sistemática desenvolvida possui como base a ISO:ASTM 52910:2018 para a tomada de decisão e assim como a norma, possui indicativos de como realizar a análise

de viabilidade, porém ainda baseado na características do produto, sem estabelecer como cada característica influencia no processo de decisão e quais estratégias podem ser usadas para mitigar desvantagens ou tirar maior proveito de vantagens.

Desenvolver a atividade de otimizações envolvendo os conceitos de DfMA também caracteriza uma necessidade de trabalho futuro, a aplicação de análise de esforços ainda é incipiente para a MA, principalmente as tecnologias que apresentam maior influência da etapa de fabricação na resistência final, como a própria FFF. O desenvolvimento de algoritmos de otimização que levam em consideração os processos de adição de material é um campo da MA que tem apresentado crescente número de publicações e desenvolvimento de softwares comerciais. Dessa forma, os processos de otimização de estruturas é essencial para estabelecer uma metodologia completa de desenvolvimento de produtos. A otimização como ferramenta de projeto permite maximizar a utilização da MA como meio de produção, permitindo a fabricação de geometrias complexas, impossíveis de serem economicamente fabricadas por outros meios de fabricação.

Ferramentas de simulação do processo também possuem pouca aplicação pela excessiva complexidade. Porém, assim como ferramentas de análise virtual de geometrias, tem observado grandes avanços em publicações recentes e também deveriam ser adicionadas à sistemática. A simulação de processos tende a aumentar a confiabilidade das fabricações envolvendo tecnologias de MA, retirando dos meios produtivos a necessidade de validar cada lote de forma empírica.

Como última sugestão de trabalho futuro, o estabelecimento de um banco de dados de DfMA é uma necessidade apontada de forma específica em Renjith, Park e Kremer (2020) e Dinar e Rosen (2017). A documentação de métodos e conceitos de solução facilitariam a adoção da MA como processo produtivo em diversos setores, facilitando a adoção da MA por projetistas e ampliando sua utilização. O banco de dados poderia auxiliar nas atividades de ideação de concepções para um produto, indicando soluções para comportamentos específicos para produtos e materiais. Além de possuírem guias para as 5 atividades de análise dentro da sistemática, sendo essas a análise de potencial da MA, adequação dos requisitos de produto à MA e posterior seleção de tecnologia de MA, otimizações de DfMA, análise de visualização de processo, análise de validação de peça (revisão DfMA) e análise de lote.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, W. J. d. *Otimização estrutural de protótipos fabricados pela tecnologia FDM utilizando o método dos elementos finitos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.

ANDREASEN, M. M. 45 years with design methodology. *Journal of Engineering Design*, Taylor & Francis, v. 22, n. 5, p. 293–332, 2011.

ASADOLLAHI-YAZDI, E.; GARDAN, J.; LAFON, P. Integrated design for additive manufacturing based on skin-skeleton approach. *Procedia CIRP*, Elsevier, v. 60, n. 2212, p. 217–222, 2017.

BACK, N. et al. Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem. Barueri: Manole, 2008.

BARDALES, A. M. C. Modelo de estimativa de custos para as fases iniciais do projeto de produto mecatrônico. 2013.

BOOTH, J. W. et al. 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.

BOYARD, N. et al. A design methodology for parts using additive manufacturing. In: *6th International Conference on Advanced research in Virtual and rapid prototyping*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 399–404.

BROWN, T.; KATZ, B. *Design Thinking: uma metodologia poderosa para decretar o fim das velhas ideias*. [S.l.]: Harper Business, 2019.

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.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. d. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. *Trabalho apresentado*, v. 8, 2011.

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.

DERADJAT, D.; MINSHALL, T. Decision trees for implementing rapid manufacturing for mass customisation. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Elsevier, 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.
- GARCÍA-DOMINGUEZ, A.; CLAVER, J.; SEBASTIÁN, 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, 2020.
- GARCÍA-DOMINGUEZ, A.; CLAVER, J.; SEBASTIÁN, 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, 2020.
- GIBSON, I. et al. *Additive manufacturing technologies*. [S.l.]: Springer, 2014. v. 17.
- GÓRSKI, F. et al. 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. p. 403–413.
- HART, O.; MOORE, J. Default and renegotiation: A dynamic model of debt. *The Quarterly Journal of Economics*, MIT Press, v. 113, n. 1, p. 1–41, 1998.
- HAUSER, J. R.; CLAUSING, D. et al. *The house of quality*. Harvard Business Review Boston, MA, 1988.
- KROL, T.; SEIDEL, C.; ZAEH, M. Prioritization of process parameters for an efficient optimisation of additive manufacturing by means of a finite element method. *Procedia Cirp*, Elsevier, v. 12, p. 169–174, 2013.
- KUMKE, M.; WATSCHKE, H.; VIETOR, T. A new methodological framework for design for additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, Taylor & Francis, v. 11, n. 1, p. 3–19, 2016.
- KWONG, C. K. et al. A methodology of determining aggregated importance of engineering characteristics in qfd. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 53, n. 4, p. 667–679, 2007.
- LAVERNE, F. et al. 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, n. 12, 2015.
- LI, L. et al. Multi-view feature modeling for design-for-additive manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*, Elsevier, v. 39, p. 144–156, 2019.
- MANÇANARES, C. G. et al. Additive manufacturing process selection based on parts' selection criteria. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 80, n. 5-8, p. 1007–1014, 2015.

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

MICHOPOULOS, J. et al. Performance signature qualification for additively manufactured parts under conditions emulating in-service loading. *Structural Integrity of Additive Manufactured Parts*, p. 550–572, 2020.

MICHOPOULOS, J. G.; STEUBEN, J. C.; ILIOPOULOS, A. P. Differential performance signature qualification for additively manufactured parts. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. [S.l.], 2018. v. 51722, p. V01AT02A045.

PARITALA, P. K.; MANCHIKATLA, S.; YARLAGADDA, P. K. Digital manufacturing-applications past, current, and future trends. *Procedia engineering*, Elsevier, v. 174, p. 982–991, 2017.

PONCHE, R. et al. A new global approach to design for additive manufacturing: A method to obtain a design that meets specifications while optimizing a given additive manufacturing process is presented in this paper. *Virtual and physical prototyping*, Taylor & Francis, v. 7, n. 2, p. 93–105, 2012.

PONCHE, R. et al. A novel methodology of design for additive manufacturing applied to additive laser manufacturing process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, v. 30, n. 4, p. 389–398, 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.

REICHWEIN, J. et al. On the applicability of agile development methods to design for additive manufacturing. *Procedia CIRP*, Elsevier, v. 91, p. 653–658, 2020.

RENJITH, S. C.; PARK, K.; KREMER, G. E. O. A design framework for additive manufacturing: Integration of additive manufacturing capabilities in the early design process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Springer, v. 21, n. 2, p. 329–345, 2020.

REPRAP. *RepRap:About*. 2020. Disponível em: <<https://reprap.org/wiki/About>>.

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

ROHDE, J. et al. Standardised product development for technology integration of additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, Taylor & Francis, v. 14, n. 2, p. 141–147, 2019.

ROSEN, D. W. Computer-aided design for additive manufacturing of cellular structures. *Computer-Aided Design and Applications*, Taylor & Francis, v. 4, n. 5, p. 585–594, 2007.

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. *São Paulo: Saraiva*, 2006.

- RUCKLE, B. et al. *Functional Design for 3D Printing*. [S.l.]: Clifford Smyth, 2017. v. 3.
- RUSSELL, R. Nasa's efforts for the development of standards for additive manufactured components. *Structural Integrity of Additive Manufactured Parts*, p. 573–581, 2018.
- SHAW, J. A schema approach to the formal literature review in engineering theses. *System*, Elsevier, v. 23, n. 3, p. 325–335, 1995.
- STENDER, M. E. et al. A thermal-mechanical finite element workflow for directed energy deposition additive manufacturing process modeling. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 21, p. 556–566, 2018.
- THOMPSON, M. K. et al. Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP annals*, Elsevier, v. 65, n. 2, p. 737–760, 2016.
- TOFAIL, S. A. et al. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, Elsevier, v. 21, n. 1, p. 22–37, 2018.
- TOMIYAMA, T. et al. Design methodologies: Industrial and educational applications. *CIRP annals*, Elsevier, v. 58, n. 2, p. 543–565, 2009.
- TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, Emerald Group Publishing Limited, 2014.
- TYMRAK, B.; KREIGER, M.; PEARCE, J. M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-d printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, Elsevier, v. 58, p. 242–246, 2014.
- ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. *Product Design and Development*. [S.l.]: Irwin/McGraw-Hill, 2011.
- VANEKER, T. et al. Design for additive manufacturing: Framework and methodology. *CIRP Annals*, Elsevier, v. 69, n. 2, p. 578–599, 2020.
- WIBERG, A.; PERSSON, J.; ÖLVANDER, J. Design for additive manufacturing—a review of available design methods and software. *Rapid Prototyping Journal*, Emerald Publishing Limited, 2019.
- 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.
- ZAMAN, U. K. uz et al. Integrated design-oriented framework for resource selection in additive manufacturing. *Procedia CIRP*, Elsevier, v. 70, p. 96–101, 2018.

ZHANG, Y.; CHOU, K. A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 222, n. 8, p. 959–968, 2008.

ZHANG, Y.; CHOU, Y. K. 3d fea simulations of fused deposition modeling process. In: *International Manufacturing Science and Engineering Conference*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 47624, p. 1121–1128.

ZHU, Y. et al. An improved density-based design method of additive manufacturing fabricated inhomogeneous cellular-solid structures. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Springer, v. 21, n. 1, p. 103–116, 2020.

7. ANEXO 1

Normas Ativas de Manufatura Aditiva regidas pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM)

Comitê responsável	Norma
F42.01 Metodologias de teste	F2971-13 Prática Padrão para Relatórios de Dados para Amostras de Teste Preparadas por Manufatura Aditiva
	F3122-14 Guia padrão para avaliação de propriedades mecânicas de materiais metálicos feitos por meio de processos de manufatura aditiva
	ISO / ASTM52902-19 Manufatura aditiva - Artefatos de teste - Avaliação da capacidade geométrica de sistemas de manufatura aditiva
	ISO / ASTM52921-13 (2019) Terminologia padrão para manufatura aditiva - Sistemas de Coordenadas e Metodologias de Teste
	ISO / ASTM52907-19 Manufatura Aditiva - Materiais de alimentação - Métodos para caracterizar pós metálicos
F42.02 Projeto	F3413-19 Guia para Manufatura Aditiva - Projeto - Direct Energy Deposition
	ISO/ASTM52910-18 Manufatura Aditiva - Projeto - Requisitos, diretrizes e recomendações
	ISO / ASTM52911-1-19 Manufatura Aditiva - Projeto - Parte 1: Fusão de metais em leito de pó à base de laser
	ISO / ASTM52911-2-19 Manufatura Aditiva - Projeto - Parte 2: Fusão de polímeros em leito de pó à base de laser
	ISO / ASTM52915-20 Especificação para formato de arquivo de manufatura aditiva (AMF) Versão 1.2
F42.04 Materiais e Processos	F2924-14 Especificação padrão para manufatura aditiva ti-6 al-4 v com fusão de leito de pó
	F3001-14 Especificação padrão para manufatura aditiva de ti-6 al-4 v (ELI) com fusão de leito de pó
	F3049-14 Guia Padrão para Caracterizar Propriedades de Pós de Metal Usados para Processos de Manufatura Aditiva
	F3055-14a Especificação padrão para manufatura aditiva de liga de níquel (UNS N07718) com fusão de leito de pó
	F3056-14e1 Especificação padrão para manufatura aditiva de liga de níquel (UNS N06625) com fusão de leito de pó
	F3091/F3091M-14 Especificação padrão de manufatura aditiva para fusão de leito de pó de materiais plásticos

	F3184-16 Especificação padrão para manufatura aditiva de liga de aço inoxidável (UNS S31603) com fusão de leito de pó
	F3187-16 Guia Padrão para Direct Energy Deposition de Metais
	F3213-17 Padrão para Manufatura Aditiva - Propriedades da Peça Acabada - Especificação Padrão para Co-28 Cr-6 Mo via Fusão em Leito de Pó
	F3301-18a Padrão para Manufatura Aditiva - Métodos de pós-processamento - Especificação padrão para peças metálicas de pós-processamento térmico feitas por fusão de leito de pó
	F3302-18 Padrão para Manufatura Aditiva - Propriedades da peça acabada - Especificação padrão para ligas de titânio via fusão de leito de pó
	F3318-18 Padrão para Manufatura Aditiva - Propriedades da Peça Acabada - Especificação para Al Si-10 Mg com Fusão em Cama de Pó - Feixe de Laser
	F3434-20 Guia para fabricação de aditivos - Instalação / Operação e qualificação de desempenho (IQ / OQ / PQ) de equipamento de fusão de leito de pó de feixe de laser para fabricação de produção
	ISO / ASTM52901-16 Guia padrão para Manufatura Aditiva - Princípios gerais - Requisitos para peças de MA adquiridas
	ISO / ASTM52904-19 Manufatura Aditiva - Características e desempenho do processo: Prática para o processo de fusão de cama de pó metálico para atender a aplicações críticas
	ISO / ASTM52903-20 Manufatura Aditiva - manufatura aditiva à base de extrusão de materiais de materiais plásticos - Parte 1: Materiais de alimentação
	ISO / ASTM52903-2-20 Manufatura Aditiva - manufatura aditiva à base de extrusão de materiais de materiais plásticos - Parte 2: Equipamento de processo
F42.07 Aplicações	ISO / ASTM52942-20 Manufatura Aditiva - Princípios de qualificação - Qualificação de operadores de máquinas de fusão de pó metálico a laser e equipamentos usados em aplicações aeroespaciais
	ISO / ASTM52941-20 Manufatura Aditiva - Desempenho e confiabilidade do sistema - Testes de aceitação para máquinas de fusão a laser de leito de pó metálico para materiais metálicos para aplicação aeroespacial
F42.91 Terminologia	ISO / ASTM52900-15 Terminologia padrão para Manufatura Aditiva - Princípios gerais - Terminologia