

Lucas Silva Yoshida

**Sistematização do projeto para manufatura aditiva no  
desenvolvimento de produtos: contribuições ao processo baseado em  
extrusão de material**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do Grau  
de Mestre em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique  
Ahrens  
Co-orientador: Prof. Dr. Fernando  
Antônio Forcellini

Florianópolis  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária  
da UFSC.

Yoshida, Lucas Silva

Sistematização do projeto para manufatura aditiva no desenvolvimento de produtos: contribuições ao processo baseado em extrusão de material / Lucas Silva Yoshida ; orientador, Carlos Henrique Ahrens, coorientador, Fernando Antônio Forcellini, 2018. 192 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Manufatura Aditiva. 3. DFAM. 4. Processo de desenvolvimento de produtos. 5. Processo baseado em extrusão de material. I. Ahrens, Carlos Henrique. II. Forcellini, Fernando Antônio. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Lucas Silva Yoshida

**Sistematização do projeto para manufatura aditiva no desenvolvimento de produtos: contribuições ao processo baseado em extrusão de material**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Florianópolis, 14 de dezembro de 2018.

---

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Milton Pereira, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Diego de Castro Fettermann, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Este trabalho é dedicado aos  
engenheiros de desenvolvimento de  
produto brasileiros



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a minha família pelo apoio durante este período de grandes mudanças.

Ao meu grande amigo e terceiro orientador Guilherme Loureiro. Seus conselhos durante todos estes anos foram muito além de auxiliar a realizar este trabalho, me ajudaram a ter uma visão mais humana da vida.

Aos professores orientadores Carlos Henrique Ahrens e Fernando Antônio Forcellini por me acolher no início e pelos ensinamentos no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

A CAPES pelo auxílio financeiro em forma de bolsas de estudo, sendo este apoio muito importante para viabilizar meus estudos.

Aos departamentos NIMMA e GEPPS da UFSC.

Aos meus amigos de uma vida inteira: David Morghetti, Ivan Dias, Paula Mattos e Rafael Mattazio. Vocês são inspiradores para mim mesmo à distância.

À minha instituição de formação, a saudosa Escola de Engenharia de São Carlos – USP. À professora Zilda Silveira e aos meus amigos de “Zhao Grupo”: Adriano, Alex, Denys, Douglas, Marlon e Maurício.

Às pessoas que contribuíram para a minha experiência profissional como engenheiro de desenvolvimento de produtos, em especial: Jaime Oyama, Adilson Bazzuco e Marcus Portari.

Aos meus amigos: Danilo Dellarozza pelas conversas e incentivos iniciais para me encorajar nesta jornada e Luciano Lins por me introduzir ao mundo da manufatura aditiva.

À Natalia pelo companheirismo, cuidado, carinho e apoio na reta final.

Aos meus colegas que tive o prazer de conhecer através da UFSC e do Worms, em especial: Antonio Edson, Adriano Schommer, Rafael Veras, Paulo Zen e Heitor Kagueiama.

Aos professores do curso de manutenção automotiva do IFSC. Obrigado pela oportunidade, pelos ensinamentos e agradável ambiente de trabalho.

Agradecimento especial a você que está lendo este trabalho. Espero contribuir de alguma forma em seu conhecimento.



*In War:* Resolution,  
*In Defeat:* Defiance,  
*In Victory:* Magnanimity,  
*In Peace:* Good will.  
(Sir Winston Churchill, 1959)



## RESUMO

Durante a última década, a manufatura aditiva tem se tornado uma opção de vantagem competitiva para aplicações industriais e amadoras pela redução de custos com maquinário, matéria-prima e, especialmente, pela popularização da tecnologia do processo baseado em extrusão de material. Este tipo de manufatura explora novas complexidades e tem a capacidade de produzir uma vasta variedade de formas e geometrias customizadas em pequenos lotes de produção. Neste contexto – e visando suprir uma lacuna de conhecimento sobre o processo e sua aplicação – é realizada a sistematização do projeto para manufatura aditiva no processo de desenvolvimento de produtos. A sistematização associa as atividades da macro fase de desenvolvimento com o conhecimento sobre a manufatura aditiva e então sugere propostas de atividades complementares. Casos de aplicação com e sem a sistematização foram avaliados comparativamente por meio da interpretação das propostas dentro de um contexto de projeto. A verificação mediante estudo destes casos mostrou que o referencial teórico e a sistematização fornecem uma base consistente para suprir a lacuna de conhecimento, contribuindo para o desenvolvimento de produtos quando utilizam a manufatura aditiva.

**Palavras-chave:** DFAM, Manufatura Aditiva; Processo de desenvolvimento de produtos; Processo baseado em extrusão de material.



## ABSTRACT

During the last decade, additive manufacturing has become a competitive advantage option for industrial and amateur applications due machinery cost-cutting, raw material and especially by popularization of material extrusion-based process. This kind of manufacturing explores new complexities and has capacity to produce a wide variety of custom shapes and geometries in small production batches. In this context and aiming to fit a knowledge lack about the process and its application, the systematization of design for additive manufacturing in the product development process is carried out. The systematization correlates the activities of the macro phase of development with the knowledge about additive manufacturing and then suggest proposals for complementary activities. Applications cases with and without the systematization were comparatively evaluated through the proposals interpretation inside a design context. The verification through the study of these cases showed that the theoretical background and systematization provide a consistent basis to fill the knowledge lack, thus contributing to the development of products using additive manufacturing

**Keywords:** DFAM, Additive Manufacturing, Product development process, Material extrusion-based process.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo SECI .....	32
Figura 2 - <i>Systematic Search Flow</i> .....	33
Figura 3 - Organização dos capítulos .....	36
Figura 4 - Estrutura do capítulo 2.....	37
Figura 5 - Palavras-chave da estratégia de busca. Em tracejado termos relacionados à manufatura aditiva.....	38
Figura 6 - Sequência do processo de manufatura aditiva .....	41
Figura 7 - Refinamento de malha em arquivo formato STL .....	41
Figura 8 - Classificação dos processos de manufatura aditiva .....	44
Figura 9 - Princípio do processo baseado em extrusão FDM da <i>Stratasys</i> .....	46
Figura 10 - Fatores de influência na implementação da manufatura aditiva .....	47
Figura 11 - Duas famílias de peças onde o aumento da complexidade contribuiu para redução de peso.....	49
Figura 12 - Modelo de junta esférica comum impressa.....	50
Figura 13 - Disposição durante o encaixe tipo <i>snap-fit</i> .....	51
Figura 14 - Trajetória do cabeçote para fabricação do dente de encaixe .....	51
Figura 15 - Célula unitária octaédrica (à esq.) e exemplo de construção (à dir.) .....	52
Figura 16 - Pá de turbina com sensor instalado na base .....	53
Figura 17 - Ligações semânticas dos potenciais da manufatura aditiva .....	54
Figura 18 - Matriz Volume-Variedade de produtos .....	56
Figura 19 - Framework para DfAP.....	57
Figura 20 - Framework de implementação da manufatura aditiva para customização em massa .....	58
Figura 21 - Uso do CIFP no processo de desenvolvimento de produtos.....	59
Figura 22 - Interação para gerar a solução funcional comum. ....	61
Figura 23 - Interação com o uso da manufatura aditiva. ....	61
Figura 24 - Proposta de eA-DFAM otimizado .....	63
Figura 25 - Composição do custo de produto.....	66
Figura 26 - Aumento do percurso linear do cabeçote no preenchimento da seção.....	69
Figura 27 - Comportamento de custo em função da complexidade ou customização .....	69
Figura 28 - Custo marginal em função da economia de escala (a) e qualidade/tempo (b).....	70

Figura 29 - Precisão dimensional em termos de classes IT para diferentes faixas de dimensões básicas.....	74
Figura 30- Modelo CAD com geometrias comuns para componentes mecânicos.....	74
Figura 31 - Divisão de componente em 2 peças, uma produzida por manufatura aditiva e ou por subtração de material .....	75
Figura 32 - Peça aeronáutica. Otimizada impressa (à esq.) e usinada convencionalmente (à dir.).....	77
Figura 33 - Comparação entre a cadeia de suprimentos tradicional e moderna com manufatura aditiva.....	79
Figura 34 - Bomba dispersora de bolhas. No detalhe acima, peça convencional. Abaixo, peça impressa. ....	81
Figura 35 - Modelo de Referência .....	86
Figura 36 - Ano de publicação dos artigos selecionados .....	88
Figura 37 - Classificação do DFAM no sentido amplo e estrito. ....	93
Figura 38 - Estrutura do capítulo 3 .....	97
Figura 39 - Organização da sistematização.....	98
Figura 40 - Áreas de conhecimento no desenvolvimento de produto ...	99
Figura 41 - Atividades na fase de projeto Informacional.....	101
Figura 42 - Atividades na fase de projeto Conceitual .....	109
Figura 43 - Relações entre DFM, DFA, DFD e DFMA.....	113
Figura 44 - Ciclos do projeto detalhado.....	117
Figura 45 - Atividades na fase de projeto Detalhado .....	118
Figura 46 - Condições de carga a tração e flexão. Baixa resistência à esq. e alta resistência à dir. ....	122
Figura 47 - Lógica de seleção de máquinas de manufatura aditiva.....	124
Figura 48 - Atividades na fase de Preparação da Produção .....	130
Figura 49 - Atividades na fase de lançamento .....	134
Figura 50 - Estrutura do capítulo 4 .....	138
Figura 51 - Impressora 3D doméstica UP Mini .....	139
Figura 52 - Cabeçote da máquina UP Mini.....	140
Figura 53 - Estrutura do cabeçote e indicação das <i>Data Features</i> [cotas em mm] .....	140
Figura 54 - Fluxo de ações de atendimento ao cliente para o caso sem a sistematização .....	142
Figura 55 - Comportamento do preço médio na cotação para injeção	144
Figura 56 - Fluxo de ações de atendimento ao cliente para o caso AM .....	146
Figura 57 - Estruturas impressas, à esq. menor uso de material e à dir. menor tempo de impressão .....	148
Figura 58 - Representação em escala do sistema de transmissão.....	154

Figura 59 - Protótipos em madeira por manufatura tradicional.....	156
Figura 60 - Protótipo impresso com o acoplamento de encaixe rápido fixado .....	156
Figura 61 - Relação das propostas nos estudos de caso .....	158
Figura 62 - Peça de reposição com preço fixado e a pronta entrega ...	181
Figura 63 - Peça de reposição com preço sob consulta .....	182
Figura 64 - Peça de reposição com estoque esgotado .....	183
Figura 65 - Cotação Only3D Limited's Hub.....	184
Figura 66 - Cotação Flux Design's Hub.....	185
Figura 67 - Cotação Ara's Hub .....	186
Figura 68 - Configurações do pedido do produto.....	187
Figura 69 - Cotação RexRoi LLC .....	187
Figura 70 - Cotação Oppus Locus.....	188
Figura 71 - Cotação PRODPOINT Ltd. ....	188
Figura 72 - Evolução das notas médias da amostra dos integrantes com menos tempo de equipe.....	189
Figura 73 - Evolução das notas médias da amostra dos integrantes com mais tempo de equipe.....	189
Figura 74 - Evolução das notas médias da amostra dos integrantes com menos tempo de curso.....	190
Figura 75 - Evolução das notas médias da amostra dos integrantes com mais tempo de curso.....	190
Figura 76 - Evolução das notas médias da amostra de integrantes exceto os do curso de engenharia mecânica .....	191
Figura 77 - Evolução das notas médias da amostra de integrantes do curso de engenharia mecânica .....	191



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Impacto do mercado no processo de desenvolvimento de produtos.....	84
Quadro 2 - Relação dos artigos selecionados de acordo com o banco de dados .....	88
Quadro 3 - Artigos da seleção final para revisão .....	89
Quadro 4 - Análise dos artigos selecionados para a revisão bibliográfica .....	90
Quadro 5 - Classificação da revisão bibliográfica em fases de desenvolvimento de produto de Pahl et al. (2007) .....	95
Quadro 6 - Descrição das principais referências .....	96
Quadro 7 - Planilha de organização e desenvolvimento das 4 etapas iniciais da sistemática.....	99
Quadro 8 - Organização dos temas para abordagem sobre especificações-meta .....	105
Quadro 9 - Resumo das propostas da fase de Projeto Informacional..	107
Quadro 10 - Resumo das propostas da fase de Projeto Conceitual .....	115
Quadro 11 - Resumo das propostas da fase de Projeto Detalhado .....	128
Quadro 12 - Resumo das propostas da fase de Preparação da produção .....	132
Quadro 13 - Resumo das propostas da fase de Lançamento do produto .....	136
Quadro 14 - Organização dos temas para reflexão da abordagem AM153	
Quadro 15 - Planilha Fase de projeto informacional.....	173
Quadro 16 - Planilha Fase de projeto conceitual.....	175
Quadro 17 - Planilha Fase de projeto detalhado.....	177
Quadro 18 - Planilha Fase de preparação da produção .....	180
Quadro 19 - Planilha Fase de lançamento .....	180
Quadro 20 - Matriz de Pugh de avaliação dos modelos de volante.....	192



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de busca de termos semelhantes de acordo com período.....	39
Tabela 2 - Avaliação de métodos de projeto para ideação e consolidação de peças no contexto do DfAM.....	60
Tabela 3 - Definição dos fatores de custo .....	67
Tabela 4 - Visão geral das classes IT para diversos processos de manufatura.....	72
Tabela 5 – Tolerância-padrão possível e posições de zona de tolerância de acordo com a norma DIN EN ISO 286-1 .....	73
Tabela 6 - Áreas de conhecimento envolvidas nas atividades da fase do projeto Informacional que foram alvo de propostas.....	107
Tabela 7 - Áreas de conhecimento envolvidas nas atividades da fase do projeto conceitual que foram alvo de propostas. ....	116
Tabela 8 - Exemplo: Escala de importância para peças de engenharia	124
Tabela 9 - Áreas de conhecimento envolvidas nas atividades da fase do projeto detalhado que foram alvo de propostas.....	127
Tabela 10 - Áreas de conhecimento envolvidas nas atividades da fase de preparação da produção que foram alvo de propostas.....	133
Tabela 11 - Áreas de conhecimento envolvidas na atividade da fase de lançamento que foi alvo de proposta. ....	136
Tabela 12 - Quantidade de atividades do PDP abordadas e propostas por fase .....	137
Tabela 13 - Envolvimento das propostas nas áreas de conhecimento. ....	137
Tabela 14 - Simulação de cotação para o processo de Injeção.....	144
Tabela 15 - Parâmetros e orientação de impressão .....	148
Tabela 16 - Simulação de cotação para o processo de AM.....	149
Tabela 17 - Comparação entre os cenários.....	151



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3DP – *3D Printing*  
ABS – *Acrylonitrile Butadiene Styrene*  
AM – *Additive Manufacturing*  
AM – *Manufatura Aditiva*  
AMF – *Additive Manufacturing Format*  
BOM – *Bill of Material*  
CAD – *Computer Aided Design*  
CAE – *Computer Aided Engineering*  
CIFP – *Customer Involvement through Functional Prototypes*  
CJP – *ColorJet Printing*  
DFA – *Design for Assembly*  
DFAM – *Design for Additive Manufacturing*  
DFAP – *Design for AM – Facilitated Personalization*  
DFD – *Design for Disassembly*  
DFM – *Design for Manufacturing*  
DFMA – *Design for Manufacturing and Assembly*  
DFP – *Design for Personalization*  
DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*  
FDM – *Fused Deposition Modeling*  
FSAE – *Fórmula SAE*  
IT – *International Tolerance*  
LCM – *Life Cycle Management*  
MJP – *MultiJet Printing*  
PD – *Product Development*  
PDP – *Processo de Desenvolvimento de Produtos*  
PETG – *Polyethylene terephthalate glycol-modified*  
PLA – *Polylactic Acid*  
PLC – *Product Life Cycle*  
SLM – *Selective Laser Melting*  
SLS – *Selective Laser Sintering*  
SSC – *Sistema, Subsistema e Componente*  
STL – *Standard Tessellation Language*  
TDP – *Three-Dimensional Printing (3DP™ MIT)*  
UFSC – *Universidade Federal de Santa Catarina*



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	27
<b>1.1.1</b>	<b>Motivação.....</b>	<b>28</b>
1.2	FORMALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	29
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO .....	30
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>30</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>30</b>
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	31
<b>1.4.1</b>	<b>Referentes ao método de pesquisa .....</b>	<b>31</b>
<b>1.4.2</b>	<b>Referentes à pesquisa do referencial teórico.....</b>	<b>33</b>
1.5	LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	34
1.6	CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS .....	35
1.7	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	35
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>37</b>
2.1	MANUFATURA ADITIVA: ESTADO DA ARTE.....	40
<b>2.1.1</b>	<b>Conceitos Fundamentais.....</b>	<b>40</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Atividades gerais do processo de manufatura aditiva .....</b>	<b>40</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Tecnologias de manufatura aditiva .....</b>	<b>43</b>
2.1.3.1	Processo baseado em extrusão de material .....	45
<b>2.1.4</b>	<b>Manufatura aditiva no ciclo de vida do produto.....</b>	<b>46</b>
2.1.4.1	Fatores de influência para implementação da AM.....	46
2.1.4.2	Complexidades.....	48
2.1.4.3	Customização em massa .....	55
2.1.4.4	Influência em métodos de ideação .....	60
2.1.4.5	Custo e Tempo de construção .....	63
2.1.4.6	Qualidade e Precisão dimensional.....	72
2.1.4.7	Otimização e ferramentas computacionais.....	75
2.1.4.8	Limitações e Barreiras.....	77

2.1.4.9	Impacto na cadeia de suprimentos .....	78
2.1.4.10	Direitos autorais.....	80
2.2	PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS (PDP)	82
<b>2.2.1</b>	<b>Definições.....</b>	<b>82</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Características.....</b>	<b>83</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Modelos de referência.....</b>	<b>84</b>
2.3	<i>DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING (DfAM)</i> .....	87
2.4	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....	94
<b>3</b>	<b>SISTEMATIZAÇÃO DO DfAM PARA O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS .....</b>	<b>97</b>
3.1	FASE DE PROJETO INFORMACIONAL.....	100
<b>3.1.1</b>	<b>Revisar e Atualizar o Escopo do Produto .....</b>	<b>101</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Detalhar ciclo de vida do produto e definir seus clientes</b>	<b>103</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Definir especificações-meta do produto .....</b>	<b>103</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Monitorar a viabilidade econômico-financeira do produto</b>	<b>105</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Resumo das propostas da fase de Projeto Informacional</b>	<b>106</b>
3.2	FASE DE PROJETO CONCEITUAL.....	108
<b>3.2.1</b>	<b>Desenvolver princípios de solução para as funções.....</b>	<b>110</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Desenvolver as alternativas de solução para o produto.</b>	<b>111</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Definir arquitetura para o produto.....</b>	<b>111</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Analisar Sistemas, Subsistemas e Componentes .....</b>	<b>112</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Definir ergonomia e estética.....</b>	<b>113</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Selecionar a concepção do produto .....</b>	<b>114</b>
<b>3.2.7</b>	<b>Planejar o processo de manufatura macro/Definir plano macro de processo .....</b>	<b>114</b>
<b>3.2.8</b>	<b>Resumo das propostas da fase de Projeto Conceitual....</b>	<b>114</b>
3.3	FASE DE PROJETO DETALHADO.....	116
<b>3.3.1</b>	<b>Criar e detalhar SSCs, documentação e configuração ..</b>	<b>119</b>

3.3.2	Decidir por fazer ou comprar SSC .....	121
3.3.3	Planejar o processo de fabricação e montagem.....	121
3.3.4	Projetar recursos de fabricação .....	123
3.3.5	Avaliar SSCs, configuração e documentação do produto e processo	125
3.3.6	Otimizar Produto e Processo.....	125
3.3.7	Testar e Homologar produto.....	126
3.3.8	Resumo das propostas da fase de Projeto Detalhado.....	126
3.4	PREPARAÇÃO PARA A PRODUÇÃO .....	129
3.4.1	Otimizar produção .....	131
3.4.2	Desenvolver processo de produção .....	131
3.4.3	Resumo das propostas da fase de Projeto Detalhado.....	132
3.5	LANÇAMENTO DO PRODUTO .....	133
3.5.1	Desenvolver processo de assistência técnica .....	135
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	136
4	CASOS DE APLICAÇÃO DAS PROPOSTAS DA SISTEMATIZAÇÃO .....	138
4.1	ESTRATÉGIA DE REPOSIÇÃO DE PEÇAS EM ASSISTÊNCIA TÉCNICA – CASO DE APLICAÇÃO EM IMPRESSORAS 3D DOMÉSTICAS .....	139
4.1.1	Cenário tradicional sem a manufatura aditiva.....	141
4.1.2	Cenário com a manufatura aditiva.....	145
4.1.3	Considerações sobre os cenários .....	149
4.2	USO DE MODELOS EM ESCALA PARA DESENVOLVIMENTO E SELEÇÃO DE CONCEITOS – CASO DE APLICAÇÃO NO PROTÓTIPO FSAE.....	152
4.2.1	Uso de modelos em escala para o sistema de transmissão	154
4.2.2	Uso do protótipo de volante para o sistema de direção..	155
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	157
5	CONCLUSÃO .....	160

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>163</b>
<b>APÊNDICE A – PLANILHA DE DESENVOLVIMENTO DA SISTEMÁTICA.....</b>	<b>173</b>
<b>A.1 Projeto Informacional .....</b>	<b>173</b>
<b>A.2 Projeto Conceitual.....</b>	<b>175</b>
<b>A.3 Projeto Detalhado .....</b>	<b>177</b>
<b>A.4 Preparação da produção.....</b>	<b>180</b>
<b>A.5 Lançamento .....</b>	<b>180</b>
<b>ANEXO A – Fornecimento de peças UP3D .....</b>	<b>181</b>
<b>ANEXO B – Cotações de peças via AM simuladas via site 3D Hubs .....</b>	<b>184</b>
<b>ANEXO C – Cotações de peças via AM simuladas via site 3D Compare .....</b>	<b>187</b>
<b>ANEXO D – Avaliações sobre o sistema de transmissão do FSAE189</b>	
<b>ANEXO E – Avaliações sobre conceito de volante para o FSAE..</b>	<b>192</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Durante a última década, a manufatura aditiva (AM), também designada de impressão 3D, tem se tornado cada vez mais viável para aplicações domésticas e industriais pela redução nos custos de maquinário e matéria-prima, além da popularização da tecnologia pelo movimento “*Maker*”. O recurso da impressão 3D pode ser comparado com tecnologias disruptivas tal como livros digitais e downloads de músicas (BERMAN, 2012). A possibilidade de utilizar a tecnologia também é considerada como uma oportunidade de repensar a forma de se projetar e ser explorada para reduzir a taxa de problemas de projeto em fases avançadas.

Este processo de fabricação alcançar complexidades de forma e material. É possível construir uma variedade de formas e geometrias customizadas em pequenos lotes. Com relação aos materiais, podem ser utilizadas várias matérias-primas, complexidades de composições, inclusive com gradação de propriedades pela construção por camadas (ROSEN, 2007), além das aplicações em protótipos e peças de reposição.

A atividade de desenvolvimento de produtos é chave para um bom desempenho de uma organização. Fatores como qualidade, custo e tempo de entrega do produto no mercado são criteriosamente exigidos dos times de projeto. Somado a isto, o processo de desenvolvimento é fortemente influenciado pelas inovações tecnológicas, como a manufatura aditiva.

Espera-se que empresas detentoras de um processo estruturado de desenvolvimento de produtos busquem um conhecimento sólido e aplicado na nova tecnologia de manufatura aditiva para atingir uma vantagem competitiva, pois enquanto um recurso pode ter um enorme valor em potencial, o seu valor só poderá ser materializado quando for combinado com a correspondente capacidade (NEWBERT, 2008).

A vantagem competitiva é definida por Barney (1991) como o grau em que uma empresa reduz custos, explora oportunidades e neutraliza ameaças. É normalmente conceituada como a implementação de uma estratégia que não está sendo atualmente implementada pelas firmas concorrentes. Nos negócios, percebe-se que as vantagens competitivas são transitórias, assim as empresas devem ser ágeis em encontrar e explorar oportunidades enquanto buscam pelas próximas vantagens competitivas.

### 1.1.1 Motivação

Um processo de desenvolvimento de produtos sistematizado e documentado permite que as particularidades de cada projeto e da equipe de desenvolvimento sejam atendidas, garantindo a utilização das melhores práticas de projeto e um linguajar padronizado e único para toda a empresa (ROZENFELD et al., 2006).

Produtos otimizados por técnicas da manufatura aditiva podem se apresentar diferentemente daqueles projetados por métodos de produção convencional. Contudo, isto é um desafio para os engenheiros acostumados a projetar componentes via manufatura convencional que precisam adaptar sua maneira de explorar as capacidades da manufatura aditiva (SALONITIS, 2016).

Kumke e Watshke (2016) elaboraram uma revisão das abordagens do DFAM nos artigos analisados em seu trabalho e a relação entre os seus escopos e as respectivas fases de desenvolvimento de produto da VDI 2221. Os autores classificaram os artigos em: abordagem completa ou parcial com relação às quatro fases do desenvolvimento (Definição do problema; Projeto Conceitual; Projeto Preliminar; e Projeto Detalhado).

Segundo os autores, a literatura existente da pesquisa em *Design For Additive Manufacturing* (DFAM), no contexto da VDI 2221, revela oportunidades de pesquisa devido algumas limitações encontradas como: a compreensão do DFAM dentro de um contexto de desenvolvimento de produto em todas as suas fases; independência das abordagens do DFAM para específicas aplicações e limitada validade universal das boas práticas de projeto em manufatura aditiva.

O trabalho de Kumke e Watshke (2016) constata que a etapa de definição do problema (*clarification and definition of problem*) é a menos abordada pela bibliografia analisada e que existem poucas abordagens completas do processo, ou seja, para todas as fases, concentrando os estudos para a fase de projeto conceitual e detalhado. Para Goutier (2014), o mais comumente abordado é a análise de razões que o projeto com manufatura aditiva deve ser diferente do tradicional.

Sob o enfoque do conhecimento da manufatura aditiva no desenvolvimento de produtos, Laverne et al. (2015) realizaram um estudo sobre como este fator impacta nas sessões de criatividade na fase de projeto conceitual e mostraram que este ainda não está adaptado para as necessidades dos projetistas e não leva a um aumento de ideias aplicáveis na fase conceitual.

O conhecimento não estruturado e não fundamentado da manufatura aditiva afeta o incremento esperado de vantagem competitiva

do processo de desenvolvimento de produtos. Além da importância da preparação da força de trabalho, o conhecimento da tecnologia no modelo de desenvolvimento é atualmente esparso e, muitas vezes, subaproveitado pelo uso de abordagens tradicionais.

Com a difusão das impressoras 3D, é cada vez mais comum que integrantes de equipes de projeto tenham contato com a manufatura aditiva fora do ambiente profissional e recebam informação e/ou instrução de maneira informal e desestruturada. É natural também que este tipo de profissional seja levado a sugerir o uso, na empresa, desta tecnologia em uma modalidade financeiramente acessível, como a baseada em extrusão. Nesse contexto de implementação às avessas, o uso do recurso pode não configurar em uma vantagem competitiva, ou ainda, empresas que adquirem a tecnologia sem integrá-la ao seu setor de projetos, também recaem na mesma situação.

## 1.2 FORMALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A aplicação industrial da manufatura aditiva para produtos voltados ao usuário final é atualmente limitada e uma das barreiras é a falta de experiência e conhecimento sobre as capacidades e limitações desta relativamente nova tecnologia de manufatura. Metodologias e ferramentas apropriadas para suporte à engenharia de pesquisas anteriores estão normalmente limitadas a certos processos de manufatura aditiva ou elaboradas a específicos estágios de projeto (KUMKE e WATSHKE, 2016).

Esta barreira pode ser corroborada pela elaboração do documento *Seventh Framework Programme* em Verquin e Movchan (2014), programa autointitulado como “o futuro da política de pesquisas da União Européia” que entregou em 2014 o projeto SASAM (*Standardisation in Additive Manufacturing*) e, dentro deste projeto, o documento “*Guidelines for the development of EU standards in Additive Manufacturing*”.

O documento SASAM contribui para informar sobre estratégias de projeto para manufatura aditiva e sobre normalizações acerca de processos, materiais e testes. Entende-se que é uma iniciativa da comunidade europeia em suprir uma carência de conhecimento estruturado na área. Simpson e Williams (2017) abordam a importância de preparar a força de trabalho e do ensino da manufatura aditiva para suprir a demanda de capacitação da indústria, em consonância com a necessidade da fundamentação da competência.

Vaneker (2017) considera que, tanto na literatura científica quanto na popular, tem-se disponível muito conhecimento e informações não estruturadas de prós e contras da manufatura aditiva, reforçando mais uma vez a oportunidade de pesquisa. Ahuja et al. (2015) ainda atribuem a não aplicação suficiente da tecnologia de impressão em produtos do setor automotivo e aeroespacial devido a limitações tecnológicas, como tempo do processo e propriedades mecânicas e também pela falta de compreensão e apreciação pelo DFAM.

O problema a ser tratado nesta dissertação é a condição deficitária do desempenho de projetos no desenvolvimento de produtos de uma organização frente a utilização da manufatura aditiva baseada em extrusão de material. O problema tem como efeito uma perda com relação à vantagem competitiva de seus projetos e tem como causa, o entendimento não suficiente e desestruturado das especificidades da manufatura aditiva. O problema pode ser abrangido desde a não utilização do recurso pela insipiência acerca da tecnologia, baixo aproveitamento dos recursos ou até o uso de práticas equivocadas de projeto.

## 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.3.1 Objetivo geral

A partir da problemática apresentada, definiu-se o objetivo geral do presente estudo:

Sistematização do projeto para manufatura aditiva por extrusão de material no processo de desenvolvimento de produtos.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Para o atendimento do objetivo geral, se enquadram como objetivos específicos:

i. Identificar as especificidades da manufatura aditiva baseada em extrusão de material no contexto das atividades do desenvolvimento de produtos;

ii. Interpretar o projeto para a manufatura aditiva gerando contribuições na forma de propostas de atividades;

iii. Verificar o desempenho das contribuições da sistematização.

## 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As seções seguintes são relativas ao método de pesquisa a ser realizado, seja para a execução da revisão bibliográfica, desenvolvimento e/ou validação.

### 1.4.1 Referentes ao método de pesquisa

Segundo Pahl et al. (2007), procedimentos sistemáticos ajudam a tornar o processo de projeto mais compreensível e permitem que o assunto seja ensinado. É importante definir procedimentos de projeto que encontram boas soluções, sendo que devem ser flexíveis e ao mesmo tempo capazes de serem planejados, otimizados e verificados. Entretanto, isto não será alcançado se os projetistas não tiverem o domínio do conhecimento necessário e não conseguirem trabalhar de modo sistemático.

Derivado da teoria geral dos sistemas, Biancolino (2017) define sistema como um conjunto de partes diferenciadas em inter-relação umas com as outras, formando um todo organizado que possui uma finalidade, um objetivo constante.

Por sistematizar, segundo o dicionário Aurélio, entende-se a reduzir a um sistema, logo, a sistematização do Projeto para Manufatura Aditiva baseado em extrusão de material é definida para este trabalho como sistematizar o *Design For Additive Manufacturing* por meio de atividades, técnicas e/ou instruções inter-relacionadas, organizadas e que possuem um objetivo comum: o aumento da vantagem competitiva de projetos no processo de desenvolvimento de produtos de uma organização.

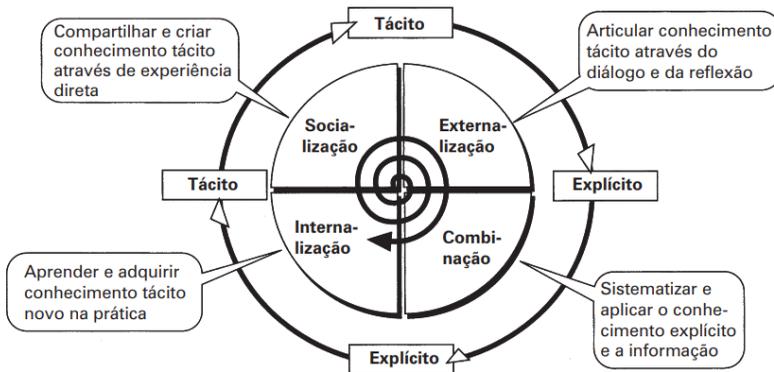
Para sistematizar é necessário generalizar o conhecimento existente em casos específicos. Deste modo, o método indutivo é empregado como abordagem científica mais ampla para este trabalho. Segundo Gil et al. (1999) apud Silva (2005), no método indutivo, as constatações particulares levam à elaboração de generalizações baseadas entre os fatos ou fenômenos.

Por meio de uma abordagem indutiva, pretende-se avançar na construção do conhecimento para generalizar informações e conhecimentos tácitos sobre o processo de manufatura aditiva, mais especificamente acerca do baseado em extrusão de material.

A atividade de combinar o conhecimento consiste em adequar diferentes conhecimentos explícitos, dando origem a outros (DIAS et al., 2011). Segundo Nonaka e Takeuchi (2008), a combinação também pode

ser descrita como: “*Sistematizar e aplicar o conhecimento explícito e a informação*”, vide Figura 1 a seguir sobre o processo SECI (Socialização, Externalização, Combinação e Internalização).

Figura 1 - Processo SECI



Fonte: Nonaka e Takeuchi (2008)

Quando um novo material é gerado por meio da combinação, outros profissionais podem internalizá-lo por meio do estudo. A internalização consiste em adquirir o conhecimento explícito, tornando-o em seu conhecimento tácito (DIAS et al, 2011) e a internalização está intimamente ligada com a organização do aprendizado (NONAKA e TAKEUCHI, 2008).

A sistemática proposta busca trazer informações dispersas e particulares sobre manufatura aditiva para uma tratativa generalizada explícita apoiada no Processo de Desenvolvimento de Produtos. Esse conhecimento então poderá ser internalizado para cada equipe de projeto para torná-lo tácito e aplicável para seus projetos de engenharia particulares.

Esta pesquisa é classificada, segundo Gil (1991) apud Silva (2005), de natureza aplicada com abordagem qualitativa e objetivos exploratórios. Os procedimentos técnicos utilizados são a pesquisa bibliográfica e casos de aplicação.

Pesquisa **aplicada** por gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigida para solução de problemas específicos. De abordagem **qualitativa** pela interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados no processo. Para Silva (2005), na pesquisa qualitativa, os pesquisadores tendem a analisar seus dados indutivamente. O processo e seu significado são os focos principais de abordagem. A pesquisa é

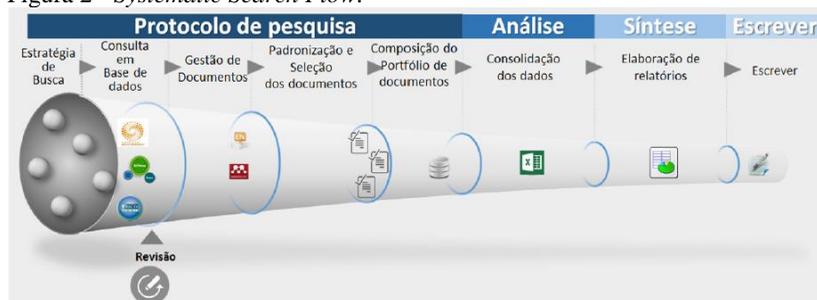
também classificada como de **objetivos exploratórios** por envolver levantamentos bibliográficos e análise de exemplos que incentivam a compreensão.

A **pesquisa do referencial teórico** utilizada neste trabalho é composta principalmente por informações provenientes de livros, dissertações, teses, artigos e material disponibilizado na internet. Pelo nível de novidade do processo de manufatura aditiva, é natural também a inclusão de informações provenientes de canais formais e informais, logo, faz parte do estudo da literatura o tratamento do conhecimento empírico não-cientificamente comprovado, embora este possa estar difundido em variados meios de informação.

### 1.4.2 Referentes à pesquisa do referencial teórico

Para compreender o estado da arte da manufatura aditiva e verificar a tendência dos estudos de vanguarda na área, as atividades de revisão bibliográfica foram orientadas pelo processo metodológico *Systematic Search Flow* de Ferenhof e Fernandes (2016), sendo este composto por 4 fases e 8 atividades, conforme Figura 2. As fases e atividades são descritas a seguir:

Figura 2 - *Systematic Search Flow*.



Fonte: FERENHOF e FERNANDES, (2016)

**Fase I** – Definição do protocolo de pesquisa se concentra em definir o objeto do estudo.

- i. Estratégia de busca - abrange um conjunto de procedimentos que definem os mecanismos de busca e a recuperação de informações online.
- ii. Consulta em base de dados - o pesquisador, por meio de uma interface computacional, pode elaborar a indexação

- de informações e aumentar o alcance de suas pesquisas em bases nacionais e internacionais.
- iii. Organizar as Bibliografias - utiliza-se de softwares próprios para gerir bibliografias e referências de artigos, livros e outras obras, automatizando e agilizando o processo de procura, armazenagem, inserção no texto como citação e como referência bibliográfica.
  - iv. Padronizar a seleção dos artigos criando os grupos temáticos para organizar os assuntos pesquisados, filtrados e selecionados. Nesta fase ocorre a leitura dos títulos, resumos e palavras-chaves de cada artigo, escolhendo aqueles que estejam em consonância com o tema da busca.
  - v. Composição do portfólio de artigos envolve a leitura de todos os artigos, permitindo filtragens para excluir os artigos que não demonstram aderência à temática sob investigação.

**Fase II** – Análise, corresponde a consolidação dos dados permite a combinação e agrupamento dos dados levantados;

**Fase III** – Síntese, correspondendo a síntese e elaboração de relatórios, quando são identificados os artigos mais citados sobre o tema de pesquisa e construídos relatórios sobre cada uma das análises feitas;

**Fase IV** – Escrever, se destina a consolidação dos resultados por intermédio da escrita científica.

## 1.5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

A sistemática desenvolvida neste trabalho apresenta uma limitação de aplicação no tipo de processo de manufatura aditiva estudado. Entende-se que, para o desenvolvimento do trabalho, é interessante realizar a abordagem sobre somente um tipo de processo, devido à maior profundidade da análise de características e delimitação da região de atuação da sistemática. O processo baseado em extrusão de material foi considerado mais atrativo dentre os demais para se realizar o estudo pela popularidade e baixo custo, assim, devido à maior difusão no mercado, espera-se um maior potencial da aplicabilidade da sistemática.

Do ponto de vista do processo de desenvolvimento de produtos, o trabalho será delimitado para a macro fase de Desenvolvimento. Esta é composta por fases cuja aplicação é mais explícita e aplicável.

Por ser um trabalho com foco no desenvolvimento de produtos, o trabalho é voltado para a apreciação de um público que tenha um certo conhecimento nesta área, entretanto, os projetistas podem ou não ter noções prévias sobre manufatura aditiva.

## 1.6 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

Com a elaboração deste trabalho espera-se que o domínio do conhecimento da tecnologia seja estruturado por meio da sistematização do projeto para manufatura aditiva. Isto permite que as equipes de projeto obtenham um embasado conhecimento do potencial da tecnologia para atuar com boas práticas e tomadas de decisão no processo de desenvolvimento de produtos, resultando em projetos mais baratos, mais interessantes para o consumidor e com rápido atendimento do mercado.

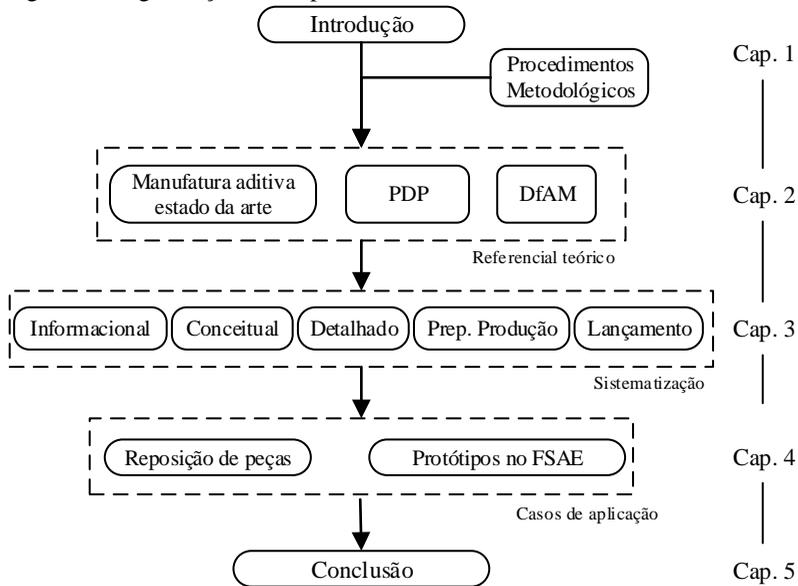
## 1.7 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto está dividido em cinco capítulos, sua organização está ilustrada na Figura 3.

O primeiro capítulo apresenta o contexto, o problema e objetivo do trabalho além da sua organização para a abordagem do tema. Com o entendimento da situação real, é possível identificar a relação de causa e efeito do problema, além da identificação das lacunas de pesquisa. A fim de tratar da causa – o entendimento não suficiente e desestruturado das especificidades da manufatura aditiva – são traçados objetivo geral e o seu detalhamento em objetivos específicos.

A revisão bibliográfica é exposta em três partes. A primeira seção, 2.1, discorre sobre os conceitos e as principais características da manufatura aditiva no ciclo de vida do produto, na seção 2.2 são identificadas e estudadas as principais características do processo de desenvolvimento de produtos, e na seção 2.3, é discutido sobre o *Design For Additive Manufacturing*.

Figura 3 - Organização dos capítulos



Fonte: autor

A sistematização é detalhada no capítulo 3: o método de construção e as ações propostas para o PDP sob o ponto de vista da AM por extrusão.

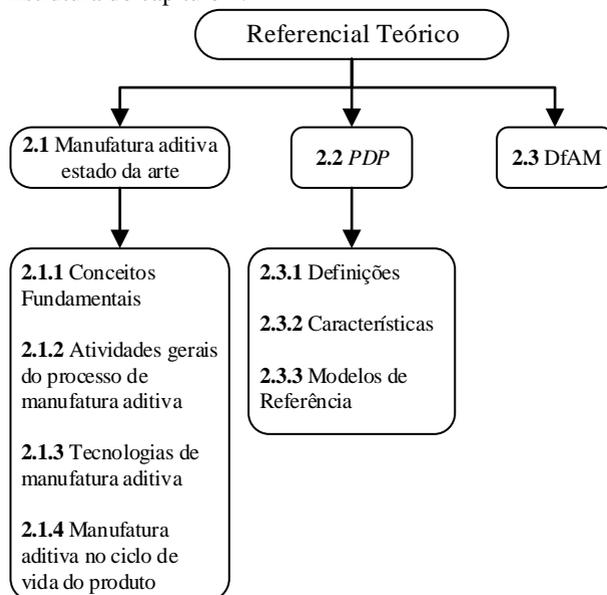
No capítulo 4, são apresentados o desenvolvimento da exemplificação do problema através de casos de aplicação e os seus resultados.

Por fim, o trabalho é concluído no capítulo 5, onde são discutidos os resultados e apresentadas as sugestões de trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico está organizado em três seções, vide Figura 4, que abrangem as principais áreas do conhecimento que permeiam este trabalho: manufatura aditiva, *Design For Additive Manufacturing* e o processo de desenvolvimento de produtos.

Figura 4 - Estrutura do capítulo 2.



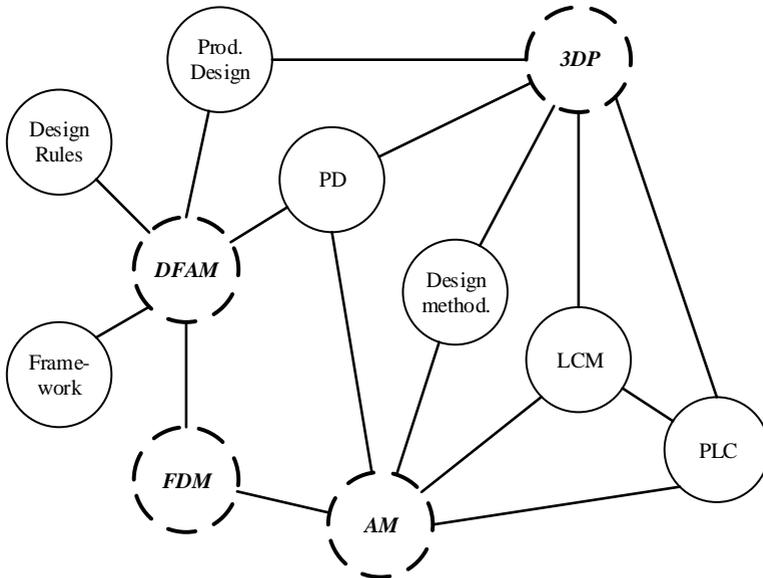
Fonte: autor

A seguir, é então descrito como as fases foram implementadas na pesquisa do referencial teórico deste trabalho.

Na primeira fase do método, foram levantadas as palavras-chave para identificar as relações entre a manufatura aditiva baseada por extrusão de material, *Design For Additive Manufacturing* (DfAM), processo de desenvolvimento de produtos (PDP) e o ciclo de vida de produtos. Devido à falta de padronização das nomenclaturas adotadas – como por exemplo o uso de *additive manufacturing*, *3D printing* ou até *rapid prototyping* para citar a tecnologia – adotou-se uma estratégia de combinações de *query* de busca pareadas dois a dois das palavras-chave: *3D Printing* (3DP), *Product Design*, *Design Rules*, *Product Development* (PD), *DFAM*, *Design Methodology*, *Framework*, *Fused Deposition*

*Modeling (FDM), Additive Manufacturing (AM), Life Cycle Management (LCM), Product Life Cycle (PLC)* como ilustrado na Figura 5 e excluindo os termos “sintering”, “metal” e “laser”.

Figura 5 - Palavras-chave da estratégia de busca. Em tracejado termos relacionados à manufatura aditiva.



Fonte: o autor

Para as buscas, foram selecionadas as bases de dados *Engineering Village*, *Emerald* e *Science Direct*, sendo considerada somente a literatura nos idiomas inglês e português. As buscas levaram em conta os resumos, títulos ou palavras-chave.

Pesquisas preliminares indicam uma massiva quantidade de publicações na área da manufatura aditiva a partir do ano de 2009, como indicado na Tabela 1. Alguns fatores são responsáveis por este comportamento: primeiro a popularização da tecnologia com o passar dos anos e, em segundo, um consenso sobre a terminologia após esse período, principalmente após a norma ASTM F2792-12a publicada em março de 2012.

Outro critério de inclusão considerado foi artigos que contenham o texto na íntegra disponível aos pesquisadores via acesso do portal CAPES ou por meio de acesso da rede de contatos.

Tabela 1 - Resultados de busca de termos semelhantes de acordo com período

Query	Total	Filtro 2009 até 2017
"additive manufacturing" OR "3d printing" OR "rapid prototyping"	27838	62,1%
"additive manufacturing" OR "3d printing"	11715	96,9%
"additive manufacturing"	7589	97,3%

Base de dados: Engineering Village (28/11/2017)

Fonte: o autor

Na segunda atividade da Fase I do método, as buscas foram realizadas utilizando a estratégia descrita anteriormente durante o período de 11 a 12 de setembro de 2017. Com isto chegou-se a 1440 artigos sendo 410 duplicados. Os resultados obtidos até então foram exportados para o gerenciamento no *software* Mendeley, de acordo com a terceira atividade.

Para a quarta atividade, os artigos foram analisados com relação ao seu título, palavras-chave e resumo. Nesta seleção, foram negados os artigos que eram voltados para características não baseada em extrusão por material, sobre impressão orgânica, editoriais, ou sem uma correlação direta com o escopo da pesquisa. Após esta filtragem preliminar, restaram 357 artigos.

Observando-se a estrutura de divisão de tópicos das principais referências de revisões bibliográficas (GOUTIER, 2014; GIBSON et al. 2015 e; GAO et al. 2015), opta-se por dividir o estado da arte da manufatura aditiva em 10 seções, de 2.1.4.1 até 2.1.4.10.

O volume de material selecionado até então é utilizado para a base a construção da seção 2.1 sobre o estado a arte e se apresenta parcialmente nas seções 2.3 na repetição de certos autores para a revisão sistemática daquela seção.

Outros autores previamente estudados ou citados pelos artigos relacionados da busca sistemática são utilizados para complementar a discussão dos tópicos.

Na seção 2.3 é realizada novamente uma revisão bibliográfica sistemática aplicando o *Systematic Search Flow*, desta vez com o foco específico nas definições do DfAM e sua relação com o Processo de Desenvolvimento de Produtos.

## 2.1 MANUFATURA ADITIVA: ESTADO DA ARTE

### 2.1.1 Conceitos Fundamentais

Manufatura aditiva é definida pela norma ISO/ASTM 52900 (2015) como um processo de união de materiais, camada sobre camada para fabricar um objeto a partir de um modelo 3D, ao contrário dos métodos de manufatura tradicionais de retirada de material. O termo “impressão 3D” é comumente utilizado em um contexto não técnico como sinônimo da manufatura aditiva. Atualmente o termo tem sido particularmente associado à máquinas de baixo custo ou capacidade geral.

Escaneamento 3D ou digitalização 3D é o método de adquirir forma e tamanho de um objeto como uma representação tridimensional registrando coordenadas x, y e z na superfície do objeto, e através do software, a coleta de pontos é convertida em dados digitais (ISO/ASTM 52900, 2015).

### 2.1.2 Atividades gerais do processo de manufatura aditiva

Gibson et al. (2015), conforme a Figura 6, identificam oito passos em um processo genérico entre o projeto em CAD até a peça:

1. Conceptualização e modelagem CAD;
2. Conversão para formato STL;
3. Transferir e manipular o arquivo STL na máquina de manufatura aditiva;
4. Setup da máquina;
5. Construção (impressão);
6. Remover a peça da máquina e limpeza;
7. Pós-processamento da peça;
8. Aplicação da peça.

**Conversão para formato STL:** A grande maioria dos *softwares* relacionados à manufatura aditiva utilizam o formato de arquivo STL. A extensão STL significa *Standard Tessellation Language* (RODRIGUES et al, 2016), ou seja, linguagem padrão de recobrimento de superfície.

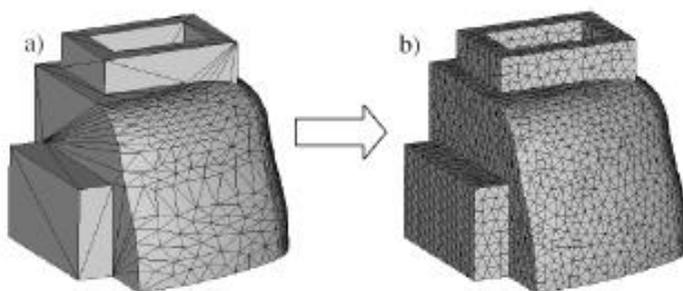
Figura 6 - Sequência do processo de manufatura aditiva



Fonte: traduzido de Gibson et al. (2015)

O modelo em formato STL é composto por uma malha triangularizada, conforme Figura 7, cujo refinamento pode ser determinado pelo usuário no momento da conversão dos formatos. Neste formato, o CAD perde seus dados de construção e histórico de modelamento. O processo de conversão é comum para a grande maioria dos *softwares* CAD disponíveis.

Figura 7 - Refinamento de malha em arquivo formato STL



Fonte: Brackett et al. (2011) apud GOUTIER, (2014)

Os arquivos STL são uma coleção de vértices triangulares não ordenados e vetores normais de superfície. O arquivo também não possui unidades, cores, materiais e outras informações, logo, estas limitações levaram a recente adoção do formato AMF (*Additive Manufacturing Format*). Este formato é um padrão internacional ASTM/ISO que amplia o formato STL para agregar outros recursos úteis (GIBSON et al, 2015).

**Transferir e manipular o arquivo STL na máquina de manufatura aditiva:** O arquivo STL da peça deve ser transferido para o equipamento de manufatura aditiva. A peça é verificada e eventuais manipulações para corrigir a posição, tamanho e orientação devem ser realizadas. É comum que mais de uma peça seja produzida na plataforma de impressão ao mesmo tempo.

**Setup da máquina:** Neste momento, é necessário definir alguns parâmetros para fabricação na máquina. No processo baseado em extrusão de material, por exemplo, podem ser: velocidade de deslocamento do cabeçote extrusor, espessura da camada, temperatura de bico de extrusão e da plataforma de construção, quantidade de camadas de suporte postigo, etc.

Além da configuração, o ambiente de impressão deve ser fisicamente preparado. O operador deve verificar se há matéria-prima suficiente, se o cabeçote não está obstruído, conferir o alinhamento da mesa e dos eixos de movimentação. Algumas dessas operações são automatizadas, mas, para a maioria das máquinas, essas operações são realizadas manualmente por um operador treinado (GIBSON et al, 2015).

**Construção (impressão):** A fabricação da peça por manufatura aditiva é automatizada, com baixa necessidade de supervisão humana direta; uma intervenção ocorre basicamente para garantir o suprimento de materiais, a descarga da máquina e para prevenir eventuais problemas (RODRIGUES et al, 2016), como verificar se houveram erros nos parâmetros de impressão.

**Remover a peça da máquina e limpeza:** A peça deve ser separada da plataforma de construção na qual foi produzida e removida do excesso de material de construção que envolve a peça. O operador deve ter um grau de habilidade para remoção parcial pois uma manipulação incorreta pode acarretar em danos na peça.

**Pós-processamento da peça:** O pós-processamento é composto geralmente por atividades manuais de finalização das peças para garantir sua aplicação. Este estágio é muito específico de cada produto. Pode-se exigir um tratamento cuidadoso e especializado para garantir adequada qualidade e acabamento.

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. (RODRIGUES et al, 2016).

Gibson et al (2015) listam as atividades mais comuns a serem executadas na fase de pós-processamento:

- Remoção do material de suporte;
- Melhorias na textura de superfície;
- Melhorias de precisão;
- Acabamento estético;
- Aprimoramento das propriedades por técnicas térmicas e não-térmicas;
- Preparação para o uso como padrão.

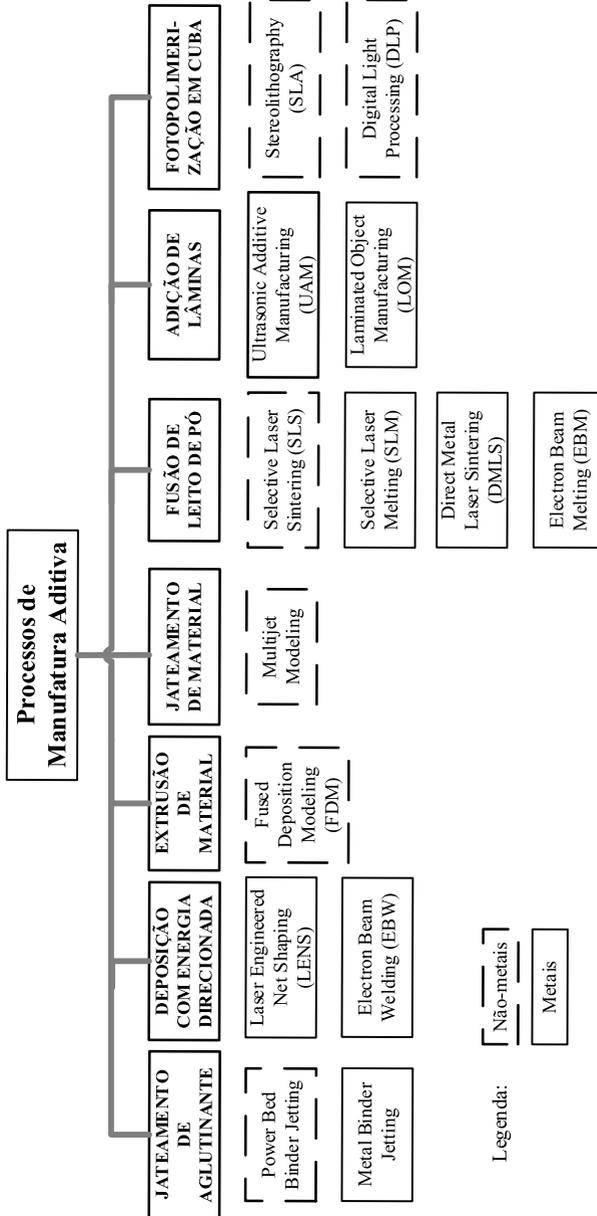
**Aplicação da peça:** É a última etapa do processo. A peça está pronta para o uso de acordo com suas especificações. Em muitos casos as propriedades encontradas nas peças impressas são anisotrópicas, logo, estas peças devem apresentar comportamento diferente do que encontrado em peças geometricamente idênticas embora fabricadas por outro tipo de manufatura.

### **2.1.3 Tecnologias de manufatura aditiva**

Existem diversos tipos de processos voltados para a manufatura aditiva de camada a camada. Em muitos casos, o processo desenvolvido por uma empresa recebe um nome comercial a ele associado, de modo que é comum que um mesmo tipo de processo tenha variações de nomenclatura. Em uma iniciativa de regularizar a nomenclatura na área, atualmente está em vigor a norma ISO/ASTM 52900:2015.

Os processos são divididos em sete categorias, embora a norma não classifica os tipos de processos comercializados atualmente conhecidos dentro destas categorias. Poulsen (2015) e Félix (2017) sugerem um enquadramento, cada um à sua maneira, de forma que foram adaptadas para uma proposta de classificação neste trabalho conforme a Figura 8 . Os termos em português são os utilizados por Volpato (2017).

Figura 8 - Classificação dos processos de manufatura aditiva



Fonte: adaptado de Félix (2017), Poulsen (2015) e tradução de Volpato (2017)

### 2.1.3.1 Processo baseado em extrusão de material

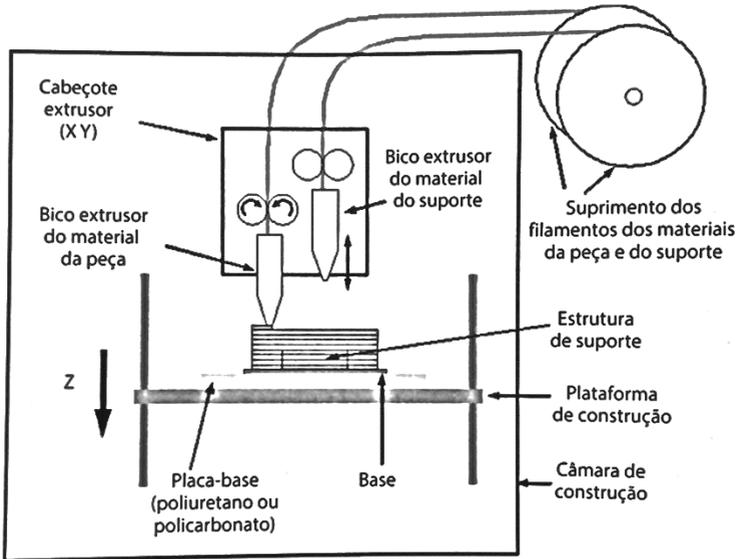
A tecnologia baseada em extrusão de material é atualmente a mais popular no mercado e foi primeiramente comercializada pela empresa *Stratasys* no início da década de 1990 atribuindo-lhe o nome FDM – *Fused Deposition Modeling*. Neste processo, o material é extrudado através de um sistema de alimentação por tração que cria uma pressão para extrusão, onde o calor é utilizado para fundir o material em uma pequena câmara aquecida (GIBSON et al., 2015). Entende-se que este processo é o mais atrativo dentre os demais para se realizar o estudo devido à popularidade e baixo custo, assim, devido à maior difusão no mercado, a aplicabilidade da sistemática torna-se mais interessante. Do ponto de vista de abrangência do trabalho, a restrição para um único processo de manufatura aditiva torna mais profunda a análise de características e melhor delimitada a região de atuação da sistemática.

Lieneke e Denzer (2016) descrevem o FDM (*Fused Deposition Modeling*) como um processo de extrusão utilizando filamentos de polímero termoplástico em bobinas. O filamento é fundido, extrudado e posicionado em uma placa-base por um bico aquecido. Devido à fusão térmica, o filamento depositado forma uma união sólida com a placa-base ou com outras camadas previamente depositadas, conforme mostra a Figura 9. Após a deposição de múltiplos filamentos e completando a camada, a plataforma desloca-se a altura da espessura de uma camada e deixa disponível espaço para uma nova camada a ser depositada.

Gibson et al. (2015) relacionam algumas limitações dos processos baseados em extrusão de material como a velocidade de construção, precisão e densidade dos materiais, entretanto é ainda muito difundida por suprir a demanda dos usuários industriais, principalmente pelas propriedades dos materiais e pelo baixo custo do modelo de entrada dos equipamentos.

Pela estratégia de imprimir camadas 2D sucessivamente, uma sobre a outra e sem a presença de um meio sólido ou líquido, o processo baseado em extrusão de material necessita de estrutura de suporte dependendo da geometria da peça a ser fabricada. A utilização de suportes é uma limitação que afeta diretamente a atividade de pós-processamento, ou seja, ações de acabamento e retirada destes suportes após a impressão.

Figura 9 - Princípio do processo baseado em extrusão FDM da *Stratasys*



Fonte: Volpato et al. (2017)

## 2.1.4 Manufatura aditiva no ciclo de vida do produto

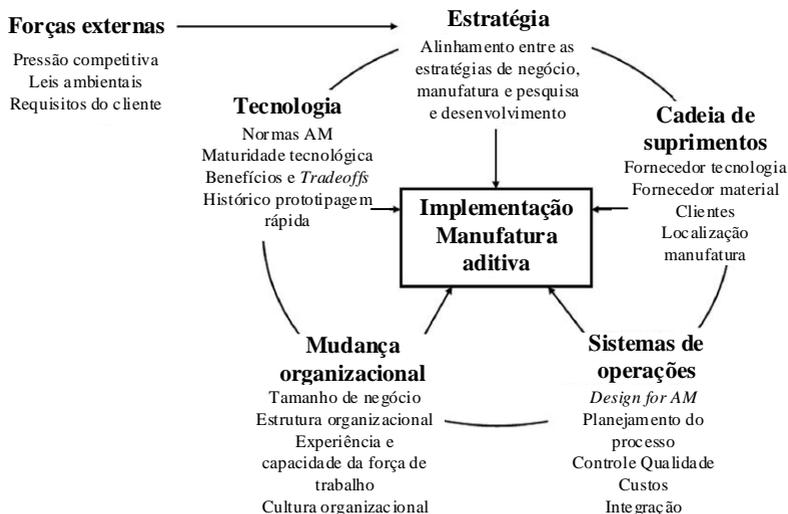
### 2.1.4.1 Fatores de influência para implementação da AM

Alinhados com a necessidade apresentada por Deradjat e Minshall (2015) em elaborar uma estrutura de trabalho para implementação da manufatura aditiva, Mellor et al. (2014) e Ahuja et al. (2015) abordam os fatores de influência a serem estudados por uma organização ao adequar-se com este processo, conforme Figura 10. Estes fatores são abordados ao longo da revisão bibliográfica a fim de basear a evolução do trabalho.

**Estratégia:** A intenção em investir em um novo processo de fabricação está sempre ligado à dinâmica do mercado e características específicas do produto (AJUHA et al., 2015). Deve ser levado em conta se o processo será altamente utilizado na fabricação do produto. Mellor et al. (2014) elencam três principais características:

- Produtos com grau de customização;
- Produtos com funcionalidade incrementada através de otimização do projeto;
- Produtos de baixo volume de demanda.

Figura 10 - Fatores de influência na implementação da manufatura aditiva



Fonte: traduzido de Mellor et al. (2014)

**Cadeia de suprimentos:** Na manufatura aditiva, existem novos pontos de vista sobre os suprimentos e a fabricao, como por exemplo, a localizao fabril, pois sem a necessidade de ferramental para a fabricao, pode-se proporcionar a descentralizao da produo de acordo com locais de demanda ou mteria-prima (MELLOR et al., 2014). Outro ponto  a estratgia do modelo de negcio dos fabricantes de maquinrio de AM que tm a tendncia de tornarem-se tmbm fornecedores de mteria-prima.

**Sistemas de operaes:** As caractersticas singulares da manufatura aditiva requerem o desenvolvimento de novas prticas e ferramentas de projeto. Ao contrrio das expectativas iniciais, no existe uma liberdade geomtrica total para o projeto e muitas consideraes devem ser levadas em conta para projetar produtos para o processo de manufatura aditiva (MELLOR et al., 2014).

**Mudana organizacional:** O uso do processo de manufatura aditiva requer que os projetistas e engenheiros repensem seu modo de projetar. Entretanto, a implementao atinge mais reas do que somente a de projetos dentro de uma empresa, Ajuha et al. (2015) citam como exemplos: o planejamento de processos e controle de qualidade. A estrutura de uma organizao  um fator chave para a utilizao de uma nova tecnologia, assim com a aderncia de uma cultura organizacional.

Segundo Simpson e Williams (2017), cinco temas são os principais para preparar ou treinar a mão-de-obra relacionada a atuar na manufatura aditiva:

- i. Processos de manufatura aditiva e relação entre os processos e materiais;
- ii. Fundamentos de engenharia com ênfase em engenharia dos materiais e manufatura;
- iii. Habilidades profissionais para a resolução de problemas e pensamento crítico;
- iv. Práticas de projeto e ferramentas que incentivem a liberdade de design para a manufatura aditiva;
- v. Equipes multifuncionais e técnicas de ideação para estimular a criatividade.

A manufatura aditiva exige uma abordagem integrada e multidisciplinar que tem causado impacto no treinamento nas empresas e na educação de novos engenheiros.

**Tecnologia:** É importante que a empresa entenda os *trade-offs* ao utilizar uma nova tecnologia, assim como suas normas, benefícios e maturidade. Pelo fato de a tecnologia ser relativamente recente no mercado, existe ainda uma carência em normatização e de conhecimento técnico em converter o potencial em aplicações. É essencial que a implementação da manufatura aditiva se dê com um claro entendimento das limitações tais como: opções de materiais, custos, limitações de tamanho e velocidade do processo (AJUHA et al., 2015).

#### 2.1.4.2 Complexidades

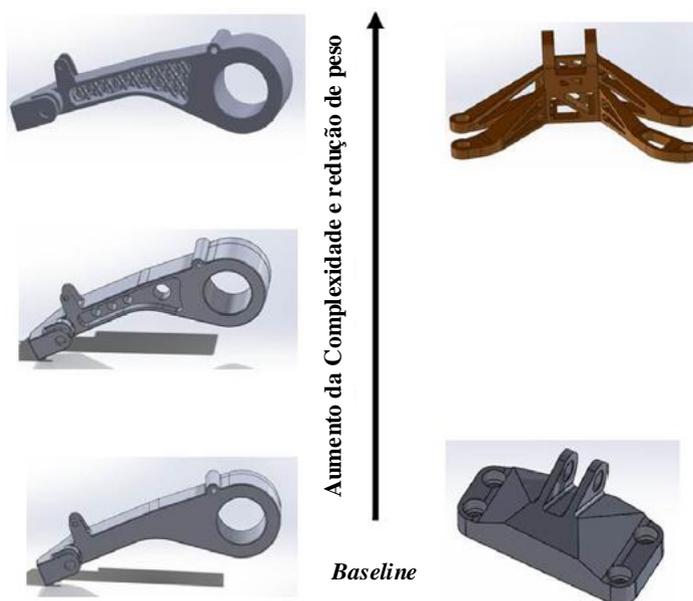
A natureza de construção camada a camada da manufatura aditiva habilita capacidades únicas em comparação com outros processos de fabricação (GIBSON et al., 2015). Deste modo é possível atingir um alto nível de complexidade. O autor classifica quatro tipos de complexidades relacionadas com a manufatura aditiva.

**Complexidade de forma:** Na manufatura aditiva, a complexidade de forma das peças é virtualmente ilimitada. Isso contrasta fortemente com as limitações impostas pela usinagem ou moldagem por injeção, dois processos comuns. Na usinagem, os espaços para a entrada da ferramenta são uma limitação chave que limitam altas complexidades de forma. Na moldagem por injeção, a possível necessidade de se particionar uma peça para conceber as cavidades do molde e a ejeção de peças do molde

limitam fortemente a complexidade (GIBSON et al., 2015). Na Figura 11, é possível observar que o aumento da complexidade de forma proporcionou uma redução de peso.

Na produção por manufatura aditiva, não importa se uma peça tiver uma forma diferente da peça produzida anteriormente. Além disso, ferramentas complexas ou dispositivos de fixação não são necessários, o que implica que o tamanho de lote unitário pode ser economicamente viável (GIBSON et al., 2015).

Figura 11 - Duas famílias de peças onde o aumento da complexidade contribuiu para redução de peso



Fonte: traduzido de Conner et al. (2014)

Conner et al. (2014) classificam as complexidades possíveis de serem obtidas com relação à forma na manufatura aditiva em:

- *Features*: rebaixos, espessuras variáveis de parede e canais profundos;
- Geometria: Formas torcidas e de contorno, furos cegos, alta relação entre resistência e peso, alta taxa entre área superficial e volume além de regiões otimizadas topologicamente;

- União de peças: integrar peças que são tradicionalmente projetadas para serem unidas ou soldadas por uma peça única;
- União de etapas de fabricação: aninhar peças que seriam montadas entre si em múltiplas etapas se fabricadas convencionalmente.

Calì et al. (2012) e Klahn et al. (2016), apresentaram aplicações de *features* incorporadas em componentes para aumento de sua funcionalidade.

O primeiro trabalho apresenta conceitos de articulações e juntas esféricas. Possui uma dificuldade adicional para se executar no processo baseado em extrusão de material devido à demanda por baixa rugosidade, elevada precisão dimensional e necessidade de estruturas de suporte que demandam este processo. Ainda assim, consegue-se obter certas geometrias de articulações como a ilustrada na Figura 12. Uma junta realizada na manufatura aditiva pode ser fabricada montada, pronta para o uso e ainda com detalhes internos que possam limitar seu movimento de acordo com o especificado para o projeto.

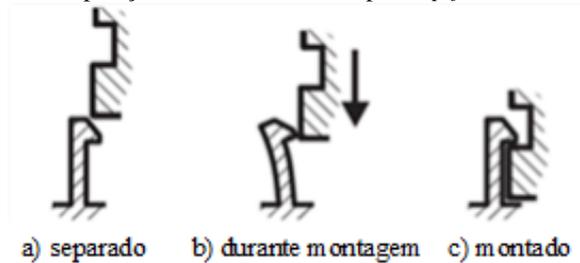
Figura 12 - Modelo de junta esférica comum impressa



Fonte: Calì et al. (2012)

Já o trabalho de Klahn et al. (2016) descreve como diretrizes sobre o projeto de dentes de encaixe tipo *snap-fit*, vide Figura 13, para facilitar o processo de montagem. Diversos tipos de encaixe podem ser projetados pela liberdade de desenho de dentes, rebaixos e guias possíveis com a manufatura aditiva.

Figura 13 - Disposição durante o encaixe tipo *snap-fit*

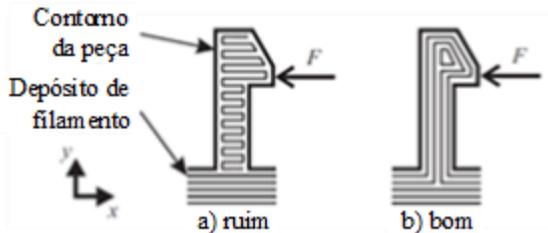


Fonte: traduzido de Klahn et al. (2016)

A comum anisotropia encontrada na fabricação pela manufatura aditiva deve ser levada em consideração, direcionando o preenchimento da seção de acordo com a principal tensão causada pelas forças de contato no encaixe. A durabilidade é influenciada, portanto, pela trajetória do cabeçote durante a fabricação. Na Figura 14, nota-se que a estratégia de preenchimento do dente de encaixe da esquerda proporciona menos resistência mecânica do que o da direita pelas linhas de preenchimento estarem paralelas à aplicação de carga.

Outro ponto a ser observado é a direção de impressão para se evitar deformações típicas do resfriamento de materiais do processo em extrusão, como o ABS.

Figura 14 - Trajetória do cabeçote para fabricação do dente de encaixe



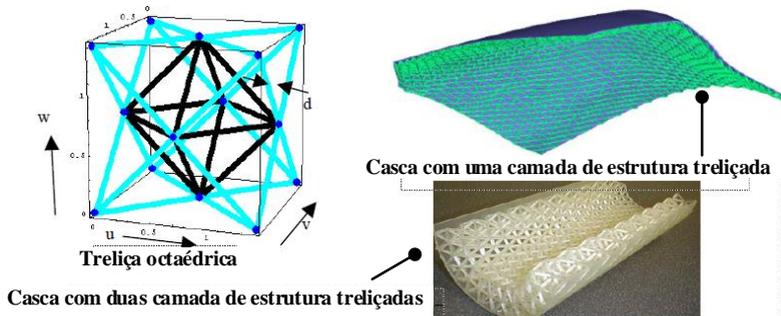
Fonte: traduzido de Klahn et al. (2016)

**Complexidade de hierarquia de estruturas:** A impressão por adição de camadas também possibilita a implementação de geometrias estruturais em variadas escalas na mesoestrutura de uma peça.

A capacidade de alterar a mesoestrutura de uma peça é associada à aplicação de padrões geométricos denominados de estruturas celulares (como *honeycombs* e espumas) com o objetivo de aumento da relação resistência/peso de determinada região da peça.

Rosen (2007) explora esta possibilidade de complexidade de forma na fabricação de uma estrutura celular octaédrica, mostrada na Figura 15. Este conceito é motivado pelo desejo de adicionar massa somente onde for necessário. Desta forma, um alto desempenho das propriedades do material é acompanhado pelo mínimo de massa para cumprir as especificações da peça.

Figura 15 - Célula unitária octaédrica (à esq.) e exemplo de construção (à dir.)

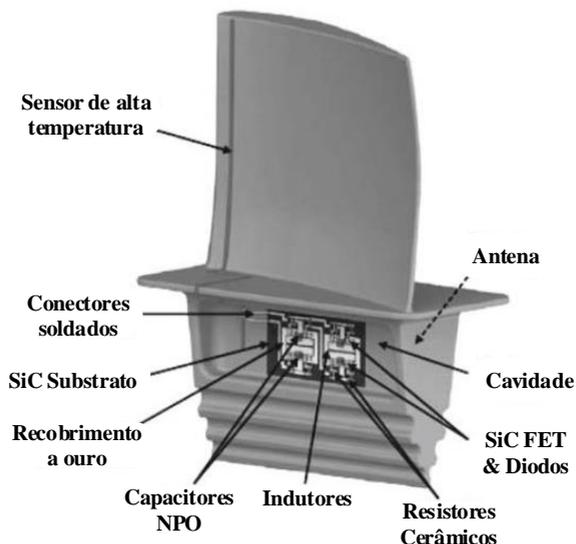


Fonte: traduzido de Rosen (2007)

**Complexidade funcional:** Em um processo tradicional de projeto de produtos, os projetistas usualmente abrem mão de funcionalidades para se adequar às capacidades de manufatura disponíveis (JING et al., 2014), já com a capacidade de construção de estruturas complexas pela manufatura aditiva é possível fabricar mecanismos, juntas e até embutir peças não fabricadas pela impressão 3D.

Partindo deste potencial, uma única peça é capaz de alcançar mais de uma funcionalidade e/ou propósito, como por exemplo a inclusão de encaixes, guias para montagem e conduítes internos para chicotes elétricos. Na Figura 16, um sensor é posicionado na superfície de uma pá de turbina para monitorar seu desempenho enquanto receptores eletrônicos estão posicionados em uma localização mais protegida na base da lâmina.

Figura 16 - Pá de turbina com sensor instalado na base



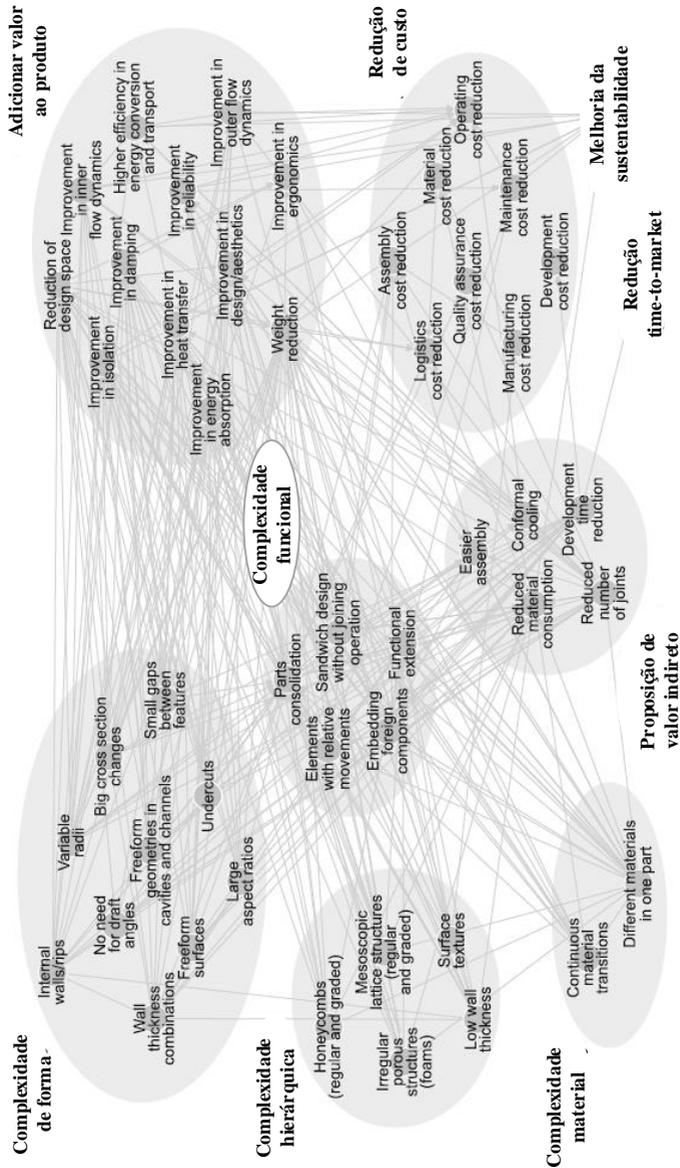
Fonte: traduzido de Goutier (2014)

Na Figura 17, Kumke et al. (2017) relacionam ligações semânticas entre as potencialidades da AM e onde a complexidade funcional está visualmente inserida neste contexto.

**Complexidade de material:** A escolha do material a ser utilizado é determinante sobre as capacidades técnicas de geometria e otimização das resistências mecânica e térmica na peça, apesar que diferentes processos lidam com materiais diversos, é possível que uma gama de matérias-primas seja utilizada na fabricação de uma mesma peça em um processo baseado em extrusão de material. A possibilidade de alterar as propriedades de diferentes regiões que compõem uma peça, cria conceitos de estruturas ou peças que contenham mudanças abruptas ou graduais de propriedades em diferentes regiões, denominadas de peças com gradação funcional (VOLPATO et al. 2017).

Uma significativa questão que dificulta a adoção de uma maior complexidade de material nos projetos com a manufatura aditiva é a falta de ferramentas de desenho e CAD que permitam a representação e raciocínio com múltiplos materiais.

Figura 17 - Ligações semânticas dos potenciais da manufatura aditiva



Fonte: Kumke et al. (2017)

#### 2.1.4.3 Customização em massa

O termo "customização em massa" foi originalmente cunhado por Davis (1987 apud DERADJAT e MINSHALL, 2015) para descrever a estratégia de produção em massa de objetos personalizados.

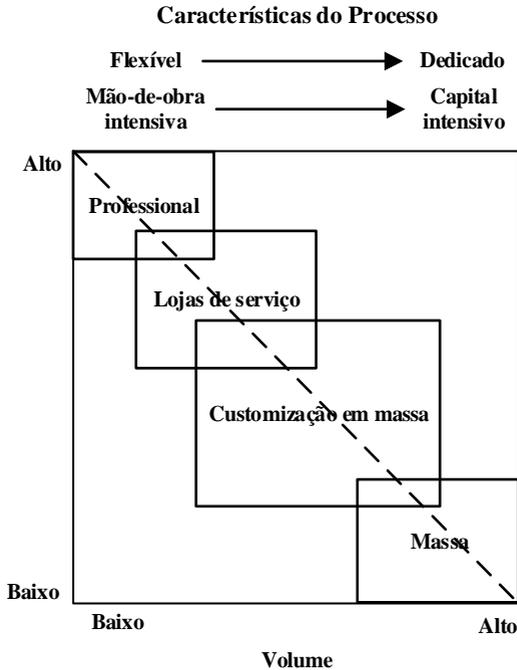
O *German National Foundation of Research* e o *UK Technology Strategy Board* (TSB) identificaram a manufatura aditiva e a customização em massa como os dois processos/estratégias mais importantes para garantir uma fabricação de alto valor agregado na Alemanha e no Reino Unido.

Na Figura 18 de Tuck et al. (2008) apud Deradjat e Minshall, (2015), a customização em massa ocupa uma posição intermediária e importante tanto quanto na característica do processo quanto no volume.

No mercado, existe uma demanda por produtos que atendam às necessidades individuais dos consumidores. O compromisso entre aumentar a variedade externa e oferecer preços competitivos é o ponto da estratégia de negócios da customização em massa. As vantagens da manufatura aditiva para um projeto individualizado são reforçadas pela alta liberdade de *design* que o processo permite como formas livres e ajustes do usuário (SPALLEK; KRAUSE, 2016).

O princípio fundamental de redução de custo e alto volume de customização em massa é a modularidade, que possibilita ao fornecedor atender somente o que o cliente requer. Não somente o produto deve ser modular, mas também os processos que devem ser capazes de reter a modularidade até o momento em que o consumidor exerce sua escolha. A individualização padronizada é recomendável se um componente definido for recorrentemente individualizado e resultar em um grau de personalização para o envolvimento do usuário (SPALLEK e KRAUSE, 2016).

Figura 18 - Matriz Volume-Variabilidade de produtos

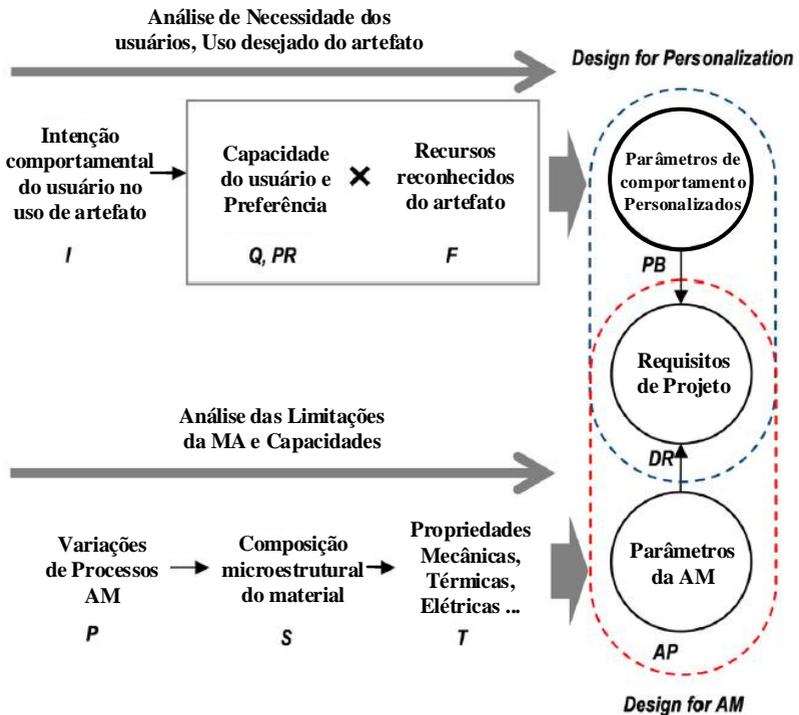


Fonte: traduzido de Tuck et al. (2008) apud Deradjat e Minshall (2015)

Para perceber os benefícios da customização em massa, empresas iniciam seu projeto de produto pela introdução de uma plataforma comum. A abordagem baseada em plataforma permite uma série de variações de produtos a serem desenvolvidos com uma grande redução de tempo e custo do cada novo produto. O padrão em plataformas significa compartilhar componentes entre os produtos (WÜRTZ et al., 2015).

Ko et al (2015) propõem na Figura 19 o DFAP (*Design for AM - facilitated personalization*) que oferece diretrizes aos projetistas para unir o Design For Personalization (DfP) e o DfAM. O DFAP define como uma peça de um projeto sistematicamente suporta os comportamentos preferenciais do usuário ao utilizar itens manufaturados aditivamente considerando suas características pessoais e preferências. O DfP considera uma estrutura de interação entre produto e usuário para transformar suas necessidades em modelos que podem ser sua efetividade verificada.

Figura 19 - Framework para DfAP



Fonte: traduzido de Ko et al. (2015)

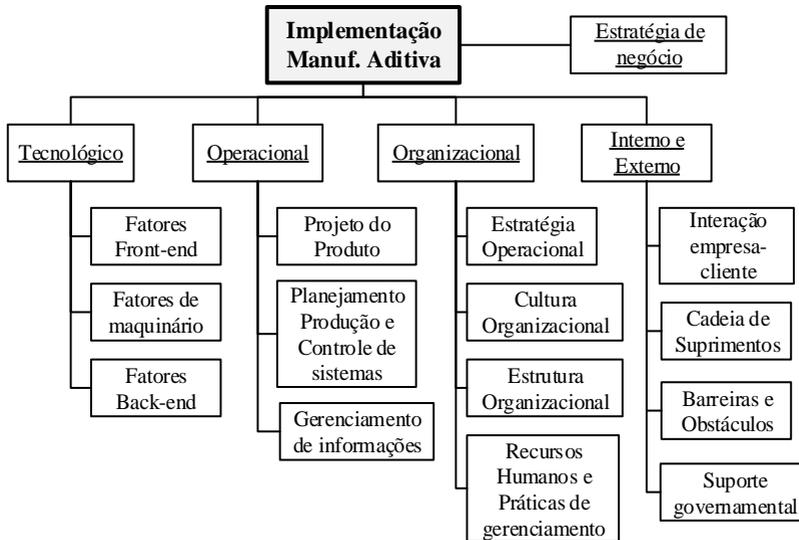
Deradjat e Minshall (2015) também abordam uma estrutura para implementação da manufatura aditiva para a customização em massa. Os fatores de influência relacionados são categorizados em tecnológico, operacional, organizacional e de fatores externos/interiores. A Figura 20 tem o objetivo de verificar diferentes fatores que influenciam a implementação em um formato no qual as informações coletadas nos estudos de caso podem ser agrupadas.

A manufatura aditiva promove a redução de barreiras da fabricação mediante plataforma de impressão 3D em escala, embora exigindo softwares de nível de entrada para orientar os usuários através de um processo de modelagem. Um exemplo para atribuir esta necessidade é o paradigma da co-criação.

A co-criação é a união de criação de valor pela companhia e pelo consumidor, oferecendo ao consumidor a oportunidade de influenciar o projeto de um produto baseado em suas necessidades (GAO et al., 2015).

Por exemplo, em um processo colaborativo *Front-End*, o conceito de projeto do produto e do processo tem o consumidor como membro ativo no time de desenvolvimento pela geração de dimensões geométricas finais do produto (WURTZ et al., 2015).

Figura 20 - Framework de implementação da manufatura aditiva para customização em massa



Fonte: traduzido de Deradjat e Minshall (2015)

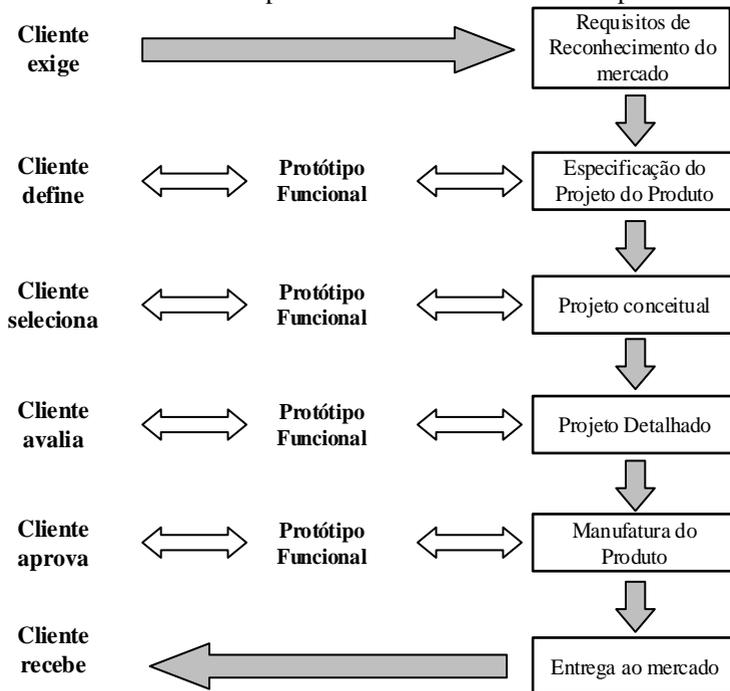
Campbell et al. (2014) propõem a metodologia CIFP (*Customer Involvement through Functional Prototypes*) para auxiliar os projetistas em um ambiente industrial convencional. No CIFP, os usuários finais podem avaliar protótipos em ambiente de uso comum do produto em etapas antecipadas no processo de desenvolvimento do produto. A Figura 21 ilustra a relação entre o cliente, protótipo e fases de desenvolvimento. No CIFP existe uma clara diferença entre o projetista e o consumidor, sendo o projetista responsável pela evolução do projeto do produto. Entretanto, com o advento da customização em massa, envolvendo personalização e individualização, os termos *co-design user* e *customer integration* tornaram-se mais familiares.

Como a maioria dos consumidores são incapazes de utilizar softwares de CAD convencionais, a obtenção de suas intenções de projeto é problemática e o início de uma ideia a partir de uma “folha em branco”

é intimidador para muitos. A habilidade de converter desenhos iniciais em produtos factíveis, e fornecendo aos consumidores a habilidade para gerar seus próprios projetos diretamente, traz o cliente a um novo nível de interação (CAMPBELL et al., 2014).

Em nível operacional, o projeto de produto representa o desafio para os implementadores de manufatura aditiva, pois os clientes frequentemente desconhecem as possibilidades e restrições de forma. Isso pode resultar na necessidade de educar o cliente em adaptar e otimizar alguns dos projetos enviados. Em termos de interação cliente - empresa, as empresas terão que gastar recursos em *marketing* e educar os clientes para que possam aproveitar a gama completa de benefícios de personalização oferecidos pela AM (DERADJAT e MINSHALL, 2015).

Figura 21 - Uso do CIFP no processo de desenvolvimento de produtos



Fonte: traduzido de Campbell et al. (2014)

#### 2.1.4.4 Influência em métodos de ideação

Através de sua revisão bibliográfica, Kumke et al. (2017) avaliam métodos para ideação no contexto do DfAM sob quatro critérios de avaliação: Pré-seleção, Complexidades da manufatura aditiva, Flexibilidade e Aplicabilidade. A avaliação de adequação de um método de criatividade no DfAM possui também fatores específicos no contexto em que cada projeto é aplicado. A Tabela 2 espera indicar as diferenças entre o uso dos métodos dentro do que é esperado deles.

Tabela 2 - Avaliação de métodos de projeto para ideação e consolidação de peças no contexto do DfAM

Categoria	Nº	Métodos de Projeto	Critérios de Avaliação					
			1 Pré-seleção	2 Complexidades da AM	(a) DfAM Oportunista	(b) DfAM Restritiva	(c) Tipos de Conhecimento	4 Aplicabilidade
Ideação Criativa	1	<i>Brainstorming</i>	●	○	○	-	○	●
	2	<i>Brainwriting/ Método 365</i>	●	○	○	○	●	●
	3	Método Galeria	●	○	○	○	●	●
	4	Sinética / Biônica	●	●	●	○	●	-
	5	Seis chapéus do pensamento	●	○	●	●	●	○
	6	MESCRAI	●	○	○	○	○	○
	7	Método de Delphi	●	-	●	●	○	-
	...							
Ideação Sistemática	8	Catálogos de Projeto / Lista de efeitos físicos	●	-	-	○	-	○
	9	Análise Morfológica	●	○	○	●	○	●
	10	Matriz de contradição da TRIZ	●	●	○	○	○	-
	11	Variação Sistemática	●	○	●	●	●	○
	12	Modelagem Funcional	●	-	-	-	-	○
	...							
União de peças	13	Conceito de “Máquina de uma peça”	●	●	○	●	●	○
	14	Checklist de união de peças	●	○	○	○	-	●
	...							

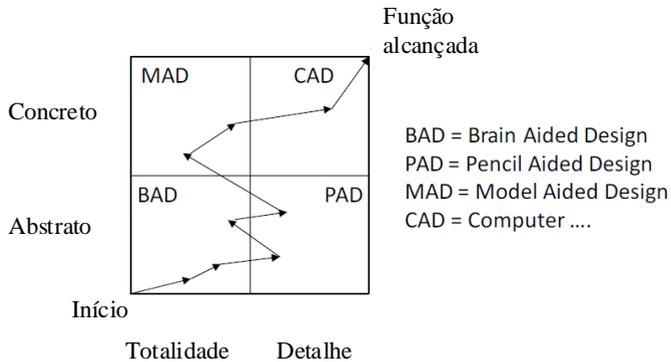
Legenda: ● bom; ○ moderado / possível ; - pouco

Fonte: adaptado de Kumke et al. (2017)

Na sequência serão apresentadas algumas abordagens de Ottosson e Skogsrød (2016), Laverne et al. (2015) e Rosen (2007) sobre como pode ser realizada as suas aplicações no contexto de desenvolvimento de produtos com a manufatura aditiva.

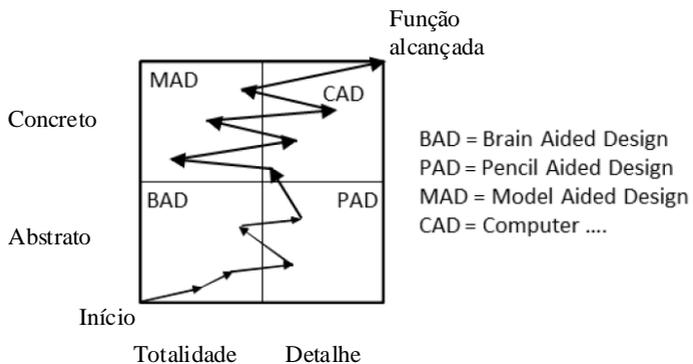
Na Figura 22 é representada o modo como a solução pode ser encontrada de forma usual e na Figura 23 como a iteração pode ser direcionada para um campo mais concreto com a utilização da manufatura aditiva. Nota-se que pela facilidade de se confeccionar protótipos, a relação de análise do projeto entre totalidade e detalhe é mais intensa entre o modelo físico e computacional.

Figura 22 - Interação para gerar a solução funcional comum.



Fonte: traduzido de Ottosson e Skogsrød (2016)

Figura 23 - Interação com o uso da manufatura aditiva.



Fonte: traduzido de Ottosson e Skogsrød (2016)

Modelos são ferramentas importantes de visualização de desenvolvedores, assim como gerentes, usuários e consumidores. Quando uma pessoa é capaz de manipular um modelo, se consegue atingir um conceito mental mais profundo sobre a peça do que somente se fosse exposto a uma imagem ou CAD. Portanto, modelos ajudam a obter um melhor entendimento das prioridades e ajudam a evitar erros ou falhas de comunicação.

Equipes que trabalham em inovação devem estar integradas às tecnologias disponíveis no mercado e como utilizá-las de forma efetiva. Laverne et al. (2015) identificam em sua pesquisa que o conhecimento em manufatura aditiva pode impactar nas sessões de criatividade, mas este conhecimento não foi ainda adaptado para as necessidades dos projetistas e são também fracamente exploradas.

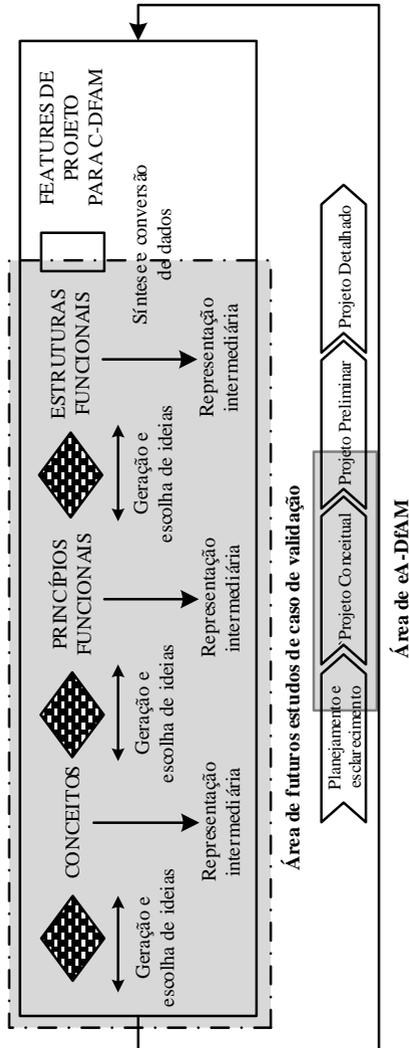
Laverne et al. (2015) propõem a metodologia eA-DfAM, voltada para os estágios preliminares de projeto com o foco em ampliar a capacidade criativa de projetistas. O eA-DfAM tem início quando os requisitos do produto estão disponíveis. O eA-DfAM significa uma adaptação do DFAM voltada à montagem e de forma antecipada.

Laverne et al. (2015) identificam que durante “*divergent thinking stage*” grupos de projetistas que, ou não possuem conhecimento prévio, ou possuem um conhecimento limitado de manufatura aditiva são capazes de gerar até mais ideias do que especialistas na área, entretanto, as ideias deste último grupo atendem melhor as especificações percentualmente.

Para os autores, a proposta do eA-DfAM, vide Figura 24, deve abranger as atividades de gerar conceitos, princípios de funcionamento; estruturas de trabalho e síntese e conversão de informações das características de projeto.

Rosen (2007) propõe uma aplicação do DfAM na geração de conceitos bio-inspirados, denominado “sistema biológico de engenharia reversa” com o objetivo de auxiliar os projetistas a encontrarem soluções através de abstrações de princípios de solução da natureza. O autor adapta as atividades do projeto conceitual de Pahl et al. (2007) e, juntamente com o nível de complexidade de forma encontrado na manufatura 3D, é capaz de replicar estruturas biológicas complexas como formas ocas e de contornos bem específicos como por exemplo, ossos.

Figura 24 - Proposta de eA-DFAM otimizado



Fonte: traduzido de Laverne et al. (2015)

#### 2.1.4.5 Custo e Tempo de construção

Existem diversas formas da tecnologia impactar o processo de desenvolvimento de produtos e esta seção é destinada a compreender como o custo deste processo é tratado e equacionado. Desta forma, é

importante entender e classificar os fatores de custo no ciclo de vida que atuam como maiores contribuintes para direcionar o foco das futuras atividades de redução de custo para a tecnologia (LINDEMANN et al., 2012).

Como uma máquina de AM é capaz de fabricar utilizando uma variedade de matérias-primas e lidar com uma gama de parâmetros de impressão diferentes, é possível que a produção ocorra de forma remota dos centros de manufatura de uma empresa, sendo os projetos enviados em arquivos CAD. A possibilidade da redução do trabalho manual durante a fabricação e a localização da produção próxima do consumo pode impactar na diminuição da vantagem de custo em se produzir em países de baixo valor de mão-de-obra. Custos de transporte e tempos de entrega podem ser reduzidos ao se aproximar a produção com a demanda.

Weller et al. (2015) sugerem uma proposição que, em um mercado onde muitas firmas adotem a manufatura aditiva e estejam com alta eficiência de produção, a competição será determinada por outros custos além dos de manufatura, em especial, os de aquisição e de transporte. Se o custo de transporte de produtos acabados for superior ao de aquisição de matérias primas, a produção localizada próxima ao cliente torna-se mais interessante.

Observando um cenário de mais avançada difusão da manufatura aditiva do que o atual, ou seja, um mercado com alta penetração desta tecnologia, Weller et al. (2015) propõem que neste mercado, as principais organizações perdem vantagem estratégica de localmente reduzir preços para deter a entrada de um novo concorrente no mercado. Além disso, a competitividade irá aumentar ao passo em que os fabricantes oferecerem uma gama maior de produtos, resultando em competições entre segmentos.

Para compreender as oportunidades e o espaço destinado à manufatura aditiva no desenvolvimento de produtos é importante conhecer como é construída a estrutura de custo de um produto. A estimativa de custo é comumente utilizada como referência para uma cotação de um cliente ou para avaliar uma cotação (BEN-ARIEH e QIAN, 2003 apud ZHAI, 2012).

A função da estimativa de custo segundo Malstron (1984) apud Zhai (2012) inclui:

- Checar cotação de fornecedores;
- Prover referência para uma decisão “*make or buy*”;
- Avaliar substitutos no projeto de produtos;
- Embasar planejamento financeiro a longo prazo;

- Auxiliar custo de manufatura;
- Fornecer padrões para eficiência da produção.

Para este trabalho, espera-se como pontos efetivos aqueles relacionados a decisões de projeto, sejam estes de origem do desenvolvimento ou de desdobramentos de fabricação, desde que tenham influência acerca do processo de desenvolvimento do produto.

Segundo Pahl et al. (2007), o custo geral para a produção de um produto pode ser dividido em custos diretos<sup>1</sup> e indiretos<sup>2</sup>. O autor ilustra na Figura 25 as origens e a composição dos custos fixos, a diferenciação entre preço de venda e custos. Nota-se que a influência da AM no preço de produto tem potencial de ser realizada em vários pontos da composição do custo, como: custo dos materiais, de fabricação, frete, etc.

Lindemann et al. (2012) desenvolvem um modelo de custo da manufatura aditiva baseada em quatro grandes etapas:

- Preparação da construção;
- Produção;
- Remoção da peça e suportes;
- Pós-processamento e melhoria das propriedades do material.

A preparação se refere às atividades a preparação do modelo CAD para o uso em impressoras, posicionamento de peças na câmara de impressão e criação de suportes ou estruturas estabilizadoras complementares.

A produção é baseada na manufatura da peça e é equacionada por Lindemann et al. (2012) a seguir:

$$Custo_{construção} = Custo_{fixo} + Taxa_{hora\ máquina} \cdot Tempo_{construção}(1)$$

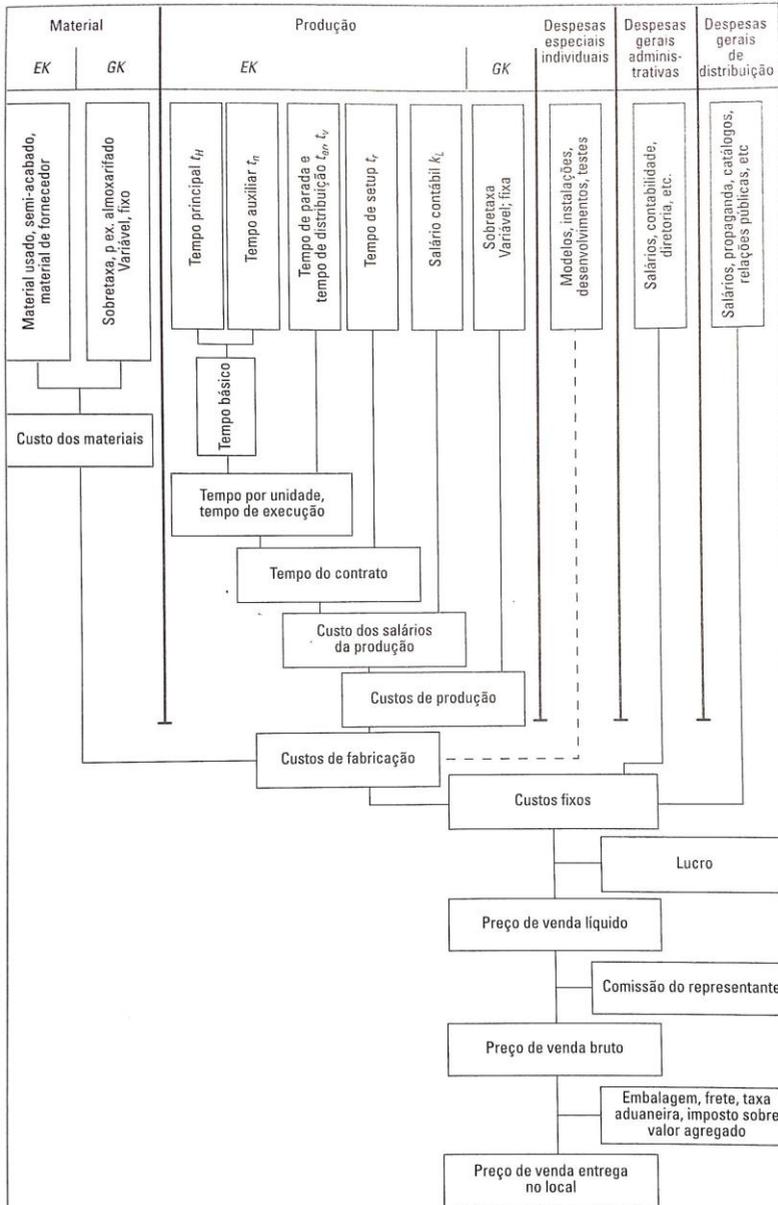
Os demais fatores são relativos ao processo manual de retirada da peça da câmara, polimento, controle de qualidade e tratamentos térmicos necessários para que a peça alcance as propriedades necessárias para sua aplicação e são mensuráveis pelo tempo de manipulação da peça e/ou do tratamento ou processo a qual será submetida.

---

<sup>1</sup> Custos diretos são aqueles alocados diretamente em um específico apontamento, por exemplo, para materiais e mão-de-obra para produzir um componente específico.

<sup>2</sup> Custo indiretos são aqueles que não podem ser alocados diretamente, por exemplo os custos de funcionamento de lojas e de iluminação.

Figura 25 - Composição do custo de produto



Fonte: Pahl et al. (2007)

Yim e Rosen (2012) estimam o custo geral pela soma de quatro fatores na equação X: custo de compra de maquinário (P), operação de máquina (O), custo de material (M) e custo de mão-de-obra (L), conforme a equação 3.

$$Custo\ Geral = P + O + M + L \quad (2)$$

Cada um dos fatores é detalhado nas equações a seguir e os termos descritos na Tabela 3.

$$P = \frac{Preço\ Maquinário \cdot T_b}{0,95 \cdot 24 \cdot 365 \cdot Y_{vida}} \quad (3)$$

$$O = T_b \cdot C_O \quad (4)$$

$$M = K_S \cdot K_R \cdot N \cdot v \cdot C_m \cdot \rho \quad (5)$$

$$L = T_l \cdot C_l \quad (6)$$

Nota-se que o cálculo de custo de operação (equação 4) está descrito como parte da equação anteriormente apresentada de Lindemann et al. (2012).

Tabela 3 - Definição dos fatores de custo

<b>Termos</b>	<b>Definição</b>
$T_b$	Tempo de construção (hora)
$Y_{vida}$	Vida útil da máquina (hora)
$C_O$	Taxa de operação (R\$/hora)
$K_S$	Fator de material suporte
$K_R$	Fator de reciclagem
$N$	Quantidade de peças
$v$	Volume da peça (m <sup>3</sup> )
$C_m$	Taxa do material (R\$/kg)
$\rho$	Densidade do material (kg/m <sup>3</sup> )
$T_l$	Tempo de mão-de-obra (hora)
$C_l$	Taxa de mão-de-obra (R\$/hora)

Fonte: autor

Com relação ao tratamento do custo de uma peça, existem quantias indiretamente relacionadas que não foram citadas anteriormente e são dirigidas particularmente a cada caso, como por exemplo, a redução de trabalho de montagem ao se atingir uma capacidade de atender uma alta complexidade a ponto de para incorporar duas ou mais peças em uma, ou ainda pela adição de encaixes para rápida união de peças. Este tipo de vantagem pode reduzir custos marginais de produção de itens montados (WELLER et al. 2015). Outro ponto não mensurado anteriormente é a capacidade de reduzir o tempo e custo de desenvolvimento do produto que a tecnologia pode proporcionar e, conseqüentemente, sua amortização no custo do item.

A estratégia de impressão a ser tomada na fabricação é um fator determinante para o desempenho de tempo e quantidade de material gastas no processo. Raut et al. (2014) elaboram um estudo sobre tempo e quantidade de material no processo baseado em extrusão de material, atingindo, conseqüentemente valores em custo. O entendimento da especificação da direção de construção tem uma forte relação com as cargas submetidas na peça. Ao cumprir esta especificação, cabe ao processo determinar em quais parâmetros e orientações operar dentro de uma faixa especificada.

Teitelbaum (2009) lista 6 diretrizes para redução de tempo de construção e uso de material para manufatura baseada em extrusão de material:

**Minimizar altura:** Reduzir o número de camadas a serem construídas reduz o tempo de impressão;

**Minimizar proporção de forma:** Alterar a orientação de construção da peça a fim de reduzir a proporção de forma com a intenção de reduzir o número de camadas. A proporção de forma é dada por:

$$\frac{\text{Altura eixo Z}}{\text{Altura menor eixo (X ou Y)}} = \text{Proporção de forma (7)}$$

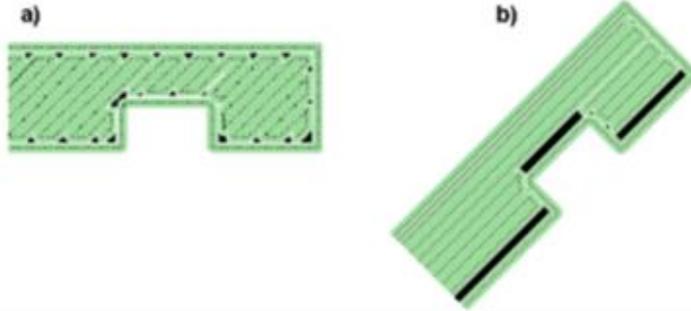
**Minimizar ressaltos:** Reduzir a quantidade de material de suporte necessária;

**Construir furos voltados para cima:** Garantir que o maior número de furos estará voltado para cima para reduzir a quantidade de material de suporte necessária;

**Construir objetos com a maior superfície voltada para baixo:** Posicionar a maior superfície no plano X-Y para reduzir a quantidade de material de suporte necessária;

**Rotacionar a peça em 45° com o eixo vertical:** Posicionar a peça de forma a tornar as linhas de preenchimento ortogonais ao contorno da peça a fim de maximizar a velocidade do cabeçote, conforme Figura 26.

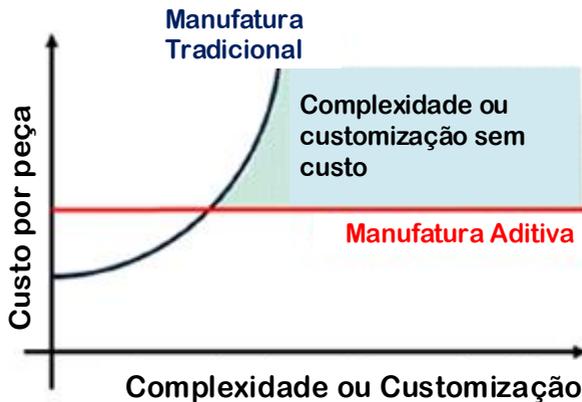
Figura 26 - Aumento do percurso linear do cabeçote no preenchimento da seção



Fonte: Teitebaum, 2009

Do ponto de vista de economia de escala, Conner et al. (2014) ilustra na Figura 27 que a manufatura aditiva possui um nível de custo por peça constante, independente da complexidade ou customização, ao contrário da manufatura tradicional que aumenta de acordo com a complexidade. Desta maneira, existe um ponto de transição sobre melhor custo entre os processos, logo o conhecimento sobre os contribuintes do comportamento do custo na organização possibilita maior rentabilidade.

Figura 27 - Comportamento de custo em função da complexidade ou customização



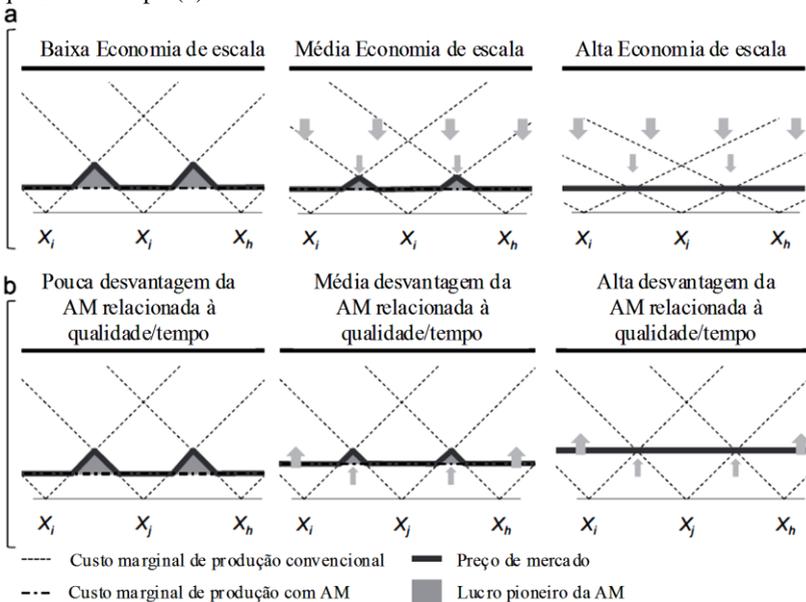
Fonte: traduzido de Conner et al. (2014)

A Figura 28a ilustra como o comportamento linear do custo marginal na produção por manufatura aditiva pode gerar lucro pioneiro que decresce de acordo com o maior da escala de produção e que aumenta com o maior distanciamento da configuração dos produtos base, representados por  $X_i$ ,  $X_j$  e  $X_n$ . Este lucro pioneiro é representado pela área cinza entre o preço de mercado e o custo marginal

Já sobre a qualidade e tempo demandados, as restrições técnicas da tecnologia, faz com que o custo marginal cresça de acordo com o aumento da especificação. Na Figura 28b, a maior demanda de qualidade e tempo representa um aumento da linha de custo marginal com a AM, consequentemente perdendo em competitividade frente aos processos tradicionais, pois se aproxima com a linha de preço de mercado. (WELLER et al. 2015).

Com a flexibilidade de oferecer produtos customizados via manufatura aditiva sem ser penalizado por custos de manufatura, existe um potencial para que empresas atendam um segmento de mercado voltado à exclusividade ou à maximização de desempenho do produto, conseguindo praticar preços mais altos, chamados de preços *premium*.

Figura 28 - Custo marginal em função da economia de escala (a) e qualidade/tempo (b).



Fonte: traduzido de Weller et al. (2015)

A capacidade de realizar reduções de custo e aumento de valor agregado também beneficia o cliente em uma maior funcionalidade e menor custo durante o ciclo de vida do componente. Por exemplo, a redução de peso de uma peça aeroespacial possibilita que, ao longo de um período de uso, seja poupado combustível ou ainda que a capacidade de carga da aeronave possa ser aumentada.

Ainda existem critérios econômicos-chave na área da manufatura aditiva que não podem ser diretamente expressados monetariamente. Este recurso auxilia na redução da duração do *time-to-market* ou no aumento da diversidade de produtos enquanto a quantidade produzida decai.

Gibson et al. (2015) ainda analisam os fatores de custo para a manufatura aditiva e entendem que o maior contribuinte para custos do processo é o investimento em máquinas, a variação de outros fatores de influência pode reduzir esta proporção, mas ainda permanecerá como um dos fatores mais influentes do processo de produção.

Os custos de material aparecem como o segundo maior determinante no custo final, seguido do custo para a preparação de dados. Neste fator, existe uma relação direta com a capacitação e experiência do engenheiro. O conhecimento é necessário para estratégias de posicionamento de impressão da peça.

Apesar das vantagens e oportunidades descritas anteriormente, a manufatura aditiva ainda encontra dificuldades no processo fabril pelo seu déficit – em geral – na velocidade de fabricação, qualidade, disponibilidade de matéria prima, reduzido volume de trabalho e custos de aquisição de máquinas. Estes itens são uma barreira à implementação em determinadas áreas de atuação, além da perda de competitividade da tecnologia contra grandes volumes de escala.

A manufatura aditiva é capaz de reduzir custos em várias áreas, como na redução na quantidade de peças, e conseqüentemente, reduzindo tempo de projeto, testes, tolerâncias e de almoxarifado. A integração de uma montagem em uma única peça também significa reduzir a quantidade de subcontratados a serem controlados e gerenciados. As tecnologias AM podem desempenhar seu potencial porque sustentam precisamente a individualização. Além disso, o rápido desenvolvimento que a tecnologia pode proporcionar, possibilita o antecipado posicionamento no mercado. A descontinuação da necessidade de ferramental de produção é outro fator chave.

### 2.1.4.6 Qualidade e Precisão dimensional

Processos de manufatura aditiva promovem vantagens técnicas e econômicas comparadas com outros processos já estabelecidos. Para Lieneke e Denzer (2016), entretanto, os princípios do processo devem ser pesquisados em detalhes para garantir uma aplicação confiável, especialmente com relação à limitação a desvios geométricos.

A divisão da Tabela 4 a seguir, mostra uma comparação entre os processos de manufatura aditiva baseado em extrusão de material (ABS – M30) e outros já estabelecidos como fundição, forjamento, etc.

A classificação derivada da norma DIN EN ISO 286-1, realizada por Lieneke et al. (2016) na Tabela 4 e na Tabela 5 ilustra que, no processo de *Fused Deposition Modeling* (FDM) utilizado pelos autores<sup>1</sup>, é possível atingir classes de tolerância entre IT09 e IT14<sup>2</sup>. No trabalho realizado pelos autores, a classe de tolerância é melhor em dimensões maiores, próximas de 300mm.

Tabela 4 - Visão geral das classes IT para diversos processos de manufatura

Processo	Classe IT										
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Fundição					■	■	■	■	■	■	■
Sinterização			■	■	■	■					
Conformação						■	■	■	■	■	■
Fresamento				■	■	■					
Corte						■	■	■			
Usinagem	■	■	■	■							
Furação						■	■	■			
Aplainamento		■	■	■	■	■					
Decapagem	■	■	■	■							
FDM			■	■	■	■	■	■			
x			■	■	■	■	■	■			
y					■	■	■	■			
z				■	■	■	■				

Fonte: traduzido de Lieneke et al. (2016)

<sup>1</sup> Máquina: Stratasys Fortus 400mc Movimento de mesa nos eixos *x-y* e cabeçote no eixo *z*. Material: ABS-M30, espessura de camada 0,178mm.

<sup>2</sup> *International Tolerance* (IT) é definida como a tolerância-padrão pela norma NBR 6158/1995. O grau de tolerância-padrão é descrito pelas letras IT e um número.

As condições de contorno durante a fabricação também devem ser levadas em consideração. A variação dos parâmetros do processo e influências na fabricação provavelmente levam a diferentes desvios dimensionais. Devido ao pré-processamento, decisões e atividades humanas influenciam indiretamente a precisão das peças (LIENEKE et al., 2016).

Tabela 5 – Tolerância-padrão possível e posições de zona de tolerância de acordo com a norma DIN EN ISO 286-1

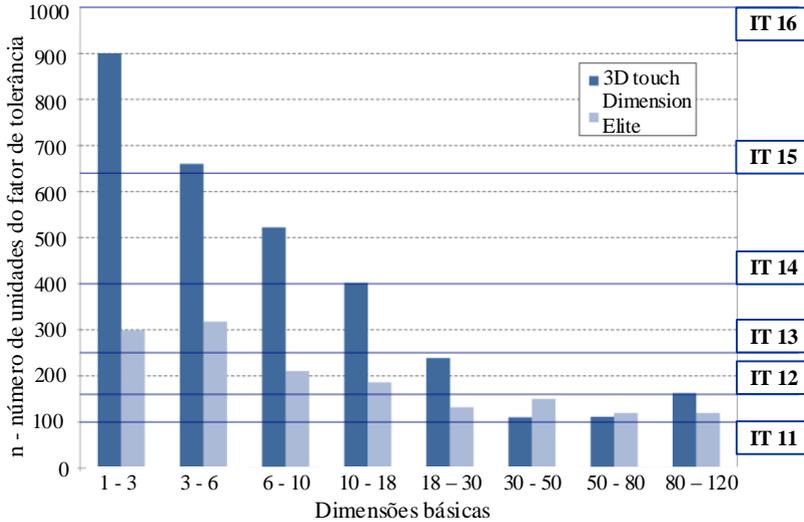
Dimensão [mm]	Classe IT		
	x	y	z
3	IT14	IT14	IT14
6	IT13	IT14	IT14
10	IT13	IT13	IT13
18	IT13	IT13	IT12
30	IT12	IT12	IT13
50	IT12	IT12	IT12
80	IT12	IT12	IT12
120	IT10	IT11	IT10
180	IT10	IT11	IT11
250	IT10	IT11	IT11
315	IT09	IT11	IT11
400	-	-	IT11

Fonte: adaptado e traduzido de Lieneke et al. (2016)

Minetola et al. (2016) apresentam um comparativo entre duas máquinas de extrusão de material, uma de proposta industrial e outra amadora. O autor utiliza um modelo CAD padrão com geometrias comumente encontradas em componentes mecânicos, ilustrado na Figura 30 e em seguida analisa os modelos impressos em ABS de ambas máquinas em função do grau de tolerância alcançado.

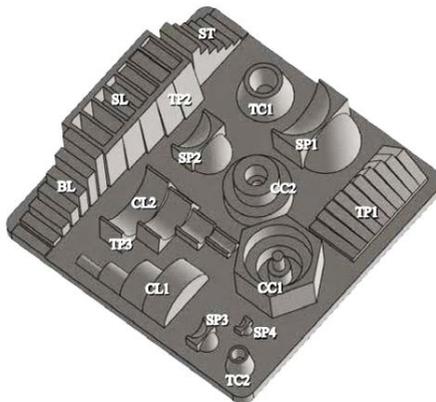
Resultados de Minetola et al. (2016) mostram que o equipamento industrial atinge maior precisão do que o amador em dimensões inferiores a 30mm e classe de tolerância similar ao encontrado por Lieneke et al. (2016) nas dimensões básica de 1 a 120mm conforme Figura 29. A análise de Minetola et al. (2016) é baseada no fator de tolerância  $i$  descritos na norma ISO 286-1:1988.

Figura 29 - Precisão dimensional em termos de classes IT para diferentes faixas de dimensões básicas



Fonte: adaptado e traduzido de Minetola et al. (2016)

Figura 30- Modelo CAD com geometrias comuns para componentes mecânicos.



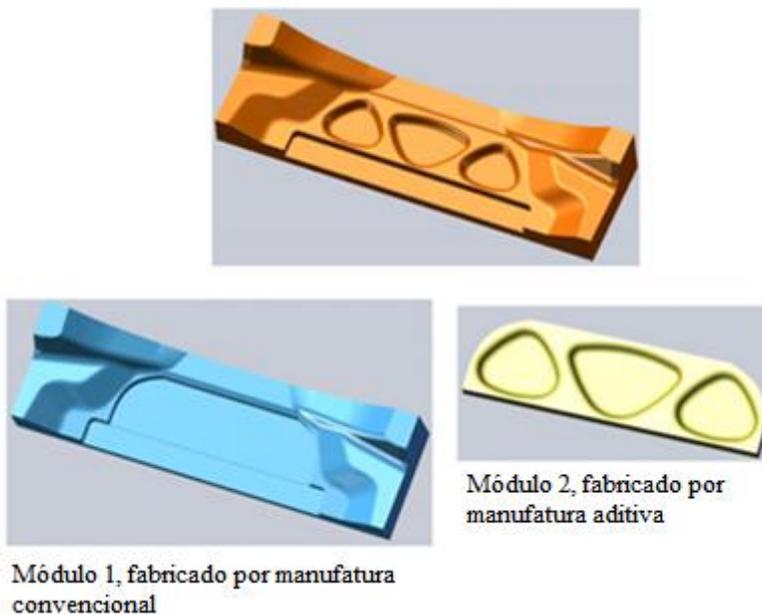
Fonte: Minetola et al. (2016)

Os processos de retirada de material também podem ser utilizados como forma complementar na qualidade e precisão dimensional. Uma forma de pré-processamento pode ser realizada considerando quais áreas de uma peça precisarão ser processadas posteriormente por um método

subtrativo (retificação, polimento, etc.) e adicionar material extra suficiente para obter um resultado adequado (GOUTIER, 2014).

Kerbrat et al. (2011), propõem uma metodologia para uma abordagem de manufatura híbrida, utilizando a manufatura aditiva para executar *features* complexas para os processos de fabricação convencionais e também estratégias de divisão de componentes para contribuir com a manufaturabilidade, conforme exemplificado na Figura 31.

Figura 31 - Divisão de componente em 2 peças, uma produzida por manufatura aditiva e ou por subtração de material



Fonte: Kerbrat et al. (2011)

#### 2.1.4.7 Otimização e ferramentas computacionais

O potencial da fabricação por adição de camadas fornece a oportunidade de aprimorar estruturas ineficientes. Componentes otimizados que explorarem os benefícios da manufatura aditiva podem parecer muito diferentes daqueles projetados por processos convencionais.

Métodos de otimização são amplamente utilizados para aprimorar a geometria do produto. Devido ao alto desempenho e ao custo acessível dos computadores, a otimização usando o *software* comercial é fácil e confiável. Tais opções de *software* apresentam interface amigável, dando aos usuários a capacidade de identificar variáveis do projeto, restrições, objetivos e resultados de otimização sem realizar algoritmos ou equações complicadas (SALONITIS, 2015).

Gibson et al. (2015) classificam a otimização de peças manufaturadas aditivamente em três grupos:

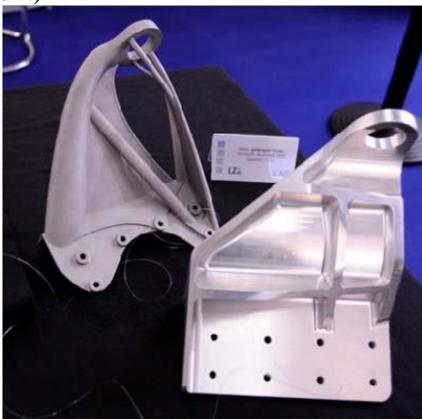
- Otimização de tamanho: os valores das dimensões são determinados;
- Otimização da forma: as formas das superfícies das peças são alteradas;
- Otimização de topologia: as distribuições de material são exploradas.

Na otimização de tamanho, os valores das dimensões selecionadas são determinados para melhor alcançar os objetivos, enquanto satisfazem quaisquer restrições. Para aplicações de otimização estrutural típicas, os objetivos podem incluir a minimização e tensão máxima, energia de deformação, deflexão, volume ou peso da peça.

A otimização da forma é a generalização da otimização de tamanho. Normalmente, a forma das curvas ou superfícies delimitadoras é otimizada para atingir objetivos e restrições similares. Como tal, as posições dos vértices de controle para curvas ou superfícies são frequentemente usadas como variáveis de projeto.

A otimização topológica é uma abordagem numérica que identifica onde o material deve ser colocado em um determinado domínio para alcançar a funcionalidade desejada para um determinado conjunto de cargas e restrições ao mesmo tempo em otimizando qualidades como uso/peso mínimo de material ou distribuição uniforme de estresse (THOMPSON et al., 2016). A otimização de topologia é útil nas áreas automotiva e aeroespacial, exemplificado na Figura 32, onde a redução de peso pode economizar energia utilizada durante o ciclo de vida do produto. Outras aplicações são encontradas em implantes biomédicos e processos de fundição.

Figura 32 - Peça aeronáutica. Otimizada impressa (à esq.) e usinada convencionalmente (à dir.)



Fonte: Doubrovski et al. (2011)

Muitas vezes, os resultados da otimização topológica são usados como entradas para problemas de otimização de tamanho ou forma subsequentes. Como nos métodos de otimização estrutural, as análises de elementos finitos são realizadas normalmente durante cada iteração do método de otimização, o que significa que a otimização topológica pode ser computacionalmente exigente (GIBSON et al., 2015).

#### 2.1.4.8 Limitações e Barreiras

Os atuais *softwares* para modelagem 3D, ou CAD (*Computer Aided Design*), são baseados em modelos sólidos e possuem várias limitações que os tornam menos capazes de aproveitar as capacidades únicas das impressoras 3D. Para algumas aplicações, o modelo 3D é um gargalo para a criação de novas formas e estruturas, na descrição das propriedades das peças desejadas e na especificação de composições de materiais. (GIBSON et al, 2015). Estes déficits implicam em dificuldades em conduzir o planejamento do processo. Potencialmente, esta questão retardará a adoção da tecnologia de manufatura aditiva.

O primeiro desafio para a modelagem 3D é a complexidade geométrica. O segundo desafio para os *softwares* CAD é representar diretamente os materiais para especificar a composição do material de uma peça. Como resultado, os modelos 3D não podem ser usados para representar partes com materiais múltiplos ou materiais compósitos. As representações de composição de material são necessárias para peças com

material graduado, interface entre camadas e ainda casos mais simples de materiais de enchimento de partículas ou fibras.

Além disso, a faixa de escalas de tamanho pode causar problemas no gerenciamento de tolerâncias internas no *software* CAD. Os atuais são incapazes de representar as características mesoestruturais, ou a composição de material graduado.

Além da modelagem 3D, Huang et al. (2014) sugerem novas capacidades dos *softwares* CAE para assistir relações complexas de processo-estrutura-propriedade, como: novas ligas, materiais compósitos e formas.

#### 2.1.4.9 Impacto na cadeia de suprimentos

A principal filosofia das estratégias de cadeia de suprimentos enxutas está no direcionamento de esforços para se eliminar ou reduzir desperdícios de recursos com atividades, itens, ou processos que não agregam valor aos clientes, consumidores (FÉLIX, 2017).

Os requisitos esperados de uma cadeia de suprimentos adequada são caracterizados por Perumal (2006) apud Pour et al. (2016) nas seguintes categorias:

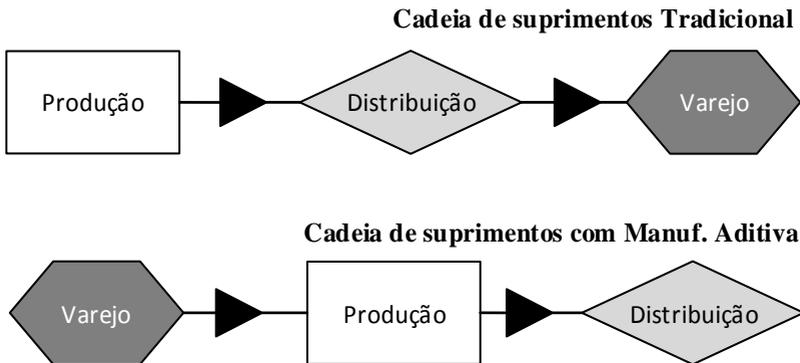
1. Resposta ao cliente (por exemplo, tempo de ciclo do pedido, qualidade e *time-to-market*);
2. Objetivos de eficiência (por exemplo: produtividade no trabalho, custo da cadeia de suprimentos e desperdícios);
3. Objetivos na utilização de ativos (por exemplo, estoques e capital de giro).

Para Pour et al (2016), existem características da manufatura aditiva que a transforma em uma abordagem inovadora, especialmente no que diz respeito ao gerenciamento da cadeia de suprimentos. Holmström et al, (2010) apud Pour et al (2016) citam como características:

1. Cadeias de fornecimento simples, caracterizadas por curtos *lead-times* e baixa rotação de estoques;
2. Redução de resíduos;
3. Otimização funcional do produto;
4. Possibilidade de mudanças rápidas no *design* e customização;
5. Não há requisitos para ferramental;
6. Possibilidade de produzir pequenos lotes.

Reeves (2008) apud Achillas et al. (2015) relatam que as cadeias de suprimento mudarão do modelo de Produção – Distribuição – Varejo para um modelo que atue eletronicamente, iniciando a produção e a distribuição para o cliente final, como ilustrado na Figura 33. É esperado que isso resulte em empresas que aumentem seus recursos financeiros em forma de capital de giro, com quase nenhum custo para a criação de ferramentas ou produção.

Figura 33 - Comparação entre a cadeia de suprimentos tradicional e moderna com manufatura aditiva



Fonte: traduzido de Reeves (2008) apud Achillas et al (2015)

Entre as implicações consequentes do uso e do desenvolvimento das tecnologias de AM, está a redução da necessidade de mão-de-obra na produção. Com a redução de processos intermediários na fabricação, estoques de produtos semiacabados e de necessidade de transporte de produtos, o uso de mão-de-obra tende a ser reduzido ainda mais (FÉLIX, 2017).

Pour et al. (2016) recomendam que cadeias de suprimentos curtas, descentralizadas e com baixa frequência de demanda sejam o foco da inclusão da AM. Esta situação é voltada para a resposta instantânea ao consumidor e pode ser benéfica para o setor de peças de reposição.

Segundo Pour et al. (2016), a descentralização dos processos de produção e o posicionamento próximo ao cliente é uma excelente estratégia para corte de custos de transporte e armazenamento. AM é uma boa alternativa se a empresa está decidindo se descentraliza ou não a sua produção. As implicações econômicas desta escolha precisam ser cuidadosamente estudadas, desde o capital para aquisição de maquinário,

assim como o custo associado com a obtenção de matéria prima podem gerar impedimento para desenvolver esta solução baseada na AM.

O autor complementa que, no estado atual da AM em termos de taxa de deposição, acabamento superficial e outros fatores importantes, ainda não é possível obter os níveis atingidos pela implementação dos métodos tradicionais.

#### 2.1.4.10 Direitos autorais

Implicações sobre os direitos autorais devem crescer pelo acesso e uso de plataformas on-line de aplicações impressas, seja para a criação de um arquivo de desenho, modificação de um projeto e digitalização de um objeto físico. Uma vez que o objeto pode ser descrito através de arquivos digitais, será muito fácil de ser copiado, distribuído e pirateado (QI et al, 2014).

O uso de escâneres portáteis ou captação de imagem via aplicativos de *smartphones* pode tornar a obtenção de dados de forma e tamanho muito prática e fácil, sendo, portanto, propício para coleta de informações e modelagem para cópias não autorizadas de produtos ou para engenharia reversa.

Da mesma forma, meios de defesa contra a engenharia reversa poderão ser explorados com o projeto apenas viável pela forma aditiva, sendo necessário um conhecimento profundo para configurar os parâmetros da máquina para alcançar o desempenho adequado. O nível de proteção baseia-se exatamente nesse conhecimento necessário para o processo de fabricação, portanto, o uso da manufatura aditiva traz uma proteção contra a pirataria de produtos, bem como um valor agregado em termos de uma maior eficiência deste produto com base na parte crucial bem selecionada (LINDEMANN et al., 2015).

Para Jahnke et al. (2013), decisões *make-or-buy* sobre componentes chave do projeto podem estar mais direcionadas à fabricação própria devido à proteção ao conhecimento essencial que carregam e sobre parâmetros importantes de impressão desses componentes. O risco da companhia se tornar vítima de violações contratuais é consequentemente menor.

Outro fator de proteção está relacionado com o documento CAD. Boa parte da informação relevante da produção da peça está armazenada neste arquivo, somado às especificações do material e parâmetros de máquina. A manufatura aditiva, no entanto, auxilia indiretamente na segurança por pirataria ao exigir conhecimento sobre a tecnologia para a compreensão do projeto da peça.

O aumento da complexidade de formas da impressão por camadas propicia a inscrição de marcas invisíveis, como códigos em cavidades fechadas e internas da peça que podem ser identificadas com passagem de luz ou ultrassom. Este recurso é interessante para confrontar a originalidade de peças em análise de responsabilidade sobre ocorrência de falhas.

Mais um aspecto é sobre a fusão de peças para a origem de uma com formas mais complexas e de função mais difícil de ser compreendida por concorrentes.

Na Figura 34, Lindemann et al. (2015) ilustram a adição de formas e características em uma peça responsável pela produção de bolhas em uma bomba para dificultar o entendimento das atribuições de função da peça com relação à sua forma, desta forma uma ação concorrente de engenharia reversa torna-se mais complicada.

Figura 34 - Bomba dispersora de bolhas. No detalhe acima, peça convencional. Abaixo, peça impressa.



Fonte: Lindemann et al. (2015)

## 2.2 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS (PDP)

### 2.2.1 Definições

Segundo Rozenfeld et al. (2006), desenvolver produtos consiste no 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, se chegar às especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção para que a manufatura seja capaz de produzi-lo, além de acompanhar o produto após o lançamento para se realizar as eventuais mudanças necessárias nessas especificações, planejar a descontinuidade do produto no mercado e incorporar as lições aprendidas ao longo do ciclo de vida do produto.

Modelo é uma representação abstrata da realidade que é construída, verificada, analisada e manipulada para incrementar compreensão da realidade (BROWMING e FRICKE, 2006), enquanto processo é um grupo organizado de atividades relacionadas que trabalham juntas para criar um resultado de valor (HAMMER 2001, apud BROWMING e FRICKE 2006).

Um modelo de referência genérico pode servir de base para uma empresa definir o seu modelo específico. Este documento serve de base para a especificação de projetos de desenvolvimento de produtos e proporcionam a repetitividade de projetos com o aprimoramento via um acumulado de boas práticas.

Modelos de referência são úteis para: focar nas atividades que agregam valor, proporcionar transparência e visibilidade para a força de trabalho, auxiliar na prevenção de falhas baseando-se em processos anteriores, indicar boas práticas em relação ao processo, proporcionar uma abordagem comum em diferentes tipos de projetos diferentes, entre outros (BROWMING e FRICKE, 2006).

Clark e Fujimoto (1991) entendem a definição de Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) como um processo pelo qual uma organização transforma dados sobre oportunidades de mercado e possibilidades técnicas em informações de valor para a produção comercial.

Ulrich e Eppinger (2007), entendem o PDP como um conjunto de atividades, iniciando com a percepção de uma oportunidade de mercado e se encerrando com a produção, venda e entrega de um produto.

PDP é um processo iterativo. Isto faz com que exista um ciclo natural projetar-construir-testar-otimizar, necessário para o aprimoramento das soluções (CAFFIN, 1997 apud ZANATTA, 2010).

### **2.2.2 Características**

O processo de desenvolvimento de produtos, comparado a outros processos de negócio, tem diversas especificidades. Rozenfeld et al. (2006) apresentam as principais características que diferenciam esse processo:

- Elevado grau de incertezas e riscos das atividades e resultados;
- Decisões importantes devem ser tomadas no início do processo, quando as incertezas são ainda maiores;
- Dificuldade de mudar as decisões iniciais;
- As atividades básicas seguem um ciclo iterativo do tipo: Projetar (gerar alternativas) – Construir – Testar – Otimizar;
- Manipulação e geração de alto volume de informações;
- As informações e atividades provêm de diferentes fontes e áreas da empresa e da cadeia de suprimentos; e
- Multiplicidade de requisitos a serem atendidos pelo processo, considerando todas as fases do ciclo de vida do produto e seus clientes.

Além destas características inerentes ao processo de desenvolvimento de produtos observa-se um grande impacto das exigências de mercado sobre a forma como as organizações estruturam seu PDP. Ou seja, o processo de desenvolvimento de produtos por seu caráter estratégico, sofre constante influência do mercado e assim, deve mostrar-se altamente flexível em termos de tempo, custo, qualidade e rapidez (BLEICHER, 2008).

Slack et al. (2002) afirmam que um dos objetivos mais evidentes para qualquer empresa é satisfazer ao mercado a que está tentando servir. Nenhuma operação produtiva que falhar continuamente em servir seu mercado de forma adequada tem chance de sobreviver a longo prazo. Bleicher (2008) correlaciona a ênfase do PDP com relação ao impacto no mercado na Quadro 1, a seguir.

Quadro 1 - Impacto do mercado no processo de desenvolvimento de produtos

Objetivo de desempenho da organização de acordo com exigências de mercado	Ênfase do processo de desenvolvimento de produtos
Qualidade	Deverá ser orientado e estruturado no intuito de produtos sem falhas e adequadas ao uso, utilizando-se, por exemplo, de atividades de identificação das necessidades reais dos clientes, além de ferramentas de controle e de previsão de falhas.
Rapidez	Deverá ser estruturado no intuito de facilitar o desenvolvimento de produtos que podem ser desenvolvidos e fabricados rapidamente (por exemplo, usando princípios de projeto modular) ou serviços que evitam demoras desnecessárias.
Confiabilidade	Deverá ser estruturado no intuito de tornar previsível cada estágio do processo, através, por exemplo, da utilização de <i>gates</i> e atividades de controle.
Flexibilidade	Deverá ser orientado no intuito de permitir o desenvolvimento de diferentes produtos, sem com isso alterar significativamente os parâmetros de custo, tempo e qualidade do PDP.
Custo	Deverá ser estruturado no intuito de desenvolver produtos com menor custo que o dos concorrentes e possuir atividade que permitam o desenvolvimento à menor custo de cada uma das peças ou elementos do produto.

Fonte: elaborado por Bleicher (2008) com base em Slack et al. (2002)

De forma que, definido o processo de desenvolvimento de produtos e suas características, pode-se agora revisar o modelo de referência para nortear as atividades para a execução do trabalho.

### 2.2.3 Modelos de referência

Processos de negócio ocorrem nas empresas independentemente de eles estarem explicitamente documentados. Muitas empresas têm processos que são conhecidos pelas pessoas que os executam no dia-a-dia, mas que não estão sistematizados formalmente.

Entretanto, um processo de negócio só pode ser aprimorado se ele puder ser analisado e se as suas ineficiências puderem ser identificadas.

Assim, a condução de iniciativas de melhoria requer que os processos estejam documentados nas empresas (ROZENFELD, 1996, apud ZANCUL, 2009).

A documentação de processos de negócio é realizada por meio de modelos dos processos. Um modelo é uma representação da realidade, geralmente com uso de elementos gráficos, que descreve o funcionamento dos processos de maneira esquemática. Existem vários métodos de modelagem de processos e o grau de detalhamento de um modelo de processo depende do objetivo considerado (ZANCUL, 2009).

São encontrados na literatura diferentes modelos de referência, normalmente ligados a enfatizar determinadas áreas do conhecimento ou setor de atuação. Outros modelos podem ser citados como: Pahl et al. (2007) sob um foco em atividades de engenharia, Ulrich e Eppinger (2000) sob uma análise mais densa da fase conceitual e Baxter (1995) com foco em ferramentas e atividades de design e ergonomia.

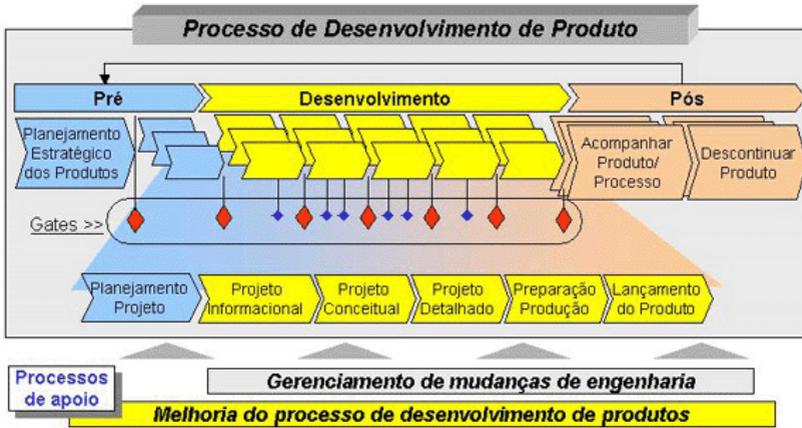
Um exemplo de modelo referencial é ilustrado na Figura 35. O modelo é um conjunto de macro etapas, atividades e tarefas organizadas de forma a padronizar e unificar o desenvolvimento dos produtos (ROZENFELD et al., 2006). Muitas vezes existem denominações diferentes entre os diversos modelos de referência, embora as etapas são descritas detalhando as atividades para execução do desenvolvimento do produto em questão.

Rozenfeld et al. (2006) organizam a macro fase de desenvolvimento em cinco fases discutidas abaixo:

- Projeto informacional;
- Projeto conceitual;
- Projeto detalhado;
- Preparação para a produção;
- Lançamento.

A fase de projeto informacional trata do detalhamento dos requisitos do produto. O objeto é desenvolver um conjunto de requisitos do produto a partir das informações levantadas no planejamento com clientes, concorrentes e mercado. A definição das especificações-meta servirá de base para guiar as demais atividades de desenvolvimento (ROZENFELD et al, 2006).

Figura 35 - Modelo de Referência



Fonte: Rozenfeld et al. (2006)

A fase de projeto conceitual, as atividades da equipe de projeto relacionam-se com a busca, criação, representação e seleção de soluções para o problema de projeto. Com base nas especificações, é definida a estrutura de funções do produto e são selecionadas as soluções tecnológicas para viabilizar as funções (ROZENFELD et al., 2006).

Na fase do projeto detalhado tem como objetivo desenvolver e finalizar todas as especificações do produto, para então serem encaminhados à manufatura e às outras fases do desenvolvimento. Os principais resultados são: estrutura de produtos, especificações dos componentes, desenhos finais com tolerâncias, protótipos, planos de processo e projeto dos recursos necessários para a fabricação (ROZENFELD et al., 2006).

As duas próximas fases visam colocar o produto no mercado. Durante as fases anteriores, vários planos e especificações foram desenvolvidos, e agora são realizados, como: especificação de máquinas, equipamentos, projeto de fábrica, marketing, etc. Na preparação da produção, os recursos de produção são instalados e o lote piloto é produzido para sua homologação.

O objetivo da fase de lançamento é colocar o produto no mercado visando garantir sua aceitação pelos clientes em potencial. Envolve a especificação do processo de vendas, da documentação comercial, treinamento da força de vendas e do lançamento do produto (ROZENFELD et al., 2006).

### 2.3 DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING (DfAM)

Segundo Rozenfeld et al. (2006), o DFX (*Design For X*) pode ser considerado uma base de conhecimentos com o objetivo de projetar produtos que maximizem aspectos como: confiabilidade, segurança, meio ambiente, entre outros; ao mesmo tempo que minimiza custos de ciclo de vida e de manufatura de produto. A contribuição esperada do DFX no desenvolvimento de produto é aumentar competitividade para racionalizar decisões e aumentar a eficiência operacional dos projetistas (LAVERNE et al., 2015).

Rozenfeld et al. (2006) afirmam que projeto de produto e projeto do processo não podem ser tratados como entidades separadas, desta forma, o DFM (*Design For Manufacturing*) relaciona o entendimento de como o projeto de produto interage com os componentes do sistema de manufatura de forma que os componentes que formarão o produto após a montagem sejam fáceis de serem fabricados.

Para Rosen (2007), o DFM significa que os projetistas devem buscar eliminar dificuldades de manufatura e minimizar custos, entretanto, com o desenvolvimento da tecnologia da prototipagem rápida (ou seja, manufatura aditiva), novas oportunidades de repensar o DFM surgiram para aproveitar as vantagens técnicas.

Gibson et al. (2015) entendem que o objetivo do DfAM deveria ser: maximizar o desempenho do produto através da síntese de formas, tamanhos, hierarquia de estruturas e composição de materiais sujeitos às capacidades das tecnologias de manufatura aditiva.

A análise dos fatores chave do DfAM é um importante passo para a estruturação da informação necessária para desenvolver a implementação da manufatura aditiva em novos produtos e reprojatos. A nova pesquisa bibliográfica sistemática realizada a seguir busca revelar como várias abordagens são elaboradas e como estas podem ser correlacionadas.

Para a estratégia de busca utilizou-se a *query* “Design for additive manufacturing” OR DFAM AND (“Product design” OR “Product development” OR PDP”).

Assim como na pesquisa da seção 2.1, para as buscas, foram selecionadas as bases de dados *Engineering Village*, *Emerald* e *Science Direct*, embora somente na língua inglesa. As buscas levaram em conta os resumos, títulos e/ou palavras-chave.

A pesquisa resultou em 107 artigos em janeiro de 2018, com 10 duplicados, resultando, em 97 trabalhos restantes. A organização da

bibliografia utilizou o software *Mendeley*. A divisão da quantidade de artigos com relação à base de dados é ilustrada no Quadro 2.

Quadro 2 - Relação dos artigos selecionados de acordo com o banco de dados

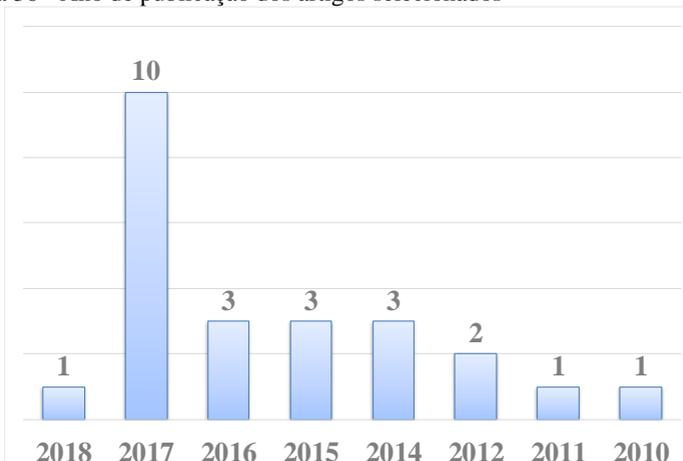
<b>Base de dados</b>	<b>Quantidade</b>
Engineering Village	40
Science Direct	45
Emerald	12
<b>Total</b>	<b>97</b>

Fonte: autor

Todos os artigos foram analisados com relação ao seus títulos, palavras-chave e resumo. Aqueles cujo foco não estava voltado para o DfAM, sua definição, características ou sem nenhuma relação próxima ao escopo da motivação da pesquisa bibliográfica, foram eliminados nesta seletiva. Com esta avaliação preliminar, restaram 31 trabalhos.

Os 31 artigos que compõem o portfólio foram pesquisados em suas bases de dados para obtenção, onde 24 estavam disponíveis. Todos estes foram completamente apreciados. A Figura 36 indica a atualidade das informações obtidas, pois todos os 24 artigos disponíveis foram publicados a partir do ano de 2010.

Figura 36 - Ano de publicação dos artigos selecionados



Fonte: autor

Como resultado da análise anterior, 8 artigos foram considerados totalmente de acordo com o tema da pesquisa, identificados no Quadro 3 e outros 7 possuem contribuições parciais, sendo potenciais fontes de construção do conhecimento básico para discussões subsequentes.

Quadro 3 - Artigos da seleção final para revisão

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Jornal</b>
Laverne et al. (2015)	<i>Assembly based methods to support product innovation in design for additive manufacturing: an exploratory case study</i>	<i>Journal of Mechanical Design</i>
Thompson et al. (2016)	<i>Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints</i>	<i>Manufacturing Technology</i>
Kumke et al. (2016)	<i>A new methodological framework for design for additive manufacturing</i>	<i>Virtual and Physical Prototyping</i>
Kumke et al. (2017)	<i>Methods and tools for identifying and leveraging additive manufacturing design potentials</i>	<i>Inter. Journal on Interactive Design and Manufacturing</i>
Rias et al. (2016)	<i>Towards additive manufacturing of intermediate objects (AMIO) for concepts generation</i>	<i>Inter. Journal on Interactive Design and Manufacturing</i>
Sossou et al. (2018)	<i>An additive manufacturing-oriented design approach to mechanical assemblies</i>	<i>Journal of Computational Design and Engineering</i>
Vaneker (2017)	<i>The role of design for additive manufacturing in the successful economical introduction of AM</i>	<i>CIRP Design Conference</i>
Zaman et al. (2018)	<i>Integrated product-process design: Material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making</i>	<i>Robotics and Computer-Integrated Manufacturing</i>

Fonte: o autor

O Quadro 4 foi então elaborado a partir da análise dos 8 artigos selecionados. Sua descrição visa ressaltar as características base dos trabalhos e a visão dos autores sobre o DfAM e sua forma de classificação e abordagem.

Quadro 4 - Análise dos artigos selecionados para a revisão bibliográfica

Autor	Descrição
Laverne et al. (2015)	Os autores utilizam de categorias primárias: DfAM para avaliação de conceitos e DfAM para tomada de decisão. Eles identificam três métodos de DfAM para auxiliar os projetistas e classificam 27 referências de acordo com estes métodos: DfAM Oportunista, DfAM Restritivo e DfAM Duplo. DfAM oportunista visa novos conceitos com uma abordagem de criatividade. DfAM restritivo considera os limites do maquinário da AM, propriedades e capacidade de manufatura do produto. DfAM duplo combina os dois métodos anteriores e é categorizado para projeto de conjuntos montados (A-DfAM) e projeto de componentes (C-DfAM). Além disso, os autores desenvolvem o eA-DfAM com foco nos estágios iniciais do desenvolvimento de produto, logo quando os requisitos de produto estão disponíveis.
Thompson et al. (2016)	Este trabalho é uma revisão sobre os diversos aspectos da AM. Em sua seção para o DfAM, o autor elabora uma visão geral sobre o DfMA ( <i>Design for Manufacturing and Assembly</i> ). De acordo com os autores, o termo DfAM tem sido largamente utilizado, embora exista poucas tentativas de defini-lo. Esta referência ainda sugere que normas específicas da AM irão se tornar mais relevantes e completas.
Kumke et al. (2016)	Os autores propõem uma classificação baseada em "DfAM no sentido estrito" e "DfAM no sentido amplo". O sentido <b>amplo</b> contém atividades genéricas executadas no processo de desenvolvimento de produtos, enquanto o sentido <b>estrito</b> inclui abordagens sobre diretrizes e metodologias para auxiliar engenheiros projetistas. a referência não considera atividades sobre o processo de manufatura como parte da definição do DfAM, pois são ações sob responsabilidade do especialista em manufatura. Por fim, os autores desenvolvem uma estrutura para o DfAM baseada na VDI 2221 e três modos de integração focando: inclusão de métodos genéricos, ferramentas específicas para DfAM e consolidação as abordagens DfAM.

Autor	Descrição
Kumke et al. (2017)	A referência foca no "DfAM no sentido estrito" apresentado em sua publicação anterior. Dentro desta classificação, os autores distinguem dois tipos de abordagens provenientes de Laverne et al. (2015): DfAM Restritivo e Oportunista. O artigo visa endereçar métodos e ferramentas do DfAM oportunista nas fases de projeto conceitual e anteprojecto. Os autores testam três hipóteses sobre o impacto dos métodos DfAM em termos de requisitos de experiência do projetista, uso e inovação.
Rias et al. (2017)	O artigo foca em abordagens criativas para estágios iniciais dos métodos DfAM. A referência desenvolve o conceito AMIO ( <i>Additive Manufacturing of Intermediate Objects</i> ). Os autores comparam estratégias DfAM e a qualidade dos conceitos gerados em 3 níveis: novidade formal, reconfiguração funcional e implementação de forma e função da AM. É proposto, por fim, uma estrutura para a abordagem criativa em cinco passos além da aplicação em dois estudos de caso.
Sossou et al. (2018)	Os autores propõem uma abordagem DfAM para auxiliar o projeto de conjuntos montados. Uma abordagem de projeto orientada à AM baseada na análise de funções, estruturação de produto e projeto de peças, utilizando requisitos funcionais e restrições da AM. Eles utilizam a base de funções de Hirtz et al. (2002) para análise funcional do produto. "As restrições são consideradas através das atividades de ajuste de folgas, configuração de impressão, escolha da direção de impressão e acessibilidade à espaços vazios." (tradução livre)
Vaneker (2017)	O autor apresenta uma estratégia baseada no DfAM no ciclo de vida do produto de Pahl et al. (2007). Oito passos são relacionados: Necessidade do mercado; DfAM; Software; Material; Processo; Pós - Processamento; Tempo e Custo; Impacto ambiental. A referência propõe uma abordagem DfAM para avaliar a adequação de uma peça para o processo de AM utilizando requisitos funcionais (funções, restrições, objetivo e variáveis livres) e limitações dimensionais.
Zaman et al. (2018)	Os autores propõem a metodologia MPS ( <i>Material Process Selection</i> ) utilizando o AHP ( <i>Analytical Hierarchy Process</i> ). O procedimento contém dois domínios: Produto e Processo. Além de três etapas principais: Tradução, Triagem e Classificação. Os dois primeiros passos possuem diretrizes DfAM como entrada de seus processos e diversas atividades para obter mais informação sobre o processo de tomada de decisão.

Fonte: o autor

A manufatura aditiva pode criar diferentes tipos de recursos e impor diferentes tipos de restrições além de outros processos de fabricação. Portanto, eles exigem diferentes regras e ferramentas de projeto específicas do processo além de requerem diferentes abordagens de metrologia e controle de qualidade. Ao mesmo tempo, a capacidade da impressão 3D reduz a necessidade de se realizar atividades como, por exemplo, a montagem (THOMPSON et al, 2016).

Para Laverne et al. (2015), o DfAM (*Design For Additive Manufacturing*) é um conjunto de métodos e ferramentas que auxiliam os projetistas a levarem em conta as especificidades da Manufatura aditiva durante a fase de projeto.

O DfAM oportunista é útil para auxiliar os projetistas a explorar complexidade da geometria e/ou de material oferecida pela manufatura aditiva. Seu objetivo é propor novas formas ou novos conceitos em uma abordagem baseada no princípio de que não existe limite na viabilidade de formas e distribuição de materiais. Nesta classificação estão englobadas as técnicas de otimização e aqueles que definem características de projeto produzidas por tecnologias específicas de manufatura aditiva.

O DfAM restritivo, continua o autor, visa considerar os limites da manufatura aditiva, busca-se a convergência entre o modelo geométrico nominal correspondente a uma representação ideal de abstrações do produto, isto é, sem defeitos e incluindo as variações geométricas previstas devido ao processo de fabricação.

Kumke et al. (2016) aderem à subdivisão tradicional nas fases de planejamento, fase informacional, conceitual e detalhado, como na VDI 2221. A estrutura tem como requisitos: suporte a todas as fases de projeto, modularidade, facilidade de uso e nível de abstração, orientado a metas e grau de inovação.

DfAM no sentido estrito inclui abordagens centrais do processo de projeto. As regras de projeto para a AM constituem basicamente o DfAM no sentido estrito, no entanto, elas não necessariamente levam em conta as capacidades únicas da AM que podem ser indispensáveis para otimizar um produto em termos de desempenho ou produção eficiente em termo de custo.

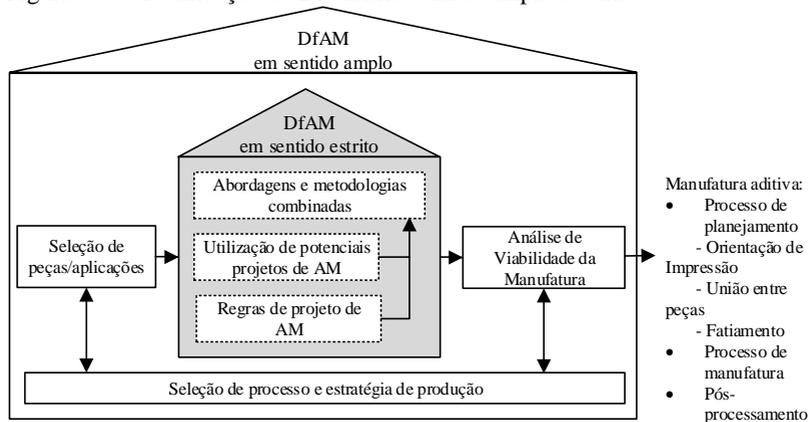
Já o DfAM no sentido amplo incorpora outras abordagens relacionadas ao DfAM em torno de "DfAM no sentido estrito" que está incluído nesta categoria como seu centro, como é ilustrado na Figura 37. Atividades genéricas podem ser relacionadas ao DfAM amplo como por exemplo: seleção de processos, seleção de peças/aplicações, e atividades à jusante, como análises de fabricação.

Uma primeira aproximação para complementação das abordagens do DfAM é realizada por Kumke et al. (2017) ao posicionar as classificações de DfAM restritivo e oportunista de Laverne et al. (2015) dentro do DfAM no sentido estrito. Rias et al. (2017) em sua proposta abordagem criativa declaram seu embasamento nas obras de Maidin et al. (2012) e Boyard et al. (2013). Estes posicionamentos mostram uma integração para gerar maior profundidade na discussão entre os autores

Algumas associações adicionais podem ser levantadas entre os autores analisados como:

- Abordagem DfAM em sentido amplo de Kumke et al. (2016) e os oito passos no ciclo de vida de Vaneker (2017);
- Processo de seleção de material de Zaman et al. (2018) que pode ser enquadrado no DfAM restritivo de Laverne et al (2015) pela análise da capacidade do processo e no DfAM estrito de Kumke et al. (2016) pela roteirização de atividades em auxílio aos projetistas;
- Uso do DfAM para projetos de conjuntos montados apresentados por Sossou et al. (2018) passa pela análise da capacidade do processo tratado no DfAM restritivo de Laverne et al. (2015), embora esteja também associado no Dual DfAM em sua abordagem para montagem.

Figura 37 - Classificação do DFAM no sentido amplo e estrito.



Fonte: Kumke et al. (2016)

## 2.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

A revisão bibliográfica apresentada fornece subsídios para a abordagem do problema do trabalho. A primeira contribuição é o estudo das tecnologias de manufatura aditiva, a fim de avaliar as características do processo baseado em extrusão de material para o foco deste estudo. O baixo custo, popularidade e grande quantidade de estudos relacionados a este processo são fatores que tornam interessante a análise deste escopo, de modo a delimitar a fronteira de estudos a serem realizados.

O segundo ponto discutido neste capítulo está relacionado às características do processo de forma geral e seu impacto no ciclo de vida do produto. Este, junto com os estudos acerca do DfAM e PDP constroem o embasamento para estruturar a sistematização no capítulo seguinte.

A pesquisa bibliográfica mostrou-se com pontos de análise comum com aquela descrita por Kumke et al. (2016), especialmente nos seguintes aspectos:

**Falta de integração com estruturas ou métodos comuns.** Embora o DfAM seja bastante entendido como um conceito que abrange todas as fases do projeto, nenhum método ao estilo da VDI 2221 está disponível para o DfAM.

**Independência entre as abordagens DFAM.** Na pesquisa efetuada por Kumke et al (2016), quase todas as abordagens de DfAM são desenvolvidas independentemente e não desenvolvidas uma sobre a outra, basicamente não existe interface entre os elementos do DfAM.

**Limitada validade das regras de projeto para manufatura aditiva.** As interações entre os parâmetros do processo e as propriedades específicas da peça são altamente complexas, tornando muito difícil realizar previsões por meio de simulação do processo. Desta forma, a validade das diretrizes de projeto fica restrita a um princípio físico específico, material ou máquina.

**Foco na utilização de potenciais únicos para manufatura aditiva.** A manufatura aditiva é frequentemente utilizada para a otimização de um objetivo específico de projeto, como por exemplo a redução de peso ou do número de operações de montagem.

Desta forma, identifica-se que existem diversas frentes de estudo sobre o DfAM, embora dificilmente integradas ou aplicadas sistematicamente em um modelo de referência tradicional, mas sim adaptadas em estruturas mais simples e voltadas para solução de problemas específicos. Uma segunda particularidade é a abordagem do DfAM sem um processo diretamente relacionado, julgando sua aplicação para qualquer processo de manufatura aditiva. Entretanto, atualmente

existem processos consideravelmente diferentes com relação a tempo de construção, custo, qualidade, entre outros fatores.

De forma semelhante à abordagem da revisão bibliográfica de Kumke et al (2016), na elaboração desta revisão, alguns trabalhos foram categorizados de acordo com a sua abordagem principal no contexto das fases do desenvolvimento de produto de Pahl et al (2007).

No Quadro 5, as fases estão identificadas como “P” a fase de planejamento e esclarecimento da tarefa (*Planning and clarifying the task*), “C” sobre o projeto conceitual (*Conceptual design*); “E” a fase de anteprojetado (*Embodiment design*) e, por fim, “D” para o projeto detalhado (*Detail design*). Em negrito estão indicadas as classificações retiradas de Kumke et al. (2016).

Quadro 5 - Classificação da revisão bibliográfica em fases de desenvolvimento de produto de Pahl et al. (2007)

Autor	Ano	FASE PDP			
		P	C	E	D
<b>Boyard et al.</b>	<b>2014</b>		<b>X</b>	<b>X</b>	
Campbell et al.	2014	X	X	X	
<b>Doubrowski et al.</b>	<b>2011</b>		<b>X</b>	<b>X</b>	
Kumke et al.	2017		X	X	
Kumke et al.	2016	X	X	X	X
Laverne et al.	2015		X	X	
Lindemann et al.	2012	X	X	X	
<b>Maidin et al.</b>	<b>2012</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		
Orquéra et al.	2017			X	
Ottosson et al.	2016		X		
Rias et al.	2016		X		
<b>Rosen, D.</b>	<b>2007</b>		<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
Salonitis, K.	2016			X	
Vaneker, T.	2017	X	X	X	
<b>Yang et al.</b>	<b>2015</b>		<b>X</b>	<b>X</b>	

Fonte: o autor

Em ambos levantamentos, verifica-se um maior número de abordagens para as fases de projeto conceitual e *embodiment*. Os estudos levam a este padrão por abordar a manufatura aditiva como um processo que auxilia a conceber novos conceitos e proporcionar uma antecipação

de protótipos para decisões de projeto. Este modo de participação no projeto de produtos é mais claro a primeira vista ao se tratar de manufatura aditiva, pois são recursos mais explícitos. Por outro lado, nas fases de planejamento e na fase de projeto detalhado há uma quantidade reduzida de abordagens, principalmente em estudos de caso.

Dentre o material pesquisado, três abordagens foram consideradas de escopo paralelo ao trabalho. No Quadro 6 estão descritas as referências de Goutier (2014), Kumke et al. (2016) e Laverne et al. (2015).

Quadro 6 - Descrição das principais referências

<b>Autor</b>	<b>Descrição</b>
Goutier (2014)	Apresenta um ciclo de desenvolvimento de produtos modificado de Pahl et al. (2007), vinculando as etapas de desenvolvimento tanto à coleta de informações quanto a etapas de implementação.
Kumke et al. (2016)	Proposta de uma nova estrutura para o DfAM, com divisão de acordo com o nível de abrangência. Aplica a nova estrutura no contexto da divisão de fases e atividades da VDI 2221.
Laverne et al. (2015)	Estudo de caso sobre como o conhecimento em AM altera as soluções apresentadas nas fases de conceito de projeto através das ideias geradas. Divide o DfAM em 3 métodos e explora as abordagens de projeto voltadas para o componente e para a montagem.

Fonte: o autor

Considera-se que existem poucos trabalhos voltados a estruturar as características da manufatura aditiva em um modelo de referência de desenvolvimento de produtos, especialmente nas fases iniciais. São satisfatórias as informações sobre a capacidade e especificidades da manufatura aditiva, embora exista a necessidade da contextualização destas em estudos de casos mais amplos, ou seja, que não estejam limitadas aos problemas específicos de projeto.

### 3 SISTEMATIZAÇÃO DO DfAM PARA O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

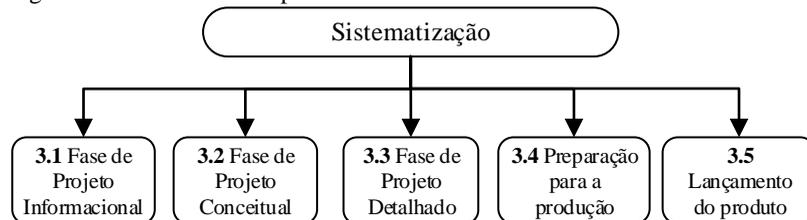
Neste capítulo serão tratadas a sistematização e as propostas resultantes desta para o suporte à decisão sobre a adoção da AM e, eventual uso, no desenvolvimento de produtos.

Inicia-se com a organização do conhecimento de forma a enquadrá-lo no contexto do processo de desenvolvimento de produtos. A priori é utilizada uma estrutura de divisão de fases e atividades de um modelo de referência já conhecido e, a partir deste, é disposta uma sequência de passos para preparar as informações, convertê-las em propostas e externá-las de forma conveniente.

O ponto de partida para a estruturação da sistemática foi a escolha do modelo de referência do PDP. O modelo delineado por Rozenfeld et al. (2006) é bem organizado, possui um fácil acesso às informações e tem sido aceito como referência de modelo de PDP por vários trabalhos acadêmicos.

O capítulo está arranjado de acordo com cada fase contida na macro fase de desenvolvimento de Rozenfeld et al. (2006), Figura 38. Desta forma, cada fase será tratada em seções separadas e no nível de atividades.

Figura 38 - Estrutura do capítulo 3



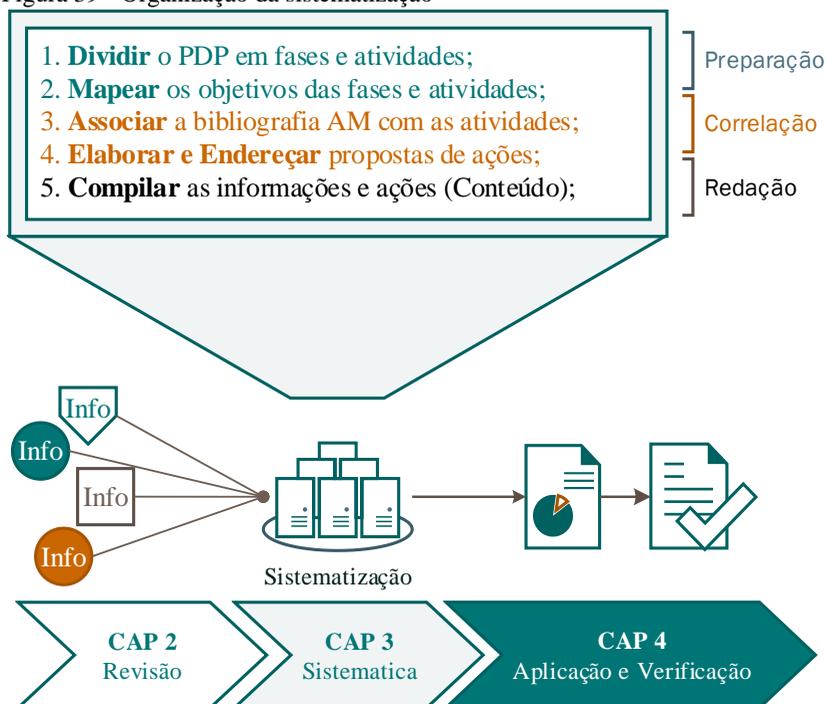
Fonte: o autor

Conforme ilustrado na Figura 39, o método para executar a sistematização é proposto em 5 passos, agrupados em 3 partes: **preparação, correlação e redação**.

Desta forma, a estrutura de fases e atividades no processo de desenvolvimento de produtos é dividida conforme Rozenfeld et al. (2006) e tem os objetivos de suas atividades mapeadas por meio das informações disponibilizadas pelos próprios autores. Esta **preparação** visa sintetizar os objetivos das atividades.

Assim, parte-se para **correlacionar** as atividades do PDP com o conhecimento sobre a AM afim de produzir propostas de boas práticas de utilização do recurso.

Figura 39 - Organização da sistematização



Fonte: o autor

A princípio, é realizada a associação entre os objetivos da atividade do PDP com o referencial teórico sobre AM. A coletânea de referências que será associada a cada atividade é definida no momento da concepção a partir das leituras e informações adquiridas pelos referenciais teóricos do Capítulo 2.

A partir desta associação, as propostas são elaboradas e endereçadas às áreas de conhecimento relacionadas às atividades conforme mostrado na Figura 40. A elaboração das propostas é uma das contribuições desta dissertação, enquanto que o endereçamento segue o especificado por Rozenfeld et al. (2006). As áreas de conhecimento também podem ser entendidas como os departamentos dentro de uma companhia.

Figura 40 - Áreas de conhecimento no desenvolvimento de produto

<b>Sigla</b>	<b>Áreas de conhecimento</b>
PROJ	Gestão de Projetos
AMB	Meio Ambiente
MKT	Marketing
ENGP	Engenharia de Produto
PROC	Engenharia de Processos
PROD	Produção
SUPR	Suprimentos
QUAL	Qualidade
CUST	Custo

Fonte: adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

Acredita-se que o passo descrito anteriormente deve ser realmente composto por dois verbos: elaborar e endereçar, pois, para elaboração da proposta, é necessário saber a quem será sugerida, logo são ações indissociáveis dentro do mesmo passo.

Para organizar e desenvolver os 4 primeiros passos foi elaborada a planilha exemplificada no Quadro 7. Nesta organização é possível que determinada proposta tenha uma quantidade indeterminada de autores ou assuntos correlatos.

Quadro 7 - Planilha de organização e desenvolvimento das 4 etapas iniciais da sistemática

1. Dividir	2. Mapear	3. Relacionar		4. Listar e endereçar														
Fases/Atividades	Objetivos	Bibliografia AM	Revisão	Proposta	Áreas de conhecimento													
<b>Fase 1</b>																		
Atividade 1.1	Obj. 1.1	Autor 1 et al. Autor 2 et al.	Assunto 1 Assunto 2	Proposta 1	PROJ	AMB	MKT	ENGP	PROC	PROD	SUPR	QUAL	CUST					
Atividade 1.2	Obj. 1.2	Autor 3 et al.	Assunto 3	Proposta 2	PROJ	AMB	MKT	ENGP	PROC	PROD	SUPR	QUAL	CUST					
...	...	...	...	...														
<b>Fase 2</b>																		
Atividade 2.1	Obj. 2.1	Autor 4 et al. Autor 5 et al. Autor 2 et al.	Assunto 4 Assunto 5	Proposta 3 Proposta 4	PROJ	AMB	MKT	ENGP	PROC	PROD	SUPR	QUAL	CUST					
...	...	...	...	...														

Fonte: o autor

Por fim, as informações e propostas resultantes da sistematização são compiladas na forma de texto – **redigido** nas seções seguintes deste

capítulo – de modo que as proposições contribuam no projeto para manufatura aditiva em equipes de projeto.

### 3.1 FASE DE PROJETO INFORMACIONAL

A fase de projeto Informacional tem o objetivo de identificar os requisitos do produto que atendam a necessidade do cliente. Isto é realizado a partir de informações obtidas no planejamento ou de outras fontes como clientes ou concorrentes.

Com o estudo de correlações entre os objetivos das dez atividades previstas por Rozenfeld et al. (2006) para a fase de projeto Informacional e a literatura da AM, foram identificadas relações em quatro atividades. Estas quatro estão destacadas na Figura 41 e, portanto, receberão uma ou mais propostas cada.

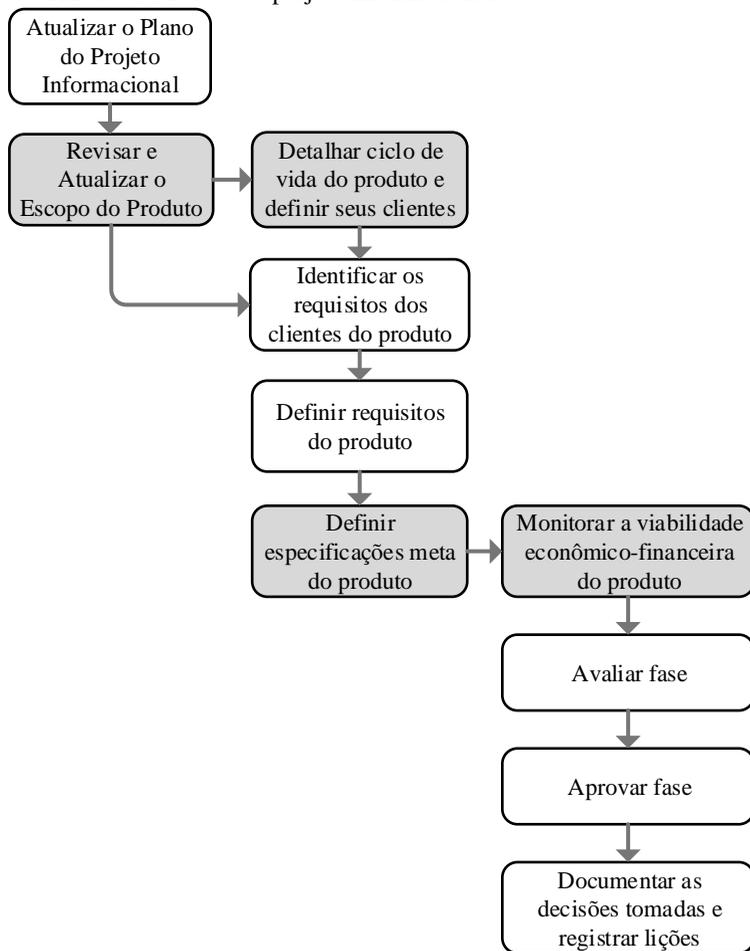
São as especificações discutidas nesta fase que orientarão a equipe em busca de soluções de projeto e tomadas de decisão. Nesta fase busca-se compreender como a AM pode ser considerada nas fases iniciais do projeto.

As propostas explanadas a seguir têm um foco no claro entendimento da equipe de projeto e seus clientes sobre a atuação do processo de AM por extrusão de material de domínio da companhia.

Desta forma, é ressaltada a importância do conhecimento sobre as limitações do processo para sua implementação, o domínio de conhecimento necessário, os impactos em custo logístico, tempo e critérios que devem ser levados em conta para a ação decisória de como se utilizar a AM na continuidade do projeto.

Logo, propõe-se, a seguir uma busca informacional também sobre a AM para que se empregue suas especificidades o quanto antes no desenvolvimento de produtos.

Figura 41 - Atividades na fase de projeto Informacional



Fonte: adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

### 3.1.1 Revisar e Atualizar o Escopo do Produto

Segundo o PMBoK (2004), o processo de desenvolver a Declaração do escopo preliminar do projeto aborda e documenta as características e limites do projeto e seus produtos e serviços associados, além dos métodos de aceitação e controle do escopo. A declaração do escopo inclui entre

outros itens: objetivos do produto e do projeto, riscos iniciais, restrições do projeto, EAP inicial, estimativa de custos, etc.

O objetivo desta atividade é a coleta e análise de informações a respeito dos concorrentes e do processo de AM por extrusão de material sob domínio da empresa. As particularidades da AM nesta atividade são em um primeiro momento referentes ao **entendimento do processo baseado em extrusão com relação às suas capacidades e limitações** para uma utilização futura no projeto. Um segundo ponto de estudo é o **alinhamento do então processo com a declaração de escopo do produto** que se esboça no decorrer desta atividade.

Ahuja et al. (2015) listam em seu trabalho diversos fatores-chave para implementação da AM (vide seção 2.1.4.1). Um aspecto base em seu desenvolvimento é o claro entendimento dos participantes do projeto, desde o nível estratégico, operacional até a cadeia de suprimentos. A comunicação e difusão das informações acerca do processo colabora para que não ocorram resultados inesperados devido a uma insipiência para se alcançar um bom desempenho em sua aplicação, ou devido às grandes expectativas sobre a utilização de uma nova tecnologia disruptiva.

Um estudo de impacto em áreas no desenvolvimento de produtos é realizado por Niaki e Nonino (2017). Através deste estudo os autores conseguem identificar os fatores positivos e os que ameaçam a implementação da AM. Um robusto nível de informação neste momento do projeto é importante para compreender quais seriam os critérios eliminação, citados como “*K.O. criteria*” em Lindemann et al. (2015).

O conhecimento das limitações do processo de fabricação por AM neste momento inicial de projeto pode evitar um desenrolar de atividades de implementação que seriam desnecessárias e ainda, direcionar a devida atenção aos parâmetros críticos.

Ainda há uma observação suplementar na **utilização de recursos paralelos com a AM para análise de produtos concorrentes**, como por exemplo: o uso de escâneres, arquivos de modelagem CAD “*open source*” e protótipos. Por meio destes recursos é possível alcançar um nível de informação e conhecimento maior sobre funcionamento, aspectos construtivos, texturas, ergonomia, entre outros detalhes de produtos atuais no mercado ou de referências úteis para o desenvolvimento.

A seção 2.1.4.10 discorre sobre as implicações sobre os direitos autorais, obtenção de informações e como um projeto pode utilizar da AM para evitar uma situação de cópia ou dificultar o repasse de informações via engenharia reversa.

As ações propostas exploram difusão de informação e alinhamento do escopo que geram esforços coletivos, além de ações pontuais de

pesquisa de concorrentes envolvendo setor de Marketing e limitações do processo envolvendo Engenharia de Processos e de Produto.

### 3.1.2 Detalhar ciclo de vida do produto e definir seus clientes

A utilização da AM pode alterar a forma como o projeto se relaciona com os seus clientes ao longo do ciclo de vida. Propõe-se que exista uma reflexão sobre uma potencial configuração dos envolvidos no projeto e seus conhecimentos acerca do processo baseado em extrusão. Por exemplo, a possibilidade de se construir peças em máquinas distantes do local de desenvolvimento de projeto, por meio de envios de arquivos de modelos 3D via internet, pode **aproximar o cliente final e a produção, eliminar movimentações, logística e até proporcionar customizações**.

A seção 2.1.4.9 ilustra as características esperadas de uma adequada cadeia de suprimentos e como a AM pode estar inserida neste contexto. Nota-se que através do estudo de uma possível configuração da cadeia de suprimentos voltada para a AM, espera-se **esboçar quem serão os seus potenciais partícipes e desta forma prepará-los na forma de capacitação e integração**. Pelo momento inicial do projeto, ainda não é proposto que se faça um delineamento preciso de como a cadeia poderá se configurar.

Na seção 2.1.4.1 são apresentados os temas principais de Simpson et al. (2017) para o ensino à mão-de-obra envolvida com a AM, como: a relação entre o processo e materiais na forma de acondicionamento, utilização e manutenção; práticas de projeto que incentivem a liberdade de projeto para a AM; entre outros. Logo, é necessário que os envolvidos no projeto em seu ciclo de vida estejam capacitados para lidar com as particularidades do processo de AM.

Em exemplo, pode-se especificar que determinada peça seja manufaturada distante de seu polo de desenvolvimento como forma de redução do custo logístico. Entretanto a configuração e manutenção da impressora 3D além do cumprimento de estratégias de impressão devem ser seguidas para conseguir realizar o produto dentro do especificado em projeto.

### 3.1.3 Definir especificações-meta do produto

As especificações-meta de um produto são parâmetros quantitativos e mensuráveis que o produto projetado deverá ter. As especificações de projeto, além de proporcionar um guia para a obtenção de concepções para o produto, devem claramente refletir os elementos em relação aos quais

serão avaliados depois do projeto e do produto resultante (ROZENFELD et al., 2006).

Em uma abordagem orientada ao projeto, a definição das especificações-meta serve de balizador para a decisão da implementação da tecnologia voltada à manufatura aditiva de extrusão de material. Rozenfeld et al. (2006) apresentam uma *checklist* baseado na proposta de Pugh (1990) para a obtenção de requisitos de produtos de forma sistemática.

Inspirada na abrangência desta *checklist*, a lista a seguir é proposta com uma série de temas para gerar **reflexões sobre como o processo de AM está posicionado com relação às especificações meta que estão sendo definidas.**

1. **Desempenho:** Funções que o produto tem que cumprir. *Existem features específicas do produto e de alta complexidade que são impossibilitadas pela manufatura convencional e que a AM pode contribuir para alcançar uma função?*
2. **Vida em serviço:** Vida útil esperada para o produto. *Um produto feito a partir da AM baseada em extrusão suportaria adequadamente as cargas ou o desgaste do uso?*
3. **Eficiência:** Atender especificações relativas à eficiência levantadas (custo, confiabilidade, manutenção, etc). *Em uma avaliação preliminar, a AM por extrusão tem potencial para atingir as especificações determinadas?*
4. **Quantidade:** Tamanho do lote. *AM é uma produção de lote único. Existe favorecimento utilizando a AM neste aspecto?*
5. **Infraestrutura:** Possibilidade de investimentos em novas instalações: *Como seriam os novos cenários fabris? Compra de novos maquinários, unidades de pós-processamento e centros de produção avançados?*
6. **Tamanho e Peso:** Limites de tamanho e peso em função do produto, transporte e uso: *Volume de impressão da máquina pode influenciar negativamente na produção?*
7. **Estética, aparência e acabamento:** Preferências dos consumidores e tendências. *A qualidade superficial e a precisão dimensional da AM pode satisfazer as exigências dos consumidores?*
8. **Materiais:** Necessidade de materiais especiais. *Quais são as características dos materiais disponíveis no processo de extrusão?*

9. **Normas:** Normas aplicáveis ao produto e a produção. *Existem normas de processo e/ou de produto que influenciam no projeto em manufatura aditiva por extrusão?*
10. **Ergonomia:** Aspectos relativos à percepção, uso e manipulação. *A AM facilitaria para atingir as especificações de ergonomia ou gerar novas formas do produto?*
11. **Política do produto:** Influência da família ou plataforma sobre o produto. *A AM pode contribuir com a modularidade, compartilhamento de peças e na família do produto que está sendo desenvolvido?*
12. **Reuso, reciclagem e descarte:** Reuso de materiais, suportes de impressão e peças. Facilidade de separação para descarte.

Os 12 temas podem ser trabalhados na forma de planilhas para maior clareza no estudo das informações, como ilustrado no Quadro 8.

Quadro 8 - Organização dos temas para abordagem sobre especificações-meta

TEMA	REFLEXÃO AM	IDENTIFICAR CORRELAÇÕES	COMENTÁRIOS
<b>DESEMPENHO</b> <b>Função que o produto tem que cumprir.</b>	Existem features específicas da AM que podem melhor alcançar a função do produto?	1. Especificação A [kg] 2. Especificação B [MPa] 3. Especificação C [R\$] [...]	<i>Área para comentários acerca das especificações identificadas e suas relações com as funções do produto e features.</i>

Fonte: o autor

### 3.1.4 Monitorar a viabilidade econômico-financeira do produto

Segundo Rozenfeld et al. (2006), a atividade de monitoramento formal acontece ao final de cada fase de desenvolvimento, pois neste momento os resultados estão consolidados e a avaliação para a aprovação da fase está próxima.

Para a avaliação de possíveis impactos financeiros no projeto, durante a verificação da viabilidade financeira, é interessante que a AM seja analisada de forma coerente de acordo com as suas especificidades. Na seção 2.1.4.5 são tratados os modelos de custo de Lindemann et al. (2015) e Yim e Rosen (2012) sobre a AM e, ainda, como a estratégia de impressão é um fator importante no tempo necessário de construção e, consequentemente, no custo do processo.

De posse dos modelos e estratégias de tempo e custo, as projeções de orçamento de projeto podem ser estimadas a fim de, novamente, expor o processo baseado em extrusão a luz dos critérios de escolha da utilização

do processo de AM pela equipe de projetos. Desta forma, realiza-se o **estudo do comportamento do custo na AM por extrusão em indicadores de custo**. É interessante a utilização de gráficos de acompanhamento de custo tipo “*Burnup*” para ilustrar a projeção do uso de recursos de forma cumulativa com o decorrer do tempo de projeto.

### **3.1.5 Resumo das propostas da fase de Projeto Informacional**

As propostas apresentadas buscam entender as capacidades do processo de AM frente ao que se espera para o produto e como o uso desta nova tecnologia pode contribuir para aumentar o desempenho e competitividade do produto. Entende-se que o processo de AM baseado em extrusão não é a solução para todo e qualquer tipo de projeto e empresa, por isso, as propostas resumidas no Quadro 9 buscam esclarecer pontos críticos analisando caso a caso. Enquanto que as áreas envolvidas nas atividades são descritas na Tabela 6, nota-se que as áreas são uniformemente envolvidas pois naturalmente no início do projeto existe uma participação mais intensa entre os setores.

Quadro 9 - Resumo das propostas da fase de Projeto Informacional

	<i>Atividades abordadas da fase</i>	<i>Propostas</i>
<b>1. PROJETO INFORMACIONAL</b>	1.1 Revisar e Atualizar o Escopo do Produto	<b>1.1.a</b> Compreender as capacidades e limitações do processo de AM de domínio e verificar se estão alinhadas com a declaração do escopo do produto <b>1.1.b</b> Pesquisa de concorrentes com escâneres, protótipos e arquivos CAD <i>open source</i> .
	1.2 Detalhar ciclo de vida do produto e definir seus clientes	<b>1.2.a</b> Avaliar o impacto na cadeia de suprimentos utilizando a AM e o nível de conhecimento dos <i>stakeholders</i> sobre este processo de fabricação.
	1.3 Definir especificações meta do produto	<b>1.3.a</b> Refletir a partir das questões de análise da AM em cada tema da lista baseada em Rozenfeld et al. (2006) de acordo com as especificações – meta; <b>1.3.b</b> Definir a implementação da tecnologia de manufatura aditiva de extrusão de material e o seu papel no PDP.
	1.4 Monitorar a viabilidade econômico - financeira do produto	<b>1.4.a</b> Estudar a estimativa de comportamento do custo na AM por extrusão de material e atualizar as projeções dos indicadores de custo no cenário de implementação

Fonte: o autor

Tabela 6 - Áreas de conhecimento envolvidas nas atividades da fase do projeto Informacional que foram alvo de propostas.

	PROJ	AMB	MKT	ENGP	PROC	PROD	SUPR	QUAL	CUST
3.1.1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3.1.2	✓	✓	✓			✓	✓	✓	
3.1.3		✓		✓	✓	✓		✓	✓
3.1.4									✓

Fonte: o autor

### 3.2 FASE DE PROJETO CONCEITUAL

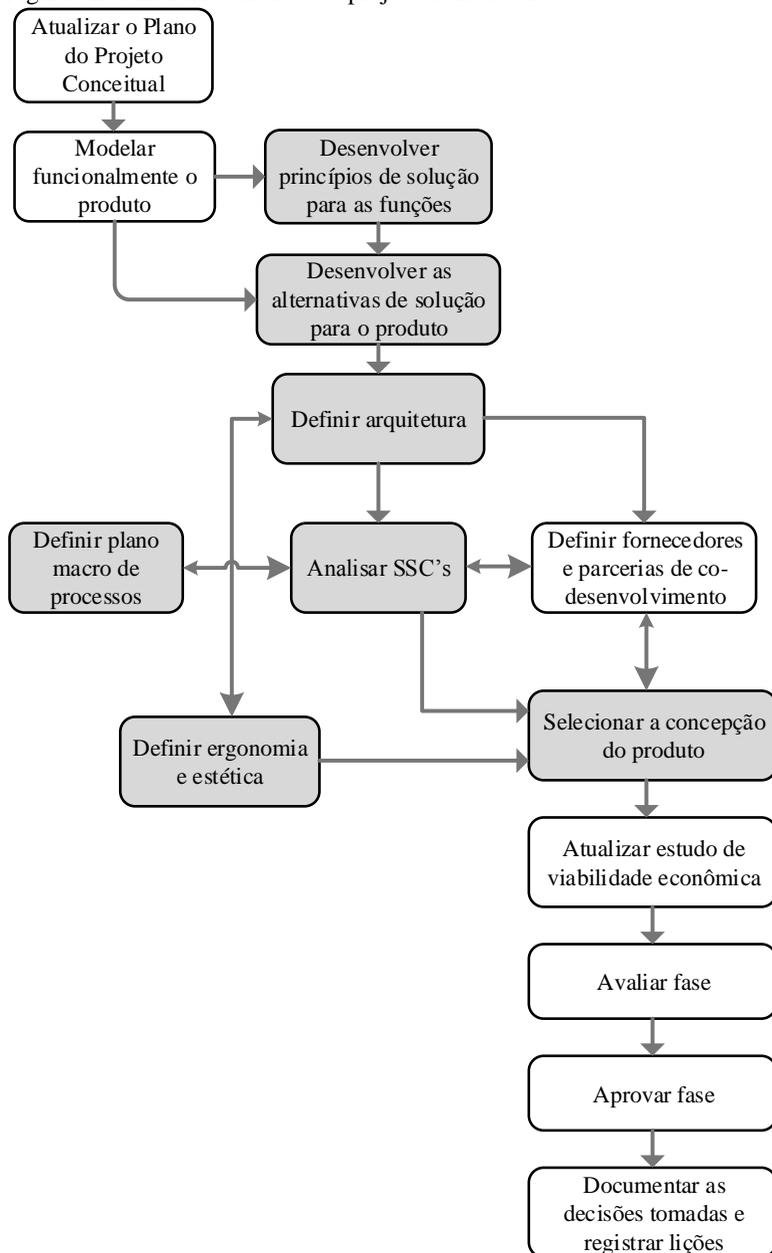
Nesta fase, foram identificadas relações para aplicação da AM em 7 das 14 atividades, envolvendo principalmente o desenvolvimento de soluções dos Sistemas, Subsistemas e Componentes (SSCs).

Kumke et al. (2017) e Laverne et al. (2015) investigam o impacto da AM na geração de ideias. O primeiro trabalho indica que o DfAM no sentido estrito pode facilitar o trabalho dos projetistas e aumentar o grau de inovação em projetos e, dentro deste DfAM, o segundo trabalho aborda que o DfAM Restrito e Oportunista pode impactar em sessões de criatividade, diferenciando o desempenho entre projetistas experientes e novatos nas diretrizes do DfAM.

As propostas de atividades a seguir buscam guiar a utilização da AM nas etapas de concepção e definições sobre os SSCs e auxiliar a fornecer informações para os critérios de avaliação da fase conceitual como:

- Identificação dos parâmetros funcionais críticos;
- Capacidade de manufatura aliada a viabilidade econômica
- Atendimento das especificações técnicas.

Figura 42 - Atividades na fase de projeto Conceitual



Fonte: adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

### 3.2.1 Desenvolver princípios de solução para as funções

Kumke et al. (2017), realizam avaliações sobre os métodos de ideação de acordo com os critérios voltados para o DfAM como: Pré-seleção, incorporação das complexidades da AM, flexibilidade para a incorporação, tipos de conhecimentos suportados e aplicabilidade prática.

Neste ponto, é importante decidir qual método será utilizado pela equipe de projeto, são considerados, por exemplo: Brainstorming, biônica, seis chapéus do pensamento, método Delphi, entre outros (vide Tabela 2 na seção 2.1.4.4).

Além da avaliação, é necessário entender qual é o método mais interessante para o grupo sobre a aplicação, experiências e qual é a saída esperada deste tipo de interação. Maiores detalhes sobre os métodos, podem ser encontrados em Rozenfeld et al. (2006).

Sendo assim, deve-se **escolher qual(is) método(s) de ideação serão utilizados para apoiar o desenvolvimento dos princípios de solução utilizando a AM** de acordo com os critérios de avaliação de Kumke et al. (2017) e quais resultados são esperados.

Um método de destaque seria a Biônica, que é considerada, na Tabela 2, uma boa opção para explorar as complexidades da AM, para a flexibilidade de incorporação destas complexidades tanto no DfAM oportunista como no Restrito, além de explorar diversos tipos de conhecimento, contribuindo para a experiência do momento de criação na forma textual, visual e tácita.

Em apoio à geração de ideias e criatividade, Rosen (2007) utiliza o sistema biológico de engenharia reversa para replicar estruturas complexas. De acordo com a Tabela 2 da seção 2.1.4.4, a biônica é considerada adequada para explorar as complexidades da AM e DfAM oportunista de Laverne et al (2015).

Boelter (2018) apresenta cartões bioinspiradores que contribuem para ideias geradas com características e princípios de solução novos baseados em organismos biológicos. Ideias de produtos que possuem atributos derivados do conteúdo bioinspirador dos cartões como resultado da exposição cognitiva.

Maidin et al. (2012) relacionam diversas *features* que podem ser provenientes de estímulos biológicos como: superfície texturizada, espessura de parede variável, preenchimento de seção tipo *honey comb*, regiões ocas, etc.

Propõe-se, portanto, baseando-se nas contribuições de Ottosson e Skogsrød (2016) (seção 2.1.4.4) que **modelos físicos sejam utilizados para a redução do nível de abstração e estimulação a novas ideias**. São

sugeridos modelos baseados no conteúdo bioinspirador de Boelter (2018) aliado a altas complexidades de forma nas quais a AM seja estratégica ou ainda em soluções já existentes na forma de engenharia reversa. Outros modelos são passíveis de exploração, como peças de empresas concorrentes e primeiros esboços de conceitos.

### 3.2.2 Desenvolver as alternativas de solução para o produto

Na seção 2.3 encontram-se as definições para o DfAM dos autores revisados. Alguns destes, como Laverne et al. (2015) abordam o impacto do uso da AM para o aumento do número de ideias geradas e no atendimento destas ideias aos requisitos de projeto e originalidade. Já para metodologia de Kumke et al. (2016), uma das suas atividades é: desenvolver ideias de solução básicas. Além disso, os autores propõem a integração de vários métodos revisados em seu trabalho para a geração de ideias.

**Desta forma a busca de soluções pode se basear em uma visão integradora entre os métodos DfAM Estrito e Amplo e os DfAM Oportunista e Restritivo** revisados na seção 2.3 de forma a se adequar aos padrões e métodos de cada empresa ou grupo de trabalho.

### 3.2.3 Definir arquitetura para o produto

A facilidade da divisão de um produto em módulos é que estes podem ser fabricados separadamente e posteriormente montados. Uma vantagem no campo de aplicação da AM é a possibilidade de divisão dos **módulos para peças impressas e peças fabricadas convencionalmente.**

Kumke et al. (2016) e Spallek e Krause (2016) na seção 2.1.4.3 complementam que pesquisas no projeto para customização em massa enfatizam a importância da família/plataforma de produtos, modularização e o envolvimento dos consumidores no processo de projeto. Na seção 2.1.4.3 podem ser encontradas maiores informações sobre a customização em massa.

Seguindo esta estratégia, Würtz et al. (2015) esboçam um cenário de modularização de um produto médico, no qual o módulo abriga a peça manufaturada aditivamente. Deste modo, os níveis acima ou pareados ao módulo na BOM não são afetados diretamente pela customização.

No âmbito da família de produtos, além de um possível compartilhamento de módulos, Huiwei (2015) sustenta que a AM é importante para tornar as ideias dos designers e projetistas mais intuitivas

para os consumidores comuns, contribuindo para os estágios de criatividade e **associar a identidade da família em seus produtos.**

### **3.2.4 Analisar Sistemas, Subsistemas e Componentes**

Yang e Zhao (2015) correlacionam 14 diretrizes de DFXs convencionais voltadas a manufatura e montagem, listadas abaixo e pontuadas na Figura 43. Estas diretrizes são baseadas em considerações sobre o projeto para a manufatura, montagem e desempenho.

Embora trata-se neste trabalho do DfAM de forma mais abrangente do que diretrizes para o projeto conceitual e detalhado, pode-se observar que o trabalho apresenta propostas para ao menos 7 diretrizes citadas anteriormente por Yang et al. (2015) para a AM (destacadas em negrito):

1. Simplificar estruturas de acordo com requisitos funcionais
- 2. Minimizar número de peças**
- 3. Integrar peças**
- 4. Separar peças em montagens modulares**
5. Minimizar tipos de materiais em montagens
6. Normalizar componentes
- 7. Criar peças multifuncionais**
8. Projeto para fácil fabricação
- 9. Projeto para fácil montagem**
10. Evitar o uso de laminados
11. Evitar esforços superficiais
- 12. Evitar operações secundárias**
- 13. Eliminar ajustagem**
14. Utilizar materiais ferromagnéticos

Além disso, Jiang et al. (2017) estimam que, em 2030, uma quantia significativa dos produtos manufaturados aditivamente irá ser composta de multi-materiais e/ou embutidos com componentes eletrônicos. Maidin et al. (2012) citam recursos como articulações e rolamentos encapsulados além de dobradiças flexíveis como algumas ideias possíveis para facilitar ou eliminar a necessidade de montagem.

É claro que as diretrizes de projeto geralmente requerem que uma pessoa as interprete e as aplique em cada caso específico. Isto requer certas habilidades e conhecimento por parte do projetista para que este aplique de forma eficiente as recomendações de projeto, aproveitando plenamente as capacidades da AM.



disso, **a inclusão do cliente propicia o levantamento das informações na estética, ergonomia e customização.**

Para implementar esta proposta, a seção 2.1.4.3, traz, em contraponto, o desafio de expor ao cliente a gama completa de benefícios de personalização da AM.

### **3.2.6 Selecionar a concepção do produto**

A proposta da atividade de selecionar a concepção do produto está integrada na atividade anterior. Sugere-se uma participação mais intensa do cliente na decisão sobre as concepções em prol de integrá-lo no desenvolvimento do produto.

### **3.2.7 Planejar o processo de manufatura macro/Definir plano macro de processo**

O planejamento macro do processo contém a seleção dos cenários de manufatura, análise de capacidade de produção e o ajuste dos parâmetros do processo. Para isto, Zhang et al. (2014) sugerem que deve haver entendimento da equipe de projeto tanto sobre o projeto e requisitos do produto, quanto das características e limitações do processo de AM.

O trabalho de Adam e Zimmer (2015) contribui nesta atividade pela avaliação das limitações de geometria do processo baseado em extrusão, como construção de paredes, ângulos de inclinação e vãos livres (*bridge*). A seção 2.1.4.8 complementa sobre as deficiências do processo, enquanto as seções 2.1.4.2, 2.1.4.5 e 2.1.4.6 expõem as complexidades alcançadas, os custos e tempos associados e a precisão dimensional do processo respectivamente.

Os estudos na fase informacional suscitam, na seção 3.1.3, a correção entre as especificações-meta e o processo de AM. Neste momento, cabe realizar uma **avaliação básica da capacidade do processo de manufatura aditiva baseado em extrusão** para uma verificação da sua aplicabilidade. De posse de um maior nível de informação e conceitos já esboçados, o planejamento pode ser realizado com foco no processo mais interessante para a empresa.

### **3.2.8 Resumo das propostas da fase de Projeto Conceitual**

As atividades propostas nesta fase de projeto, vide Quadro 10, foram voltadas a expandir as possibilidades de soluções de projeto utilizando a AM, desde do uso para estimular a criatividade dos projetistas como para

aplicar as complexidades atingidas pelo processo para solucionar ou otimizar a manufatura e montagem.

Quadro 10 - Resumo das propostas da fase de Projeto Conceitual

2. PROJETO CONCEITUAL	<i>Atividades abordadas da fase</i>	<i>Propostas</i>
	2.1 Desenvolver princípios de solução para as funções	<p><b>2.1.a</b> Escolha dos métodos de ideação mais compatíveis para desenvolver os princípios de solução utilizando a AM</p> <p><b>2.1.b</b> Uso de modelos físicos para a redução do nível de abstração e estimulação a novas ideias. Engenharia reversa e/ou uso de bioinspiradores na geração de ideias e princípios de funcionamento.</p>
2.2 Desenvolver as alternativas de solução para o produto	<p><b>2.2.a</b> Busca de ideias para alternativas de solução através de uma visão integradora entre os métodos DfAM Estreito e Amplo e os DfAM Oportunista e Restritivo</p>	
2.3 Definir arquitetura	<p><b>2.3.a</b> Modularização utilizando a AM para viabilizar projeto de famílias de produtos e a customização.</p>	
2.4 Analisar SSC's	<p><b>2.4.a</b> Correlacionar as diretrizes dos DFXs tradicionais de manufatura e montagem e traduzir em suas aplicações específicas para a AM</p>	
2.5 Definir ergonomia e estética	<p><b>2.5.a/2.6.a</b> Incluir a participação do cliente na estética, ergonomia, customização e seleção de conceitos a partir de protótipos impressos.</p>	
2.6 Selecionar a concepção do produto		
2.7 Definir plano macro de processos	<p><b>2.7.a</b> Avaliação básica da capacidade do processo de manufatura aditiva baseado em extrusão para o cumprimento dos requisitos de projeto.</p>	

Fonte: o autor

As áreas de conhecimento mais envolvidas nas atividades que sofreram propostas são: Engenharia de Produto, Processos e Custos, conforme Tabela 7. Isto porque são áreas envolvidas nos conceitos de produto, possibilidades de concepção e atendimento a viabilidade econômica das soluções.

Tabela 7 - Áreas de conhecimento envolvidas nas atividades da fase do projeto conceitual que foram alvo de propostas.

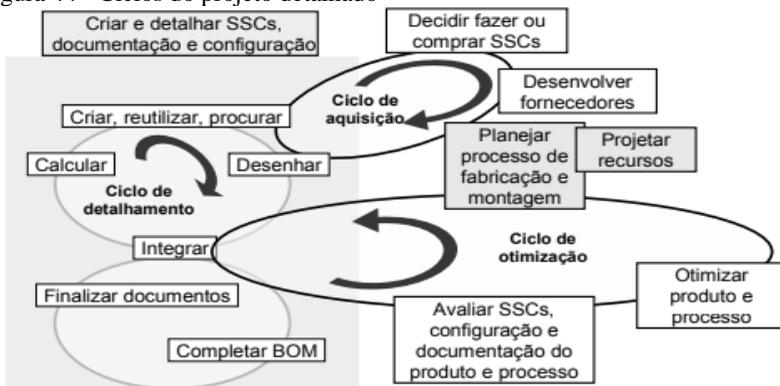
	PROJ	AMB	MKT	ENGP	PROC	PROD	SUPR	QUAL	CUST
3.2.1	✓	✓		✓					✓
3.2.2	✓			✓					✓
3.2.3	✓	✓			✓	✓	✓		✓
3.2.4		✓		✓	✓	✓			✓
3.2.5				✓	✓	✓			✓
3.2.6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3.2.7					✓				

Fonte: o autor

### 3.3 FASE DE PROJETO DETALHADO

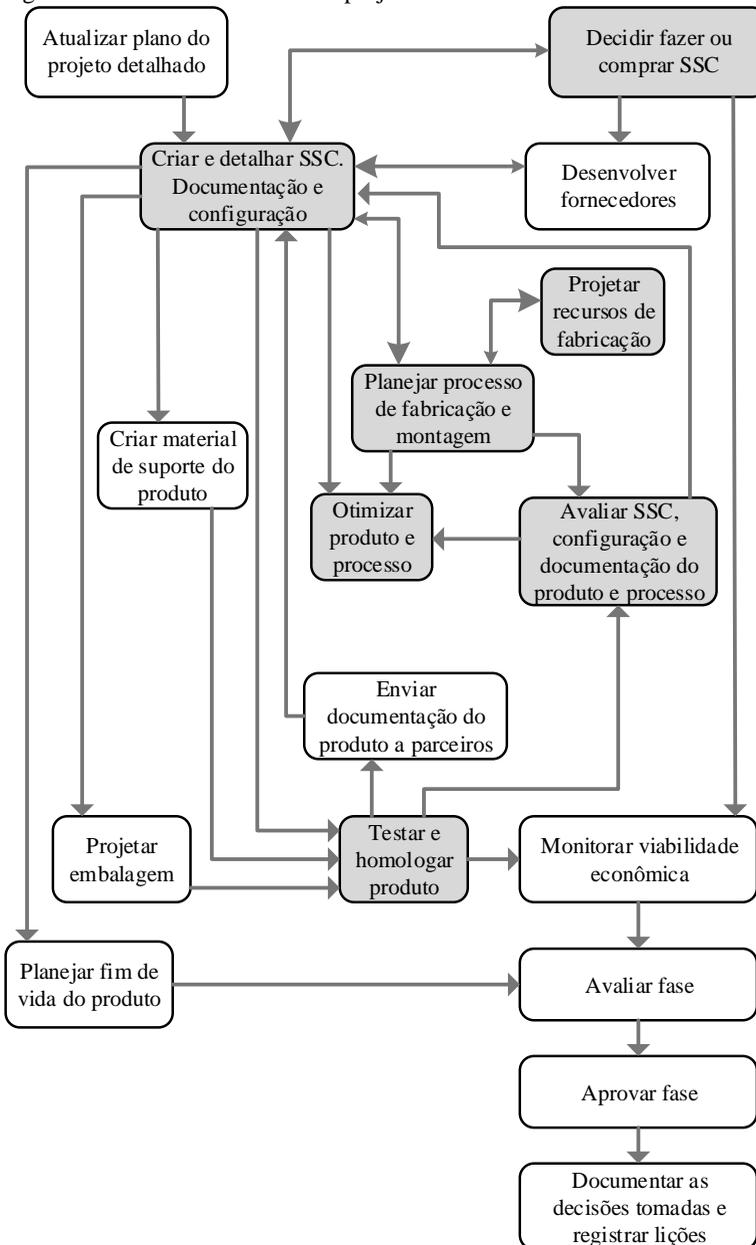
Nesta fase, serão abordadas atividades voltadas para o detalhamento e definição dos SSCs. Deve ser considerado que, conforme Rozenfeld et al. (2006) ilustram na Figura 44, existem ciclos dentro do projeto detalhado em que iterações entre as atividades ocorrem. As atividades podem se repetir dentro de uma mesma fase a fim de se realizar as iterações necessárias. As 7 atividades envolvidas estão destacadas na Figura 45.

Figura 44 - Ciclos do projeto detalhado



Fonte: adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

Figura 45 - Atividades na fase de projeto Detalhado



Fonte: adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

### 3.3.1 Criar e detalhar SSCs, documentação e configuração

Segundo Rozenfeld et al. (2006), a atividade em questão tem a finalidade de criar todos os Sistemas, Subistemas e Componentes (SSC) do produto; produzir as documentações finais e detalhadas, que compreendem todos os desenhos dos SSCs com cotas e tolerâncias finais e; realizar a configuração final do produto refletida na estrutura de produto.

Uma abordagem de projeto de componentes capaz de ser realizada pela manufatura aditiva é a união de dois ou mais elementos em única peça, ou ainda aninhar peças que seriam montadas entre si no caso de processos de fabricação convencionais.

Este tipo de estratégia é considerada aplicável para a AM por Kumke et al. (2017) na Tabela 2 além de explorar as complexidades alcançadas pela AM discutidas na seção 2.1.4.2.

Entretanto, os componentes de reprojeto que serão unidos devem formar uma nova peça que atenda às exigências da estratégia de reposição ao cliente e intercambiabilidade. Ou ainda, levados em consideração na elaboração da estrutura de produto de novos projetos que sejam da mesma família.

Do ponto de vista técnico, o processo baseado em extrusão de material requer suportes para vãos livres (*bridges*). Estes suportes devem ser posteriormente retirados e, na impossibilidade de fazê-lo, determinadas geometrias são inviabilizadas. A rugosidade superficial obtida neste processo pode influenciar o movimento relativo entre superfícies de articulação ou montagem, principalmente a rugosidade nas regiões onde foi utilizado uma estrutura de suporte.

Os estudos sobre as restrições de qualidade de impressão, discutidos na seção 2.1.4.6 e baseados em Lieneke et al. (2016), permitem perceber que, atualmente, o grau de tolerância atingido pelo processo de extrusão de material ainda é alto, embora tem se tornado competitivo com outros processos. Outro aspecto a ser observado é a rugosidade superficial e sua relação com o parâmetro de espessura de camada e velocidade de impressão.

A diversidade de materiais disponíveis para a manufatura aditiva baseada em extrusão também colabora para desvios geométricos. O uso do material PLA ou PETG proporciona deformações inferiores e acabamento superficial de melhor qualidade àquele obtido pelo ABS.

Apesar das dificuldades citadas, propõe-se a **avaliação do impacto da união de peças via manufatura aditiva no projeto**, pela tendência em ser positiva para a simplificação das atividades de montagem, inclusão de nervuras, aumento da complexidade de ideias factíveis e potencial para

redução da propagação de folgas e tolerâncias geométricas entre os conjuntos montados.

Na fase do projeto detalhado, as especificações dos SSCs, especialmente aquelas acerca de parâmetros críticos, devem estar suportadas nos desenhos finais com tolerâncias a serem seguidas pelos planos de fabricação. Para ser capaz de atingir as especificações de desenho, é necessário verificar se o maquinário de AM é compatível.

É claro que a capacidade de fabricação é particular de cada máquina, desta forma, cabe a equipe realizar o **levantamento das informações acerca da tolerância, área de impressão, parâmetros e matérias primas disponíveis** para uso no maquinário a disposição da empresa.

É válido ressaltar que atividades de pós processamento são comuns para melhorar a qualidade das peças. Inclusive roteiros de processo de fabricação podem ser elaborados a partir de uma estratégia híbrida, unindo manufatura aditiva e usinagem para atingir o especificado em projeto.

No âmbito de definir as geometrias dos SSCs, as antigas discussões sobre trabalhar com croquis ou com sistemas CAD tendem a ser substituídas atualmente por discussões entre trabalhar com sistemas CAD ou modelos físicos impressos.

Recentemente, os sistemas CAE tornaram-se capazes de dimensionar e auxiliar no detalhamento das *features* uma peça como por exemplo no uso da otimização topológica. Estes recursos são discutidos mais profundamente na seção sobre ferramentas computacionais (2.1.4.7).

As capacidades de operar iterativamente entre CAD e CAE, tornam os softwares de otimização topológica grandes ferramentas de elaboração de *features* sem dependência de formas com os processos de fabricação convencionais.

Entretanto, deve ser considerada também a dificuldade de se definir as condições de comportamento do material, devido a anisotropia típica causada pelo direcionamento da impressão e compatibilizar a real adesão entre as camadas e o modelo computacional. Este caso pode ser exemplificado no texto de Raut et al. (2014) e na seção 3.3.3 sobre planos de processo.

Também cabe ressaltar que os usuários dos *softwares* CAE necessitam de capacitação por serem programas relativamente complexos, tornando a proposta a seguir mais difícil de ser implementada.

A partir uma equipe com domínio técnico sobre o *software* CAE utilizado para cálculo e otimizações de tamanho, forma e topologia, é possível viabilizar o **uso de ferramentas CAE de otimização topológica para o cálculo e desenho iterativo dos SSCs** suportando a utilização da manufatura aditiva.

### 3.3.2 Decidir por fazer ou comprar SSC

Os custos envolvidos para cada escolha e a capacidade interna ou externa para atender a demanda passam pela decisão entre fabricar ou comprar determinado SSC.

Os estudos sobre o equacionamento de custo para o processo baseado em extrusão estão na seção 2.1.4.5. Além disto, a capacidade pode ser avaliada pelas tolerâncias atingidas pelo processo que estão descritas na seção 2.1.4.6.

A estimativa de Yim e Rosen (2012) consegue associar apropriadamente a separação de cada fator no custo total do processo, conforme visto na Tabela 3. Em geral, o custo é composto pela compra do maquinário, operação da máquina, material e mão-de-obra.

O custo de aquisição de novas impressoras 3D é uma parcela significativa do valor geral, especialmente de máquinas de alta precisão e qualidade de acabamento. Os custos de operação podem ser mitigados por estratégias de orientação de impressão e manufatura híbrida, propostas em 3.3.3. Os demais custos de material e mão-de-obra tendem a ser reduzidos nos próximos anos com a difusão da tecnologia da AM.

Desta forma, de posse das capacidades básicas do maquinário e da intenção de uso da tecnologia da manufatura aditiva no projeto, a equipe de projeto deve realizar o processo decisivo com base no **equacionamento do custo geral de fabricação utilizando a AM**.

Cabe ressaltar que o processo baseado por extrusão é, dentre os processos de AM existentes, o de menor investimento para aquisição de maquinário e de matéria-prima.

### 3.3.3 Planejar o processo de fabricação e montagem

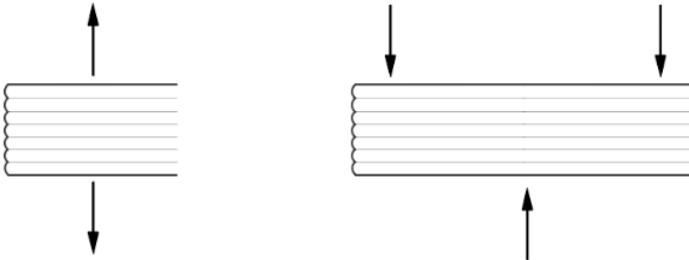
Nesta atividade pretende-se auxiliar o plano macro de fabricação, fornecendo as primeiras impressões sobre a forma com que os componentes serão impressos, especificações de máquinas e estratégias para maximizar o custo e o tempo de processo.

A quantidade de material utilizada é diretamente determinada por sua respectiva estratégia de deposição no interior da peça (por exemplo pela densidade e direção do preenchimento). Estudos complementares são discutidos na seção 2.1.4.5, em Raut et al. (2014) e em Teitebaum (2009).

As características anisotrópicas da manufatura aditiva devem ser levadas em consideração para maximizar as propriedades mecânicas desejadas e minimizar o uso de matéria prima e tempo de processamento. A Figura 46 exemplifica como um componente pode ser sensível à carga

de tração (à esquerda), devido a força para o descolamento das camadas, enquanto é resistente à cargas de flexão (à direita).

Figura 46 - Condições de carga a tração e flexão. Baixa resistência à esq. e alta resistência à dir.



Fonte: site 3D Hubs

As diretrizes descritas por Teitebaum (2009) auxiliam a redução dos custos associados à fabricação (fator de custo de operação de máquina, indicado na equação 5 na seção 2.1.4.5) através de minimização da altura, proporções de forma, ressaltos, dentre outras estratégias de posicionamento das peças sobre a mesa de impressão.

Assim, deverá ser realizado um **estudo sobre posicionamento e orientação de impressão, levando em conta os esforços físicos, tempo, custo e superfícies funcionais da peça**. Buscando o maior custo-benefício dentro das limitações do processo do maquinário disponível ou dos recursos projetados para a fabricação.

O processo de manufatura aditiva baseado em extrusão de material tem suas limitações, elas são descritas na seção 2.1.4.8 e citadas na seção 3.3.1. A consciência dos limites do processo proporciona sua utilização apenas onde o proveito é atraente, cedendo aos processos convencionais as demais aplicações.

Logo, é interessante que a equipe realize uma **análise sobre a possibilidade de um processo de fabricação híbrido e/ou divisão de componentes de acordo com a complexidade** (etapas de processos de retirada de material após a manufatura aditiva), ou uma divisão do componente, segregando a porção de geometria ou *features* complexas para manufatura aditiva e outras porções para os processos convencionais. A seção 2.1.4.6, junto com a bibliografia de Kerbrat et al. (2011) traz à luz estudos sobre a separação de componentes para manufatura aditiva combinada com a de subtração de material.

### 3.3.4 Projetar recursos de fabricação

Nesta atividade é importante mensurar e classificar o potencial fabril de cada máquina disponível ou elencável para aquisição. O trabalho de Minetola et al. (2016), descrito na seção 2.1.4.6, traz um modelo CAD padrão com as geometrias usuais de componentes mecânicos para avaliar o desempenho da impressora.

Para auxiliar a consulta das máquinas dispostas no mercado, Gao et al. (2015) apresentam uma lista dividida na capacidade de volume de fabricação e no fim de utilização da máquina (industrial, amador, protótipos, etc).

A equipe de projetos pode utilizar de listas de referência como as de Gao et al. (2015) ou relações de máquinas já a disposição da companhia e utilizar o modelo de Minetola et al. (2016) para realizar testes de desempenho, associando quais *features* do modelo CAD padrão são mais importantes para a geometria do produto que está sendo desenvolvido.

Em outra abordagem de avaliação, Mançaneres et al. (2015) desenvolveram uma técnica para eliminar máquinas de AM não capacitadas para executar o processo através de fatores restritivos e uma classificação dos potenciais maquinários utilizando AHP (*Analytic Hierarquy Process*), conforme a Figura 47.

Os autores possuem um banco de dados de 45 máquinas de manufatura aditiva diferentes e uma lista de características técnicas consideradas como: tecnologia, materiais, tamanho da impressão, cores, resolução de impressão, espessura da camada, precisão, potência demandada, tamanho, peso e custo.

As características consideradas intrínsecas para a fabricação do produto são utilizadas como fatores restritivos, por exemplo: caso seja determinado que uma peça seja impressa em parte única, as dimensões da mesa devem comportar o tamanho da impressão. As máquinas que não seguirem este limitante estão fora da próxima fase de avaliação.

A Tabela 8 exemplifica como é dado o grau de importância às características de peças de engenharia de Mançaneres et al. (2015). Aspectos como: peça multicolorida, acuracidade, qualidade superficial, resistência ao impacto e resistência à flexão são comparadas duas a duas. Quando a característica da linha é considerada mais importante do que a da coluna, o quadro é completado com um valor maior do que 1.

Figura 47 - Lógica de seleção de máquinas de manufatura aditiva



Fonte: Mançanares (2016)

Assim, percebe-se no exemplo apresentado na Tabela 8, que a acuracidade e a qualidade superficial são as duas características mais levadas em consideração (por apresentar menor soma) seguidas da resistência ao impacto. Utilizando-se desta ordem de prioridade, avalia-se cada máquina de acordo com estas características. Impressoras mais precisas receberão uma melhor classificação por atingirem um requisito prioritário.

Tabela 8 - Exemplo: Escala de importância para peças de engenharia

	Peça multicolor	Acuracidade	Qualidade superficial	Resistência ao impacto	Resistência à flexão	Peso do critério
Peça multicolor	1	1/9	1/9	1/9	1/9	0,03
Acuracidade	9	1	1	3	3	0,33
Qualidade superficial	9	1	1	3	3	0,33
Resistência a impacto	9	1/3	1/3	1	3	0,18
Resistência a flexão	9	1/3	1/3	1/3	1	0,13
Soma	37,00	2,78	2,78	7,44	10,11	1,00

Fonte: traduzido de Mançanares et al. (2015)

De posse das informações consultadas sobre as máquinas e características técnicas, a equipe pode, através de uma **listagem e ranqueamento, definir qual(is) é (são) a(s) máquina(s) de AM mais adequada(s)** para a fabricação do produto.

### **3.3.5 Avaliar SSCs, configuração e documentação do produto e processo**

Segundo Rozenfeld et al. (2006), uma avaliação qualitativa é realizada com base em critérios e experiências de várias pessoas. Segundo os autores, a utilização de protótipos não funcionais pode ser empregada em clínicas, onde um grupo avalia as características do produto a partir de protótipos. Este recurso pode aproximar as pessoas não habituadas com uma linguagem técnica de engenharia ou com sistemas CAD a participar do projeto.

De posse de um protótipo funcional, existe a possibilidade de se planejar experimentos para levantar respostas dos sistemas com relação às entradas em regime de aplicação, observando o comportamento de acordo com as condições de uso.

A manufatura aditiva baseada em extrusão de material pode proporcionar a **elaboração de maquetes com baixo custo, rapidez e de várias cores para facilitar a avaliação qualitativa em protótipos não funcionais e avaliação experimental em protótipos funcionais.**

### **3.3.6 Otimizar Produto e Processo**

Nesta atividade, medidas para otimizar a montagem e movimentação são estimuladas. O uso de encaixes favorece a redução do tempo de montagem, do uso de fixadores e pode reduzir o número de componentes. A movimentação dos componentes com articulações também contribui para facilitar o encaixe, posicionamento e ancoragem durante a montagem.

As articulações possuem uma dificuldade maior de implementação no processo baseado em extrusão pois seu projeto normalmente demanda suportes e um refinado acabamento superficial para garantir a precisão dos movimentos, embora sua aplicação seja possível.

Na seção 2.1.4.2, encontram-se diretrizes para o projeto de articulações e de encaixes tipo *snap-fit*. Deve-se respeitar as direções de preenchimento da seção de acordo com os esforços de montagem

A modificação do processo de montagem, disposição entre os componentes ou até mesmo a incorporação de algumas peças contribuem para melhorar a cadeia dimensional. Todas estas propostas visam **otimizar**

**a interface entre os componentes através de encaixes tipo *snap-fit* e articulações impressas** visando a facilidade de montagem e movimentação.

### **3.3.7 Testar e Homologar produto**

A equipe de projetos deve estar atenta a homologações necessárias que são específicas para a aplicação da manufatura aditiva baseada em extrusão de material.

Estas homologações podem ser de âmbito ambiental, qualidade e, principalmente de desempenho em aplicações críticas, como em áreas da automobilística e aeronáutica.

Como exemplo: na aplicação aeronáutica, a empresa Stratasys possui uma linha de materiais certificada pela NCAMP (*National Center for Advanced Materials Performance*) para uso em interiores de aeronaves; No ramo farmacêutico e alimentício, o material ABS-M30i atende as normas da ISO 10993 e pode ser aplicado no empacotamento de alimentos e remédios; Para segurança em componentes, o material Ultem 9085 da Stratasys é certificado na categoria UL 94-V0 como retardante de chama.

Por se tratar de uma nova tecnologia, novas determinações de agências reguladoras podem ser emitidas com frequência. Desta forma é importante **verificar as homologações necessárias para os materiais e para a aplicação da manufatura aditiva.**

### **3.3.8 Resumo das propostas da fase de Projeto Detalhado**

Por fim, um resumo das propostas apresentadas nas seções anteriores está organizado no Quadro 11. Os pareceres passam pela avaliação das capacidades e levantamento de informações (3.1.a; 3.1.b; 3.2.a; 3.7.a) para, em seguida, realizar estratégias de utilização (3.3.a; 3.3.b; 3.4.a) e, por fim, aproveitar os potenciais da tecnologia para o desempenho do projeto (3.1.c; 3.5.a; 3.6.a).

Através da Tabela 9 percebe-se que as propostas de atividades para esta fase estão voltadas para as áreas de conhecimento da Engenharia de Produto, Processos e Qualidade.

Tabela 9 - Áreas de conhecimento envolvidas nas atividades da fase do projeto detalhado que foram alvo de propostas.

	PROJ	AMB	MKT	ENGP	PROC	PROD	SUPR	QUAL	CUST
3.3.1				✓	✓				
3.3.2							✓		✓
3.3.3				✓	✓	✓		✓	
3.3.4				✓	✓	✓	✓		
3.3.5				✓	✓			✓	
3.3.6		✓	✓	✓	✓			✓	✓
3.3.7		✓		✓				✓	

Fonte: adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

Quadro 11 - Resumo das propostas da fase de Projeto Detalhado

3. PROJETO DETALHADO	<i>Atividades abordadas da fase</i>	<i>Propostas</i>
	3.1 Criar e detalhar SSC. Documentação e configuração	<p><b>3.1.a</b> Avaliar o impacto da capacidade de união de peças via AM no projeto;</p> <p><b>3.1.b</b> Levantamento de informações de tolerância, área de impressão, parâmetros e matérias primas disponíveis;</p> <p><b>3.1.c</b> Uso de ferramentas CAE de otimização topológica para cálculo e desenho iterativo de SSC.</p>
3.2 Decidir fazer ou comprar SSC	<p><b>3.2.a</b> Equacionamento do custo geral de fabricação por extrusão de material e análise de nível de participação de cada fator de custo.</p>	
3.3 Planejar processo de fabricação e montagem	<p><b>3.3.a</b> Estudo sobre posicionamento e orientação de impressão, levando em conta os esforços físicos, tempo, custo e superfícies funcionais da peça.</p> <p><b>3.3.b</b> Análise sobre a possibilidade de um processo de fabricação híbrido e/ou divisão de componentes de acordo com a complexidade</p>	
3.4 Projetar recursos de fabricação	<p><b>3.4.a</b> Listagem e ranqueamento de maquinário em potencial para compra/utilização nos processos de fabricação.</p>	
3.5 Avaliar SSC, configuração e documentação do produto e processo	<p><b>3.5.a</b> Impressão de maquetes para facilitar a avaliação qualitativa em protótipos não funcionais e abordagem experimental em protótipos funcionais.</p>	
3.6 Otimizar produto e processo	<p><b>3.6.a</b> Otimizar a interface entre os componentes através de encaixes tipo <i>snap-fit</i> e articulações impressas</p>	
3.7 Testar e homologar produto	<p><b>3.7.a</b> Verificação de homologações necessárias para os materiais e para a aplicação da manufatura aditiva por extrusão de material.</p>	

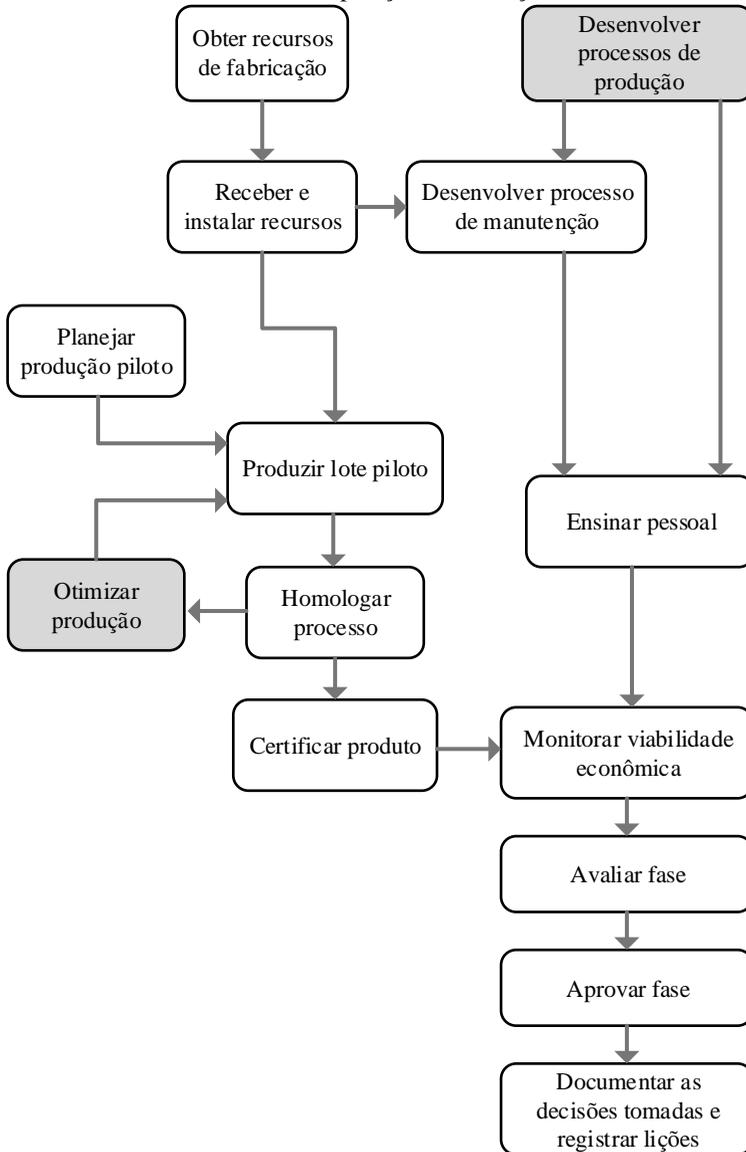
Fonte: o autor

### 3.4 PREPARAÇÃO PARA A PRODUÇÃO

“Envolto pela competitividade do mercado, incluindo as pressões geradas pelos *makers*, a adoção da AM pelas companhias, visando mudar seus paradigmas e aprimorar suas cadeias de suprimento, aproveitando o potencial da tecnologia de redução de custos e de agilidade de resposta, torna-se uma questão fundamental para a manutenção da companhia no mercado.” (FÉLIX, 2017, p.76)

Nas atividades desta fase, vide Figura 48, será recorrente o uso de indicadores para avaliação do lote piloto, capacidade do processo, planejar, programar e controlar a produção. É importante que a empresa compare seus indicadores e verifique as possíveis perdas e ganhos com a implementação da AM.

Figura 48 - Atividades na fase de Preparação da Produção



Fonte: adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

### 3.4.1 Otimizar produção

A manufatura aditiva proporciona a fabricação de estruturas complexas na forma final ou semiacabada em única operação. Segundo Mançanares (2016), esta característica viabiliza eliminar diversos dos desperdícios enumerados nas estratégias enxutas.

Existe, portanto, um potencial para **eliminação ou redução de estoques intermediários e processos utilizando a AM, através da automatização e flexibilidade do processo** de fabricação.

A possibilidade de várias peças serem fabricadas na mesma mesa de impressão, proporciona entrega de peças diferentes sem alteração do setup, atendendo de acordo com a sequência da demanda. A agilidade na montagem de peças torna-se maior com o uso dos encaixes citados na seção 3.3.6, guias, “*poka-yoke*” etc. A redução do número de componentes através da união de peças, descrito na seção 3.3.1, contribui para reduzir a quantidade de tipos de peças a serem controladas e estocadas.

A manufatura aditiva pode proporcionar a otimização da produção, ainda mais se estiver aliada ao conceito de produção enxuta. Assim como é utilizado o DfMA (*Design for Manufacturing and Assembly*) o DfAM também pode ser aplicado de apoio às práticas *lean*, em muitos casos a aplicação do DfAM é o direcionamento das capacidades produtivas da AM em diretrizes já estabelecidas em DFXs tradicionais.

### 3.4.2 Desenvolver processo de produção

A seção 3.1.2 propõe a atividade de avaliação do impacto na cadeia de suprimentos com a AM na fase de projeto Informacional. Agora, na fase de Preparação da Produção, é necessário retomar o estudo anterior e aplicá-lo de forma detalhada.

Na atividade de desenvolver o processo de produção, o contexto da fabricação é analisado, se caso será realizado em uma nova instalação e/ou com novos equipamentos, além de como serão as características da cadeia de suprimentos.

A situação de novo arranjo fabril é mais propícia para elaborar um novo processo de produção, as máquinas de AM por extrusão de material exigem um **condicionamento particular devido à sensibilidade do material com a umidade do ambiente e no resfriamento de certos tipos de materiais** depositados durante a impressão.

Algumas características da cadeia de suprimentos são citadas na seção 2.1.4.9 como por exemplo: a redução de resíduos, não existir requisitos para ferramental e a possibilidade de mudanças rápidas no

projeto. Para o ambiente fabril, a **inexistência de ferramentais e de espaços para acondicionamento de resíduos reduzem o espaço necessário para a produção**. As mudanças rápidas no projeto são possíveis devido a utilização dos arquivos CAD e relativamente simples elaboração dos parâmetros do processo de AM.

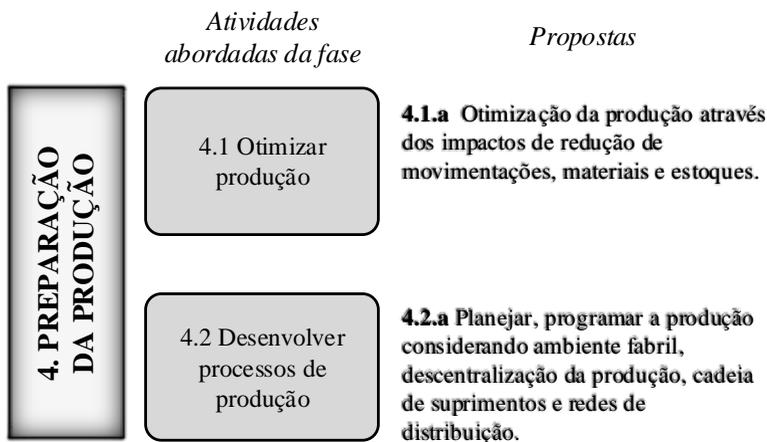
Segundo Jiang et al. (2017), em seus estudos sobre as tendências do cenário da AM em 2030, a **manufatura de peças de reposição pode ser dividida em peças menos críticas, que serão produzidas localmente por AM e peças críticas que serão fabricadas por setores especializados**, com controle de qualidade e principalmente utilizando a manufatura convencional.

Assim como levantado na seção 3.1.2, os parceiros da cadeia de suprimentos devem estar capacitados e prontos para iniciar o fornecimento e a produtividade esperada na atividade de monitoramento econômico garantida.

### 3.4.3 Resumo das propostas da fase de Projeto Detalhado

As propostas da atividade de preparação da produção, vide Quadro 12 e Tabela 10, visam a organização do ambiente fabril, como a redução de movimentações, materiais e estoques, além da descentralização da produção, possibilitando retirar processos da fábrica e repassar para uma rede de distribuição mais próxima do cliente final.

Quadro 12 - Resumo das propostas da fase de Preparação da produção



Fonte: o autor

Tabela 10 - Áreas de conhecimento envolvidas nas atividades da fase de preparação da produção que foram alvo de propostas.

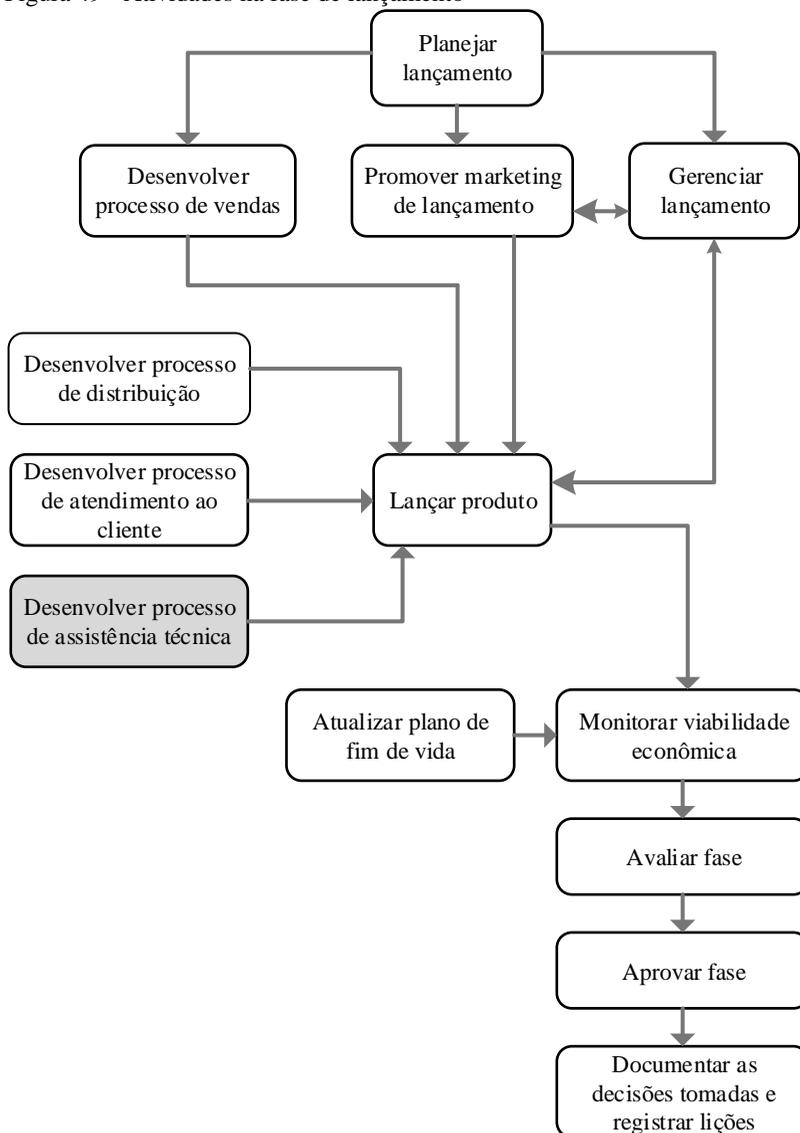
	PROJ	AMB	MKT	ENGP	PROC	PROD	SUPR	QUAL	CUST
3.4.1		✓				✓		✓	
3.4.2					✓		✓	✓	

Fonte: o autor

### 3.5 LANÇAMENTO DO PRODUTO

As atividades descritas na fase de lançamento são voltadas para produtos que serão comercializados e distribuídos. Não são abordados aqueles fabricados única e exclusivamente por encomenda. Maiores informações são encontradas na seção 2.2.3. Uma atividade é abordada, conforme a Figura 49, envolvendo o processo de distribuição e assistência técnica.

Figura 49 - Atividades na fase de lançamento



Fonte: adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

### 3.5.1 Desenvolver processo de assistência técnica

Jiang et al. (2017) apontam que, em 2030, um significativo número de consumidores irá utilizar uma base de dados online para adquirir projetos de produtos ou acessar projetos *open-source*. Os autores também predizem que leis reguladoras sobre plataformas de compartilhamento de arquivos irão supervisionar este mercado.

A digitalização da produção, obtida pela implementação da manufatura aditiva, ativa uma modalidade de reposição de peças através da disponibilização de arquivos CAD de reposição. Atualmente, alguns fabricantes de impressoras 3D de uso pessoal deixam a disposição de seus clientes arquivos de modelos de peças que podem ser manufaturadas em casa e satisfazer sua própria demanda.

A garantia das peças de reposição fica comprometida pela responsabilidade de fabricação pelo usuário. Em contrapartida, os parâmetros de impressão podem ser recomendados ao cliente. É claro que somente os clientes detentores de uma impressora 3D seriam capazes de serem atendidos por este tipo de estratégia, em especial aqueles denominados *makers*.

Como visto na seção 3.4.2 sobre a descentralização da produção, é possível que a rede de assistência técnica do produto também seja capaz de realizar a fabricação da peça de reposição e garantir um rápido tempo de resposta para toda a gama de clientes.

É proposto que a empresa realize um estudo para viabilizar uma **estratégia de atendimento ao cliente com arquivos CAD de reposição, em substituição à própria peça de reposição** ou pelo menos para envio dos arquivos CAD para que a rede autorizada de assistência técnica realize a impressão e atendimento ao cliente.

A atividade de desenvolver processo de assistência técnica tem uma proposta somente, voltada ao atendimento ao cliente descentralizado, resumida no Quadro 13. As áreas envolvidas estão descritas na Tabela 11. O setor de marketing pode identificar o perfil do cliente abrangido para o envio de arquivos, supervisionado pelos parâmetros de impressão recomendados pela Engenharia de Processos e apoiado pelo fornecimento de suprimentos descentralizados para atender a rede autorizada ou clientes.

Quadro 13 - Resumo das propostas da fase de Lançamento do produto

<b>5. LANÇAMENTO DO PRODUTO</b>	<i>Atividade abordada da fase</i>	<i>Proposta</i>
	5.1 Desenvolver processo de assistência técnica	<b>5.1.a Estratégia de atendimento ao cliente com arquivos CAD de reposição, em substituição à própria peça de reposição</b>

Fonte: o autor

Tabela 11 - Áreas de conhecimento envolvidas na atividade da fase de lançamento que foi alvo de proposta.

	PROJ	AMB	MKT	ENGP	PROC	PROD	SUPR	QUAL	CUST
3.5.1			✓		✓		✓		

Fonte: o autor

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considera-se que, em um ambiente de reprojeto, a manufatura aditiva tem sua influência melhor mensurada por comparação aos processos convencionalmente utilizados, embora seu grau de utilização fique cerceado às especificações e conceitos aprovados sem a sua consideração. Nestes casos, entende-se que a aplicação é mais fácil e adequada para equipes inexperientes com a manufatura aditiva, embora não seja aproveitada ao máximo devido à dependência de novos conhecimentos de DfAM.

As propostas buscam reduzir esta dependência ao sugerir ações para auxiliar no desenvolvimento de projetos e, além disso, a revisão bibliográfica traz conceitos e diretrizes de projeto para manufatura aditiva atualizados. A sistemática proposta neste capítulo recorre por diversas vezes ao referencial teórico. Os três primeiros passos da organização da sistemática ilustrada na Figura 39 são inclusive atreladas ao referencial teórico levantado. Isto ocorre para buscar propostas coesas para as diversas atividades que existem na macro fase de desenvolvimento.

Ao todo 25 propostas foram realizadas. As fases de projeto Conceitual e Detalhado são as mais abordadas. Esta distribuição segue o que foi identificado no Quadro 5, onde foram encontradas bibliografias em maior quantidade sobre as mesmas fases de projeto. Em seguida a fase de

projeto Informacional aparece com 6 propostas com o intuito de levantar o conhecimento necessário para avaliar como a AM será utilizada no PDP, como indica a Tabela 12.

Tabela 12 - Quantidade de atividades do PDP abordadas e propostas por fase

<b>Fase</b>	<b>Atividades Propostas</b>	
Informacional	4	6
Conceitual	7	7
Detalhado	7	9
Prep. Produção	2	2
Lançamento	1	1
<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>25</b>

Fonte: o autor

O envolvimento das áreas de conhecimento nas propostas mostrou-se equilibrada na Tabela 13, com destaque a Engenharia de Produto, Processos, Custos, Produção e Qualidade. Esta distribuição possui relação com a quantidade de propostas por fase, pois cada área tem um envolvimento maior em cada fase no PDP.

Tabela 13 - Envolvimento das propostas nas áreas de conhecimento

<b>PROJ</b>	<b>AMB</b>	<b>MKT</b>	<b>ENGP</b>	<b>PROC</b>	<b>PROD</b>	<b>SUPR</b>	<b>QUAL</b>	<b>CUST</b>
6	10	5	13	14	10	8	10	11

Fonte: o autor

O capítulo a seguir, utilizará as contribuições das propostas na exemplificação da abordagem contra o problema abordado nesta dissertação: a condição deficitária do desempenho de projetos no desenvolvimento de produtos de uma organização frente a utilização da manufatura aditiva baseada em extrusão de material.

## 4 CASOS DE APLICAÇÃO DAS PROPOSTAS DA SISTEMATIZAÇÃO

Para verificar como as propostas do capítulo anterior podem estar inseridas em uma situação de desenvolvimento de produtos, casos de aplicação foram escolhidos para exemplificar a contribuição da sistemática.

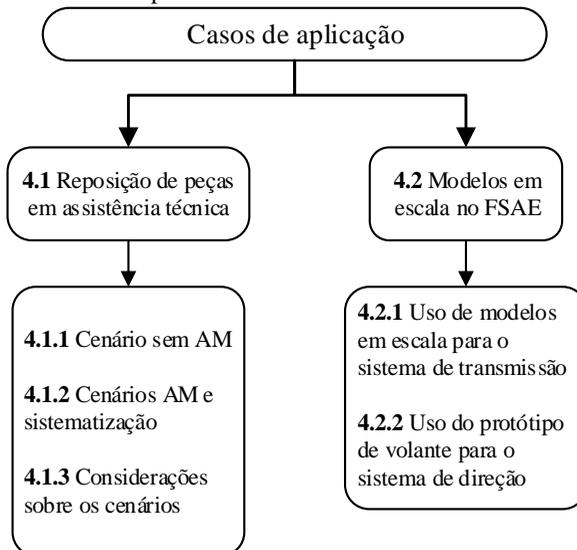
Os casos foram delineados visando abranger diferentes fases dentro da macro fase de desenvolvimento e ilustrar situações diferentes de projeto.

O primeiro caso de aplicação é relativo à estratégia de reposição de uma peça já desenvolvida. Este caso foi concebido exclusivamente para a dissertação como forma de ilustrar como seria uma situação sem o uso da AM e outras duas situações com a AM: com a sistematização e sem.

O segundo caso de aplicação tem seu tema proveniente do trabalho de Yoshida e Gonzaga (2018) e é relativo ao projeto de componentes situados nas fases de projeto conceitual e detalhado. Nesta aplicação, busca-se analisar como as propostas da sistemática convergem para as atividades descritas no artigo e como as avaliações presentes nele analisam os benefícios das atividades propostas.

A organização do capítulo está estruturada conforme a Figura 50.

Figura 50 - Estrutura do capítulo 4



Fonte: o autor

#### 4.1 ESTRATÉGIA DE REPOSIÇÃO DE PEÇAS EM ASSISTÊNCIA TÉCNICA – CASO DE APLICAÇÃO EM IMPRESSORAS 3D DOMÉSTICAS

O caso desta seção foi delineado conforme uma situação de reposição de peças via assistência técnica. Será abordada a reposição da estrutura do cabeçote da máquina UP Mini, vide Figura 51 e Figura 52, da fabricante *Tiertime*.

A *Beijing Tiertime Technology Co. Ltd.* está sediada na cidade de Pequim, na China, e possui somente um representante técnico e de vendas no Brasil, a empresa *UP3D* do *Grupo BCS Tecnologia*, na cidade de Louveira/SP.

Figura 51 - Impressora 3D doméstica UP Mini



Fonte: [makerlab.com.au/product/up-mini-3d-printer/](http://makerlab.com.au/product/up-mini-3d-printer/)

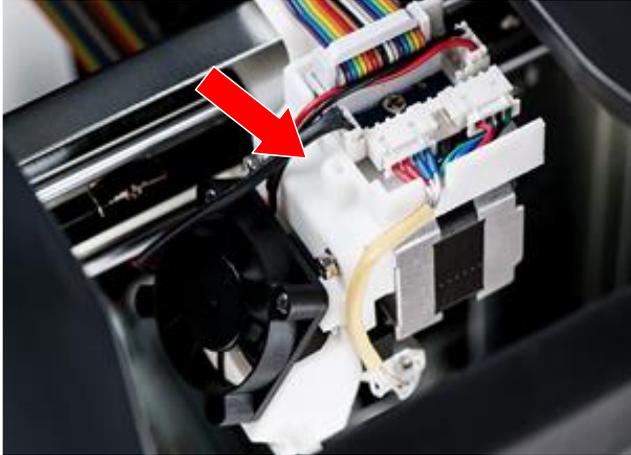
A peça em questão tem a função que suportar os componentes do cabeçote como motor de passo, ventoinha, placas de circuito impresso, cabos, janela de arrefecimento e possui um canal para alimentação de filamentos, como pode ser visto na Figura 52.

Uma análise da estrutura do cabeçote com relação a sua função, evidenciou que existem quatro *Data features* relevantes neste componente, indicadas na Figura 53, que são:

- A) Eixos dos furos para uso dos parafusos fixadores do motor de passo;
- B) Superfície de assentamento da ventoinha;

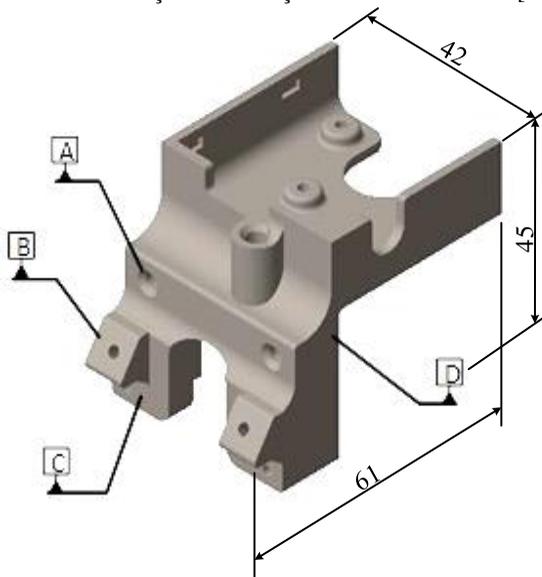
- C) Superfície de assentamento da janela de arrefecimento;
- D) Superfície de assentamento do motor de passo.

Figura 52 - Cabeçote da máquina UP Mini



Fonte: o autor

Figura 53 - Estrutura do cabeçote e indicação das *Data Features* [cotas em mm]



Fonte: o autor

A respeito dos esforços, não existem grandes considerações, tanto a janela de arrefecimento quanto a ventoinha são leves. Já a estrutura deve ser capaz de resistir a compressão realizada pelo parafuso de fixação do motor de passo.

O requisito mais importante neste caso é a rugosidade das superfícies funcionais. Nota-se que um bom alojamento do motor de passo se dá através de uma boa qualidade na superfície D. Em menor grau, a qualidade das superfícies B e C também são importantes para uma adequada fixação entre os componentes.

#### **4.1.1 Cenário tradicional sem a manufatura aditiva**

Este cenário busca ilustrar como é o atendimento ao cliente atualmente em uma empresa responsável por um produto doméstico fora da garantia, como a impressora UP Mini. Poderia também ter sido colocado como exemplo a reposição de peças para um televisor, forno elétrico, cafeteira, etc.

O fluxo de ações para um cenário de reposição de peças por um atendimento via balcão<sup>1</sup> é ilustrado na Figura 54.

Inicialmente, antes da necessidade de atendimento ao cliente, a empresa define o seu plano de reposição de peças. Para isso, são definidos a rede de representantes autorizados, o enxoval de peças que será adquirido pelo representante para o atendimento a pronta entrega e como será realizada a sua homologação.

O processo de atendimento é iniciado no item 1 da Figura 54 quando o cliente necessita uma peça independente ou quando um conjunto de peças não atende a sua função, ou seja, apresenta um defeito, no caso do exemplo utilizando a estrutura do cabeçote indicada na Figura 53, poderia ser alguma quebra ou trinca.

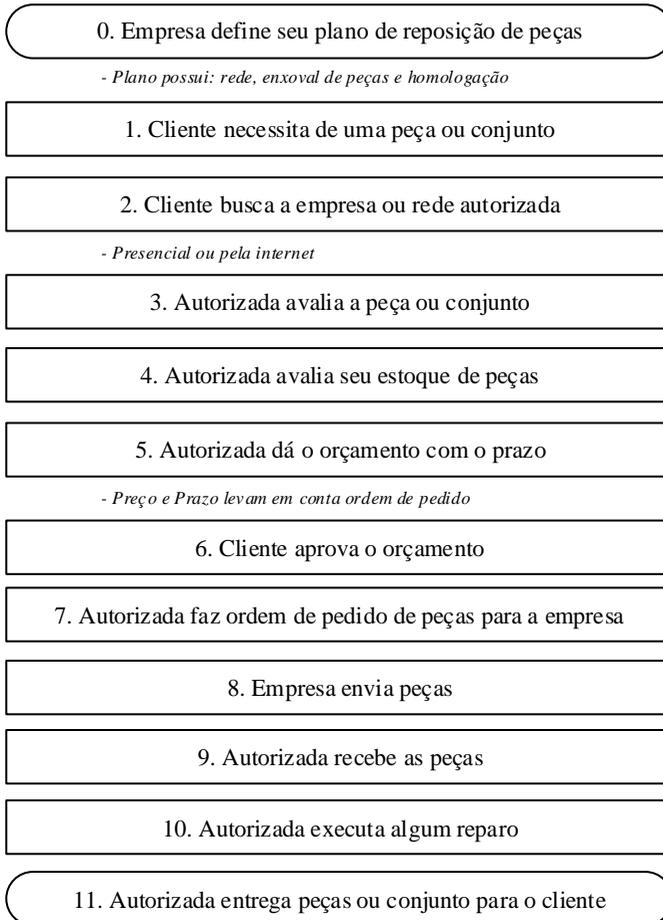
O cliente então busca a empresa ou a rede autorizada, descreve o problema e entrega o conjunto defeituoso. O estabelecimento da rede autorizada escolhido avalia a peça ou conjunto, verifica seu estoque e retorna um orçamento ao cliente.

---

<sup>1</sup> As ações de 1 a 11 foram listadas através da análise própria do autor a partir do caso de reposição de um componente eletrônico de um televisor em Florianópolis. O processo durou 8 dias úteis entre os meses de outubro a novembro de 2018.

Figura 54 - Fluxo de ações de atendimento ao cliente para o caso sem a sistematização

## Caso sem AM – Sem sistematização



Fonte: o autor

Foram encontradas três situações de disponibilidade de fornecimento de outros tipos de peças/ferramentas no site da UP3D para simulação (vide Anexo A):

- i. A peça tem preço fixado e é entregue no prazo de 5 dias úteis via correio ou a pronta entrega com retirada em Louveira/SP;
- ii. A peça tem preço sob consulta e necessita de orçamento;
- iii. A peça está com o estoque esgotado.

O tempo de entrega é relativo à condição do estoque do estabelecimento de assistência técnica. As três situações citadas anteriormente podem ser desde o fornecimento a pronta entrega na loja física, 5 dias úteis via correio até um prazo indeterminado pela falta de estoque.

Uma situação de amplo estoque pode reduzir o tempo de entrega, embora seja prejudicial para o representante da assistência técnica por configurar um custo para manter o estoque. Por outro lado, um estoque esgotado indica um maior tempo de resposta ao cliente que pode estar com o seu produto sem funcionamento.

O orçamento tem o seu preço baseado no custo da peça, frete e mão-de-obra e tem o seu prazo definido pelo *lead time* da ordem de pedido das peças não encontradas em seu estoque.

O cliente então aprova o orçamento, liberando o envio da ordem de pedido para a empresa (*Tiertime*) que enviaria as peças dentro do prazo estipulado. O estabelecimento autorizado recebe a peça, executa o reparo do conjunto ou simplesmente entrega a peça para o cliente.

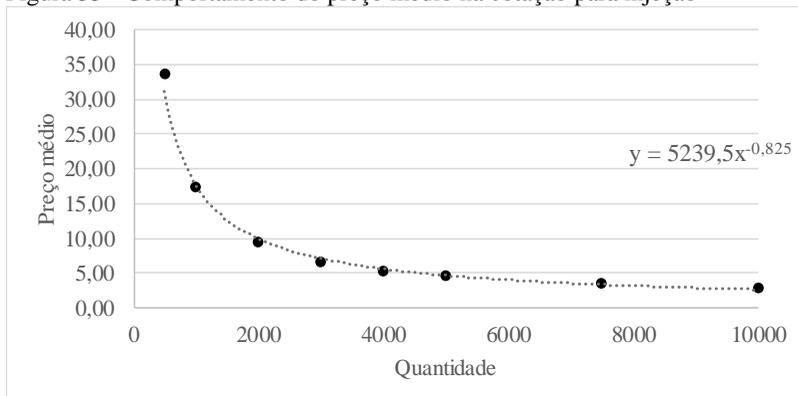
A base de cálculo de preços para o cliente foi realizada através de simulações de cotações por prestadores de serviço. Para a peça em questão, a estrutura do cabeçote, foi simulado no site 3DHubs a confecção de um molde para injeção no material ABS (semelhante ao material da peça original), vide Tabela 14 que origina o gráfico da Figura 55.

Tabela 14 - Simulação de cotação para o processo de Injeção

Qtde	em R\$			
	por Peça	Ferramental	Total	Preço médio
500	1,16	16.257,96	16.836,58	33,67
1000	1,31	16.174,94	17.481,49	17,48
2000	1,27	16.202,83	18.741,27	9,37
3000	1,27	16.225,86	20.033,52	6,68
4000	1,27	16.246,24	21.323,12	5,33
5000	1,27	16.264,94	22.611,04	4,52
7500	1,27	16.307,42	25.826,57	3,44
10000	1,19	16.926,95	28.872,55	2,89

Fonte: adaptado e traduzido do site 3D Hubs. <https://www.3dhubs.com/injection-molding>. Acesso em 10/11/2018.

Figura 55 - Comportamento do preço médio na cotação para injeção



Fonte: o autor

Pode-se perceber que a tendência da curva de preço médio apresentada para o processo de injeção apresenta uma redução com o aumento da quantidade pela diluição do valor de ferramental. Ao lado da curva, está a equação proveniente da regressão dos pontos obtidos.

Logo, a empresa pode enviar para o representante da assistência técnica peças injetadas a um preço médio a R\$ 2,89 sem o valor de frete.

#### 4.1.2 Cenário com a manufatura aditiva

Neste cenário, o desenvolvimento do desenho da peça está finalizado, logo a aplicação da AM de forma sistemática se inicia pela análise das propostas das fases finais da macro fase de desenvolvimento. Encontra-se logo a proposta **5.1.a**, com potencial de configurar um otimizado cenário para reposição de peças.

Com a proposta **5.1.a** proveniente da sistematização, o plano de reposição de peças é alterado do cenário anterior, conforme Figura 56 :

- Os passos entre a necessidade do cliente até a avaliação do estoque pela autorizada segue conforme o caso sem AM;
- O orçamento tem o seu preço baseado no custo da peça, frete e mão-de-obra e tem o seu prazo definido pelo tempo de execução da ordem de fabricação da peça pela máquina da assistência técnica;
- Assim, o cliente aprova o orçamento e o modelo STL é baixado do banco de desenhos da empresa. O representante autorizado imprime a peça, finaliza os reparos ou substituições (se houver) e entrega a peça para o cliente.

Para que este cenário exista, é necessária uma avaliação da capacidade do processo, desta forma, a aplicação da proposta **5.1.a** leva a proposta **2.7.a**, citada na seção 3.2.7. Ou seja, ter o conhecimento da capacidade de um processo antes de lançá-lo como um meio de produção de peças de reposição.

As características funcionais importantes para a construção da peça já foram citadas anteriormente e também na Figura 53, logo cabe a equipe de projeto identificar se o processo por AM é capaz de atender as especificações, para isto, a seção 2.1.4.6 fornece material para compreensão das capacidades gerais do processo de AM baseado em extrusão de material.

Neste caso o modelo UP Mini consegue imprimir espessuras de camada de 0,25 a 0,35 mm e taxas de deposição de 10 cm<sup>3</sup>/h para velocidade de cabeçote lenta (L) até 100 cm<sup>3</sup>/h para velocidade rápida (R). O volume de trabalho é de 120 mm<sup>3</sup>.

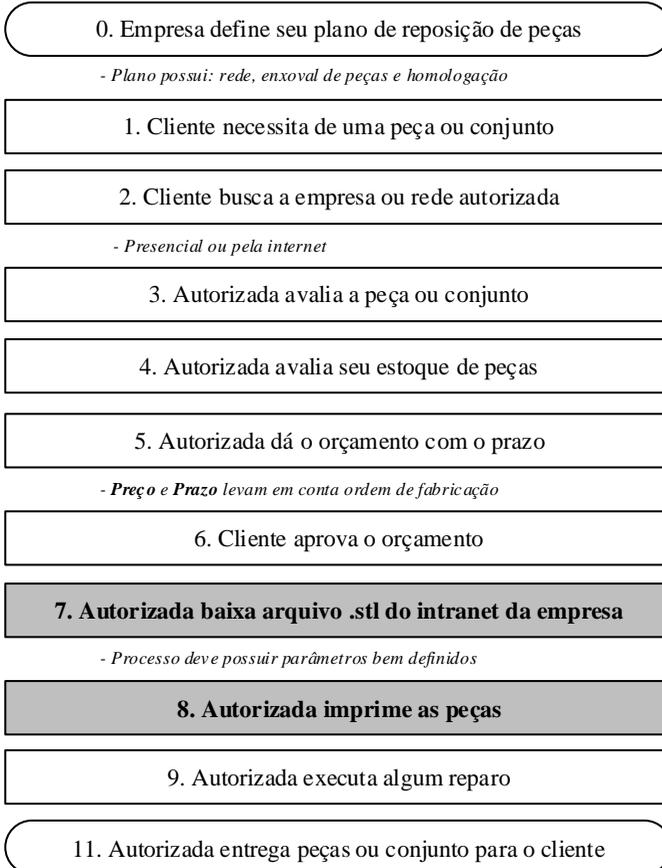
O cenário discutido até então é uma projeção sobre a utilização do processo de AM para reposição de peças, entretanto, atualmente para impressoras 3D domésticas, já é uma alternativa comum.

De forma não sistematizada, o próprio manual da máquina UP Mini cita uma pasta no diretório de instalação do software da máquina que é

disponibilizada ao usuário, na qual existem os modelos de peças de reposição que podem ser impressos.

Figura 56 - Fluxo de ações de atendimento ao cliente para o caso AM

## **Cenário AM – Com Sistematização**



Fonte: o autor

No cenário real da empresa UP3D, a manufatura desta peça é de responsabilidade do cliente, utilizando a própria máquina. Entretanto, desta forma não é instruído ao cliente os parâmetros e a orientação de impressão mais adequados para uma boa qualidade da peça ou que gerem menor consumo de material ou tempo de impressão. Este tipo de informação fica restrito a fóruns na internet ou pela própria experiência adquirida pelo cliente com o uso da máquina.

Portanto, somente o fornecimento do arquivo CAD de reposição não é suficiente para garantir uma manufatura de boa qualidade e otimizada em termos de tempo e custo. Assim, a implementação da proposta **5.1.a** leva a utilizar outra proposta para sanar esta situação: a proposta **3.3.a**.

Conforme a proposta **3.3.a**, a peça deve ser analisada com respeito as suas superfícies funcionais e esforços envolvidos. A Figura 53 mostra o contexto no qual a peça se insere, com as interfaces com a ventoinha, motor de passo, parafusos fixadores, janela de arrefecimento e placas de circuito impresso.

Os requisitos de rugosidade são interpretados na estratégia de fabricação como regiões nas quais se deve evitar vãos livres (necessidade de estruturas de suporte) pois acúmulos de materiais de suporte devem ser retirados após a impressão e acarretam em uma imperfeição pela aderência deste material à superfície da peça.

A estratégia de impressão também tem como fatores relevantes o tempo de impressão e a quantidade de material utilizado, logo, a análise de direção de impressão, velocidade e preenchimento faz parte da proposta **3.3.a**.

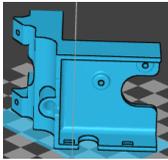
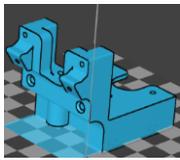
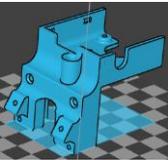
Algumas associações podem ser observadas entre as peças, os resultados de tempo e custo e algumas diretrizes listadas por Teitelbaum (2009) na seção 2.1.4.5, por exemplo: orientações que resultam em maior uso de material possuem a menor superfície voltada para baixo, assim como a orientação com poucos furos orientados para cima.

A Tabela 15 resume três orientações de impressão, e variações de preenchimento, espessura de camada, velocidade do cabeçote, resultando no tempo de impressão e quantia de material gasto. Para todos os casos levantados são utilizados materiais para a estrutura de suporte.

Duas opções de parâmetros foram escolhidas para manufatura em função da posição de impressão: a de menor tempo e a de menor quantidade consumo de material. Foi utilizada a própria máquina UP Mini, com filamento ABS verde de diâmetro de 1,75 mm, mesmo alinhamento de plataforma e manutenção do cabeçote nas duas ocasiões.

Os resultados são ilustrados na Figura 57, onde a peça da esquerda é a referente ao menor consumo de material e a da direita de menor tempo de impressão. Nota-se que o melhor acabamento é da primeira, pois utilizou velocidade de cabeçote lenta e espessura da camada de 0,25mm, e além disso, sua orientação proporcionou que as estruturas de suporte fossem inseridas nas regiões de menor solicitação e relevância para o funcionamento da peça.

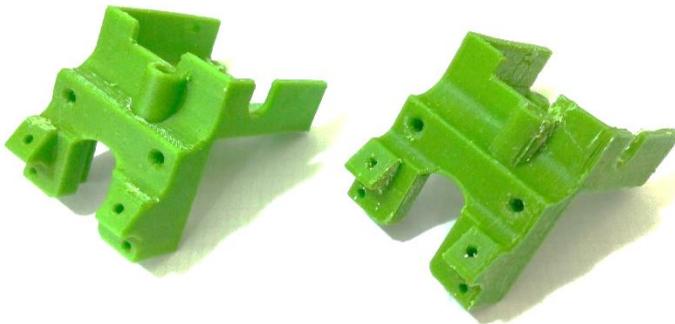
Tabela 15 - Parâmetros e orientação de impressão

Orientação												
Preenchimento [%]	20	80	<b><u>20</u></b>	80	<b><u>20</u></b>	80	20	80	20	80	20	<b><i>80</i></b>
Camada [mm]	0,25	0,25	<b><u>0,35</u></b>	0,35	<b><u>0,25</u></b>	0,25	0,35	0,35	0,25	0,25	0,35	<b><i>0,35</i></b>
Velocidade	L	L	<b><u>R</u></b>	R	<b><u>L</u></b>	L	R	R	L	L	R	<b><i>R</i></b>
Tempo [min]	81	84	<b><u>44</u></b>	46	<b><u>86</u></b>	92	49	50	95	111	51	<b><i>53</i></b>
Material [g]	18,0	18,7	<b><u>19,4</u></b>	20,9	<b><u>17,6</u></b>	19,4	18,9	20,2	20,5	22,2	21,1	<b><i>22,4</i></b>

Fonte: o autor

Logo, dentre as possibilidades levantadas, a que possui tempo de fabricação de 86 minutos apresentou melhor resultado e seriam seus parâmetros os indicados para a manufatura das peças de reposição.

Figura 57 - Estruturas impressas, à esq. menor uso de material e à dir. menor tempo de impressão



Fonte: o autor

Quanto ao preço da peça por AM, foi simulado os valores para somente uma unidade e na cor verde ou branca (vide Tabela 16), para isso, foram consultados seis fornecedores em duas bases de cotação: o site 3D Hubs<sup>1</sup> e o site 3D Compare<sup>2</sup> respectivamente (cotações no Anexo B e

<sup>1</sup> disponível em: <https://www.3dhubs.com.br/3d-printing>

<sup>2</sup> disponível em <https://app.3dcompare.com>

Anexo C). Ambos sites reúnem profissionais que realizam a manufatura aditiva por pedido.

Tabela 16 - Simulação de cotação para o processo de AM

11/11/2018	3D Hubs			3D Compare		
<b>Fornecedor</b>	Only 3D Ltd	Flux Design	Ara's Hub	RexRoi LLC	Opus Locus	PRODPOINT Ltd
<b>Material</b>	ABS Standard	ABS Standard	ABS Standard	ABS Standard	ABS Standard	ABS Standard
<b>Cor</b>	Branco	Branco	Verde	Verde	Verde	Verde
<b>Camada</b>	0,3mm	0,2mm	0,3mm	Não especifica	Não especifica	0,2mm
<b>Preço Origem</b>	£ 9,18	USD 8,06	USD 9,93	USD 8,65	USD 15,28*	USD 13,04*
<b>Preço (R\$)</b>	<b>44,25</b>	<b>30,09</b>	<b>37,07</b>	<b>32,29</b>	<b>57,04</b>	<b>48,68</b>
<b>Máquina</b>	Prusa	Zortrax	13 máquinas	5 máquinas	Não especifica	Não especifica
<b>Local</b>	Inglaterra	EUA	EUA	EUA	Inglaterra	Inglaterra
*valores inferiores ao valor mínimo de pedido do fornecedor						

Fonte: o autor

As cotações pelo processo de AM resultaram em uma média de R\$ 41,57. Ao se observar este valor na equação proveniente da regressão da curva de preço médio de injeção, Figura 55, encontra-se a quantidade de 352 unidades. Esta quantidade significa a condição igualitária de preço por unidade entre a AM e o processo de injeção cotado. Isso mostra a vantagem econômica de se utilizar a AM abaixo dessa quantidade, sendo o caso de um representante de assistência técnica.

#### 4.1.3 Considerações sobre os cenários

O cenário da aplicação da proposta **5.1.a** mostra que o uso de arquivos CAD para reposição já é comum na comunidade detentora do processo de AM e é embasada a partir de projeções de Jiang et al. (2017) para o ano de 2030 para um público geral.

A expansão da atual aplicação para peças de reposição de variados usos deverá passar, no entanto, por atividades como as propostas **3.3.a** e **2.7.a** para se adequar as especificações do projeto.

Cabe à equipe de projeto determinar os parâmetros e orientação de impressão que devem ser seguidas pelo executor da manufatura para garantir um resultado adequado. Esta atribuição para a equipe de projeto se dá pelo nível de conhecimento necessário sobre a AM para se obter as especificações necessárias, assim como é realizado com um manual de instruções de montagem ou manutenção.

Quando necessário, as propostas para os casos utilizaram as informações contidas no Capítulo 2 como forma de busca de informações. Isto mostra que a sistematização pode contribuir com um projeto não

somente na forma de propostas para guiar a utilização da AM, mas também como forma de acervo de informações e boas práticas, guiando por exemplo qual seria a orientação de impressão mais adequada.

Nota-se a implementação da AM baseada em extrusão de material já acontece de forma não sistematizada na situação real de reposição de peças da estrutura do cabeçote, sendo o desempenho da peça dependente da experiência acumulada do usuário da máquina.

É necessário deixar claro que a situação não sistematizada não impede que o uso da AM aconteça, embora resulte em um menor desempenho com maiores custos, como por exemplo, poder-se-ia obter uma impressão com os parâmetros que resultam no uso de material em 22,4 gramas na Tabela 15.

A peça nessas configurações teria um gasto de material 27% superior ao recomendado utilizando a sistematização, além da maior quantidade de estrutura de suporte a ser retirada em pós-processamento e da superfície de apoio do motor de passo com alta rugosidade

Com relação ao uso da AM ou não, a principal diferença é o investimento de ferramental necessário para cada modelo de peças injetadas, enquanto que o processo de AM não requer este tipo de investimento.

Três métricas podem ser avaliadas em função da satisfação do cliente: preço, tempo de entrega e a resolução do defeito.

Considera-se que uma peça injetada pode atender os requisitos de esforços, dimensões e atendimento de rugosidade da peça. Assim como a peça também pode ser realizada por AM, pois avalia-se que, se a peça originalmente é impressa e, se o fabricante de uma impressora 3D fornece o arquivo CAD para seu cliente, o mesmo é capaz de executar a manufatura com o seu próprio recurso, ou seja, a impressora é capaz de atender as especificações de sua própria peça de reposição.

Com relação às métricas dos cenários apresentados, o parágrafo anterior já comenta sobre a capacidade de ambos processos resultarem em peças capazes de cumprir a especificação assim como a peça original. Na Tabela 17, tem-se indicado as relações entre prazo e preço ao cliente.

No cenário sem a AM, a condição de estoque e atendimento físico leva a pronta entrega, sendo benéfico ao cliente com relação ao prazo e ao custo, entretanto a quantidade de clientes abrangidos por esta condição depende do raio de atuação do ponto de atendimento físico e também ao custo de se manter um estoque nesta unidade. O cenário com a AM entrega localmente em um prazo rápido, embora em um preço muito mais elevado.

Tabela 17 - Comparação entre os cenários

	<b>Prazo</b>	<b>Condição</b>	<b>Preço ao cliente</b>	<b>Faturamento/Invest.</b>
Cenário TRAD.	Pronta Entrega	ESTOQUE	R\$ 2,89	Empresa
	5 dias*	ESTOQUE E FORA DO RAI0	R\$ 2,89 + FRETE	Empresa
	Indeterminado*	ESGOTADO E FORA DO RAI0	R\$ 2,89 + FRETE	Empresa
Cenário AM	86 min + Pós Proc.	SEM ESTOQUE	R\$ 41,57	Assist. Técnica
	5 dias*	ESTOQUE E FORA DO RAI0	R\$ 41,57 + FRETE	Assist. Técnica
	5 dias*	ESGOTADO E FORA DO RAI0	R\$ 41,57+ FRETE	Assist. Técnica
*para Florianópolis/SC				

Fonte: o autor

Nos cenários fora do raio de atuação do atendimento físico da assistência técnica, os prazos dependem majoritariamente do tempo de entrega e da disponibilidade da peça, neste caso, o cenário com a AM é superior pois a peça é manufaturada em questão de horas, sem a necessidade de a assistência técnica enviar uma ordem de pedido à fábrica. A facilidade do envio de arquivos e da aquisição de máquinas de AM pode também colaborar para a pulverização da rede de estabelecimentos de assistência técnica, reduzindo tempo e valores de frete.

Outro aspecto a ser observado é o deslocamento do faturamento da peça de reposição da empresa para as assistências técnicas que não consomem mais a quantidade de reposição da empresa, entretanto, o investimento de maquinário de AM torna-se de responsabilidade do estabelecimento da assistência técnica, fato este minimizado com o aumento da oferta de impressoras 3D no mercado e pela possibilidade do estabelecimento obter o retorno do investimento ao ser credenciado a diversas empresas do ramo.

A utilização da AM pode ser considerada favorável pelo impacto na cadeia de suprimentos pela redução dos estoques de peças que podem ser manufaturadas aditivamente de acordo com a demanda. Conforme já mencionado na seção 2.1.4.9, uma cadeia de suprimentos adequada deve ter resposta ao cliente e ser objetiva na utilização de ativos.

Além disso, com a rede autorizada de assistência técnica mais distribuída poderia se exigir menos logística da empresa; o enxoval de

peças seria reduzido por não abrigar mais peças que podem ser impressas, sendo seu investimento poderia revertido na aquisição de máquinas de AM e; por fim, o processo de homologação levaria em conta a capacidade de fabricação do representante da assistência técnica – e consequentemente o seu conhecimento estruturado do processo de fabricação.

#### 4.2 USO DE MODELOS EM ESCALA PARA DESENVOLVIMENTO E SELEÇÃO DE CONCEITOS – CASO DE APLICAÇÃO NO PROTÓTIPO FSAE

Esta seção é dedicada a análise do trabalho de Yoshida e Gonzaga (2018) acerca de aplicações de AM no desenvolvimento do protótipo de competição estudantil Fórmula SAE (FSAE). Os dois casos analisados naquele trabalho são relativos a um modelo em escala para representação do sistema de transmissão e a um protótipo de volante para o sistema de direção.

O objetivo desta abordagem é analisar as atividades realizadas no trabalho de Yoshida e Gonzaga (2018) na equipe Ampera da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), avaliar se existe um paralelo com as propostas geradas na sistematização e qual seria o efeito das atividades no desenvolvimento do projeto.

Dentro deste contexto, a sistematização é exemplificada buscando relacionar as propostas do capítulo anterior com atividades das fases do projeto detalhado ou anteriores, pois é nesta fase em que o projeto estava situado. A princípio, busca-se a proposta **1.3.b**, pois ela remete a uma breve reflexão, descrita na seção 3.1.3, para traçar adequadamente qual poderia ser a utilização da AM no projeto, desenvolvida no Quadro 14.

Analisando os temas de modo geral, encontram-se restrições de tamanho e material que influenciam na resistência mecânica e, por sua vez, impedem que a peça manufaturada aditivamente possa ser utilizada como produto, tanto na transmissão como na direção.

Aspectos ergonômicos e de incorporação das *features* complexas são chave para o uso da AM. O processo de extrusão de material utilizado é capaz de atender as necessidades de tolerâncias dimensionais e resistência para o uso como protótipo funcional.

De posse das reflexões do Quadro 14, considera-se coerente que o trabalho de Yoshida e Gonzaga (2018) tenha direcionado ao sistema de transmissão as contribuições na forma de modelos de escala para auxiliar na representação do sistema técnico. Isso porque a AM por extrusão de material trabalha com polímeros e a gama de materiais não é compatível

com os esforços a que aquele sistema é submetido, entretanto a representação em escala possui uma maior rapidez de fabricação do que do modo convencional.

Quadro 14 - Organização dos temas para reflexão da abordagem AM

<b>TEMA</b>	<b>REFLEXÃO AM</b>	<b>COMENTÁRIOS</b>
<u>Desempenho</u>	<i>Features</i> complexas para acúmulos de função, redução de peso e resistência mecânica	É possível de se realizar com a AM nos 2 casos
<u>Vida em serviço</u>	Desgaste em testes e suportar todas as provas de uma competição	É influenciado pelas especificações: Tamanho, Peso e Resistência
<u>Quantidade</u>	Peça única, somente um carro por equipe	É uma forte vantagem da AM
<u>Infraestrutura</u>	Equipe universitária, dependente recursos de terceiros	Não é um aspecto crítico devido ao lote único e por estar inserido numa universidade
<u>Tamanho e Peso</u>	Dimensões semelhantes aos modelos anteriormente utilizados.	Existe a necessidade de particionamento do volante.
<u>Materiais</u>	Restrição à materiais que suportem o desgaste em testes ou avaliações funcionais	Materiais relativos ao processo de extrusão de material
<u>Ergonomia</u>	Atender aspectos ergonômicos visando melhor desempenho em competição	É fortemente possível de se atender com a AM

Fonte: o autor

Da mesma forma, os esforços relativos aos movimentos do volante também podem não ser atendidos pelos materiais disponíveis, assim como a necessidade de particionamento para a construção do volante, como pode ser visto na Figura 60, retrata regiões de união enfraquecidas. Portanto a utilização da AM para elaboração de protótipos é também considerada coerente.

De posse destas considerações, pode-se filtrar a busca por propostas de atividades da sistematização relativas ao uso de protótipos para auxiliar no desenvolvimento dos projetos de transmissão e direção.

A seguir são descritas as propostas que foram identificadas nos casos abordados no trabalho de Yoshida e Gonzaga (2018) e outras que não foram abordadas, mas que poderiam contribuir para o projeto.

Para o primeiro caso – referente à representação em escala do sistema de transmissão – entende-se que o trabalho realiza uma atividade semelhante à proposta **3.5.a** descrita na seção 3.3.5: elaboração de maquetes com baixo custo, rapidez e de várias cores para facilitar a avaliação qualitativa em protótipos não funcionais.

No segundo caso – referente à elaboração de protótipos de volante – é possível relacionar as atividades daquele trabalho com a proposta **2.5.a/2.6.a** descrita na seção 3.2.5 que sugere a inclusão do cliente na seleção de conceitos através de protótipos funcionais.

A proposta 1.3.b explorada anteriormente não possui atividades semelhantes no trabalho de Yoshida e Gonzaga (2018) e contribui para avaliar quais outras propostas da sistematização poderiam ser utilizadas. Para um caso de aplicação com maior nível de informação de projeto, seria possível associar outras propostas.

#### **4.2.1 Uso de modelos em escala para o sistema de transmissão**

No trabalho de Yoshida e Gonzaga (2018), uma maquete foi confeccionada via AM baseada em extrusão de material, vide Figura 58 e apresentada para integrantes da equipe multidisciplinar de projetos junto de outras duas formas de representação (desenho técnico e modelo CAD). Em seguida, uma avaliação foi realizada para verificar alterações de entendimento do sistema.

Figura 58 - Representação em escala do sistema de transmissão



Fonte: Yoshida e Gonzaga (2018)

Os resultados acerca das respostas da avaliação estão descritos no ANEXO D. Estas avaliações apresentam que o incremento de conhecimento básico sobre o sistema técnico é mais notável com a apresentação da transmissão em forma de maquete do que nas formas tradicionais como desenho técnico e modelos CAD.

Desta forma, os autores mostram que a maquete fabricada por meio da manufatura aditiva se mostrou útil para a compreensão de conceitos básicos como a identificação de componentes para membros mais novos, tornando o entendimento sobre o funcionamento da transmissão mais clara. Esta situação é confirmada por Volpato (2017) ao citar as representações de produtos no PDP como vantagem na aprendizagem.

Um modelo físico reduz o nível de abstração em um ambiente de discussão de projetos, possibilitando um maior engajamento da equipe, esclarecendo as dúvidas que possam surgir em membros que não estejam muito familiarizados com o sistema técnico e, conseqüentemente, uma discussão mais rica.

Estes resultados corroboram a contribuição da proposta **3.5.a**. No caso estudado, o uso de maquete propiciou aos integrantes um rápido aprendizado do nível básico do sistema técnico, trazendo projetistas iniciantes ou não familiarizados com a transmissão em uma condição mais próxima daqueles mais experientes. Desta forma, a proposta propicia uma análise dos SSCs mais participativa e potencialmente mais rica.

#### **4.2.2 Uso do protótipo de volante para o sistema de direção**

No trabalho de Yoshida e Gonzaga (2018), o procedimento tradicional de confecção de protótipos para escolha de conceitos de volantes pela equipe de projetos é a manufatura de modelos em madeira através de usinagem, conforme ilustrado na Figura 59.

Figura 59 - Protótipos em madeira por manufatura tradicional



Fonte: Yoshida e Gonzaga (2018)

Os autores buscam introduzir um novo meio para a confecção deste protótipo através da AM baseada em extrusão de material conforme Figura 60. Eles então confrontam um cenário com a utilização de um conceito de volante realizado via AM e quatro outros modelos fabricados pelo modo tradicional da equipe com madeira. Uma avaliação é realizada a partir de uma matriz de Pugh com os usuários e está no Anexo E.

Figura 60 - Protótipo impresso com o acoplamento de encaixe rápido fixado



Fonte: Yoshida e Gonzaga (2018)

A avaliação apresentada pelos autores mostra uma paridade entre o modelo impresso e o realizado atualmente pela equipe, logo este resultado mostra que uma boa geometria pode ser avaliada sem ser afetada pelo método de manufatura de impressão.

O resultado apresentado pelos autores confirma que é possível incluir o usuário na seleção de conceitos e avaliação de estética e ergonomia

a partir de protótipos impressos. Além do apresentado no trabalho de Yoshida e Gonzaga (2018), é possível inferir uma maior facilidade em incrementar *features* na geometria do volante por meio da AM, além de ser um meio para a prototipagem rápida.

Entende-se que uma oportunidade de se realizar uma nova rodada de confecção e avaliação do protótipo, tornaria o modelo impresso ainda mais alinhado com as expectativas dos usuários. A possibilidade de rapidamente se produzir outro modelo impresso com melhorias, torna a proposta **2.5.a/2.6.a** da sistematização interessante para a fase de projeto conceitual.

Se a demanda da equipe por conhecimento técnico nos parâmetros de impressão e disponibilidade de máquinas impressoras fosse suprida, é plausível que o desempenho geral da equipe no desenvolvimento de suas atividades seja aumentado. Esta é uma situação que corrobora o problema desta dissertação e sua contribuição.

A sistemática poderia contribuir com as propostas de atividades, ou seja, que a equipe de projetos sem o alto grau de conhecimento em AM fosse capaz de implementar ações com a AM baseada em extrusão de material sem a interferência dos autores. E a sistemática também pode contribuir com a base de informações existentes no Capítulo 2 para auxiliar na eficácia das atividades.

Já o benefício que as propostas – e consequentemente a sistemática – produzem nos casos de aplicação apresentados no FSAE, é explicado em todo o descritivo anterior desta seção: no aumento do conhecimento e potencial participação da equipe de projeto e também na rápida fabricação de protótipos para seleção de conceitos.

### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os casos discutidos neste capítulo buscaram ilustrar como a sistematização poderia contribuir nas atividades de desenvolvimento de produto. Reitera-se que cada projeto possui um contexto diferente: uma equipe e/ou empresa com políticas e modos de operar próprios, logo a aplicação da sistematização é de certa maneira particular a cada caso em que se está servindo.

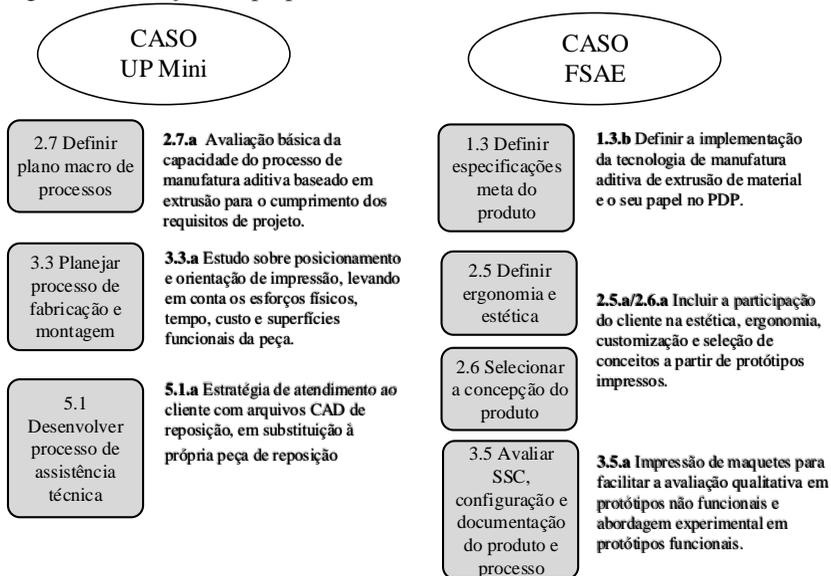
Os casos buscaram retratar cenários com e sem a utilização da sistemática, a fim de ilustrar a sua contribuição. O uso de métricas como: prazo, custo e resolução do problema no primeiro caso e as avaliações dos Anexos D e E do segundo caso, buscaram revelar de forma mais palpável e quantificável esta contribuição.

A distribuição das propostas da sistematização abordadas nos casos de aplicação está resumida na Figura 61. Com relação às escolhas das

propostas, foram inicialmente traçadas propostas iniciais – no caso do FSAE a 1.3.b e no caso da UP Mini a **5.1.a** – e no decorrer das atividades as demais propostas foram surgindo pela necessidade.

Logo, pode-se concluir que o uso de uma proposta inicial foi o gatilho para utilização de outras, mesmo que sejam de fases anteriores à atual do projeto. O contexto e a necessidade particular do projeto se sobrepuseram na escolha das propostas do que o posicionamento destas nas fases de desenvolvimento.

Figura 61 - Relação das propostas nos estudos de caso



Fonte: o autor

Os casos não abordaram as propostas do capítulo 3 em sua totalidade. Existe uma quantidade considerável de propostas a serem trabalhadas em numerosos estudos para se conseguir a total abrangência. Assim como em um modelo de referência, certas atividades não são do escopo de determinados projetos, logo as propostas geradas neste trabalho são propostas em seu sentido literal, ou seja, algo que é sugerido, oferecido.

A sistematização auxiliou no primeiro caso de aplicação no sentido de implementação da AM baseada em extrusão de material, principalmente para direcionar o ponto de partida, iniciando com a proposta **5.1.a** e quais informações e/ou conhecimentos seriam necessários pesquisar como: levantamento da capacidade do processo e parâmetros de impressão.

No segundo caso, temos uma avaliação indireta das propostas e como elas podem ser benéficas para o desenvolvimento de produtos. O caso também mostra como as atividades derivam da proposta 1.3.b, definindo um sentido para a implementação: o auxílio na geração de conceitos e participação da equipe no projeto.

## 5 CONCLUSÃO

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões da dissertação assim como as recomendações para trabalhos futuros.

Como descrito no Capítulo 1, o objetivo principal deste trabalho é sistematizar o projeto para manufatura aditiva por extrusão de material no processo de desenvolvimento de produtos. Este objetivo foi motivado pela condição deficitária do desempenho de projetos por um entendimento não suficiente e/ou não estruturado da AM no PDP. Logo, o uso das contribuições da sistemática tem o efeito esperado de sanar esta causa e tornar os projetos mais competitivos.

Primeiro, foi realizada a identificação das atividades que compõem o processo de desenvolvimento de produtos. Para isto, alguns autores de modelos de referência foram estudados e a escolha para o trabalho foi o de Rozenfeld et al. (2006). A decisão se baseou pela clara exposição dos autores sobre as entradas e saídas das atividades, boa aceitação do meio acadêmico além do fácil acesso a informações complementares.

A seguir buscou-se interpretar as especificidades da AM baseada no processo de extrusão de material no PDP. Para isto, os referenciais teóricos indicaram que existe uma situação de falta de integração entre as abordagens do DFAM e também pouco integrada com modelos de referência de PDP. Esta condição reflete limitações no aproveitamento holístico dos potenciais da AM, como se vários autores buscassem abrir frentes de pesquisa de forma independente, de acordo com a temática mais conveniente, como por exemplo tempo de processo, qualidade superficial, entre outros.

As referências de Kumke et al. (2016), Goutier (2014) e Vaneker (2017) possuem uma visão semelhante sobre o problema discutido nesta dissertação e sobre como abordá-lo. As diferenças entre o proposto neste trabalho e os três anteriores são: a forma como a estruturação foi realizada – partindo do modelo de referência de Rozenfeld et al. (2006) – e a sistematização em um nível de abordagem mais profundo. Buscar a análise em nível de atividades dentro das fases foi o que tornaram as propostas mais práticas.

Assim, foi desenvolvida uma sistematização para propor contribuições para as atividades do PDP ao se utilizar a AM baseada por extrusão de material. Então, através de um método de 5 passos, foi realizado um mapeamento e uma associação da bibliografia sobre a AM e as atividades do PDP que resultaram em uma série de propostas organizadas para tornar as atividades mais otimizadas e para tornar o projeto mais competitivo.

Nesta etapa, houve uma grande análise e reflexão sobre todo o material pesquisado, justamente para promover uma estruturação do atual conhecimento sobre o processo e tornar o seu acesso mais fácil e de simples entendimento. Acredita-se que a organização do Referencial teórico em 10 subseções (de 2.1.4.1 até 2.1.4.10) colabora para que este trabalho tenha valor além das propostas de sua sistematização, servindo também como uma base de dados sobre a AM para ser consultada.

Com base nas referências sobre a qual a sistematização foi alicerçada e no uso de um número de fontes amplamente aceitas dentro de suas limitações, afirma-se que a sistematização é internamente consistente e a sua validade pode ser confirmada através do compilado e da interpretação do referencial teórico que é capaz de se mostrar seu valor frente à falta de conhecimento da AM e sua interpretação no PDP.

Com o objetivo de se verificar a aplicação da sistemática de forma qualitativa por meio de exemplos de problemas, foram desenvolvidos casos de aplicação discutidos no Capítulo 4. O argumento para a execução dos casos é mostrar que o produto da sistematização, ou seja, as propostas, são adequadas tanto em seu conteúdo quanto na atividade do PDP no qual são inseridas. Não foi possível agrupar todas as propostas em único exemplo pois a utilidade das atividades do PDP depende de cada projeto, assim como a verificação de todas as propostas necessitaria de uma grande quantidade de exemplos.

Os casos buscaram agrupar propostas em torno de suas temáticas. Isto mostra que as propostas podem ser utilizadas sem necessariamente seguir a ordem das fases de desenvolvimento na qual foram concebidas, adequando-se ao projeto para qual estão sendo destinadas. Como foi possível verificar no caso de aplicação sobre reposição de peças, o sequenciamento temporal das propostas serviu para as alocar organizadamente, não restringindo o seu uso somente para uma fase determinada.

No primeiro caso analisado, por exemplo, é possível salientar a proposta **3.3.a** sobre o estudo do posicionamento e orientação de impressão. A proposta em si pode ser considerada genérica, embora, se analisada em conjunto com o material teórico relacionado na seção 2.1.4, é possível associar diretrizes mais específicas como: posicionar o maior número de furos orientados para cima e maior superfície da peça voltada para baixo.

Por se tratar de uma série de recomendações para os mais diferentes projetos com os mais diferentes tipos de utilização da AM, é concebível o carácter generalista das propostas do Capítulo 3, entretanto, a interpretação dentro do contexto do projeto é particular a quem está se servindo da sistematização. Cabe então, o uso também do referencial teórico desta

dissertação que não existe somente para justificar a elaboração da sistemática ou de suas propostas, mas também para fornecer informações confiáveis para a particularização.

Os casos de aplicação mostraram que a utilização de uma proposta inicial pode resultar no uso de outras propostas decorrentes da implementação da primeira, como ocorre no caso sobre a reposição de peças. Outro ponto a se ponderar é a consideração de propostas contidas em fases diferentes da aplicação, ou seja, utilizar propostas de fases anteriores a do projeto.

Este trabalho avança no sentido de tornar a AM mais especificamente associada junto às atividades de projeto, tornando-as mais claras e simples para implementação, além de aproximar o projetista do conhecimento prático da AM. O trabalho também auxilia os participantes de um projeto em saber qual tipo de informação buscar e fornece um compilado de material suficiente para suportar as buscas.

Em termos gerais, o material reunido nesta dissertação fornece uma base informacional consistente para suprir as necessidades atuais para a utilização da sistematização. Conclui-se que a sistematização proposta possui utilidade e contribui para o projeto para manufatura aditiva baseado em extrusão de material e tem potencial de utilização na macro fase de desenvolvimento.

Em decorrência das limitações desta dissertação, propostas de trabalhos futuros são recomendadas.

Outra tecnologia de AM poderia passar pela sistemática para gerar propostas sobre um processo como por exemplo o de fusão de leito de pó. Um novo estudo sobre outro processo de AM resultaria em uma nova série de propostas que seriam em parte diferentes das apresentadas neste trabalho, mas em parte semelhantes pelas próprias características da AM.

Uma limitação encontrada durante a verificação da sistemática foi a dificuldade nas análises de desempenho relativas às propostas que necessitam de uma situação com condições de contorno bem definidas e um ambiente similar àquele encontrado nas equipes de projeto. Esta situação não foi possível de ser elaborada para este trabalho para todas as propostas.

Por fim, existem outras direções de pesquisa no campo do desenvolvimento de produtos como por exemplo a servitização ou aplicações para a indústria 4.0.

## REFERÊNCIAS

3D PRINTING FROM SCRATCH. **Types of 3D printers or 3D printing technologies overview**. Disponível em:

<http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/>. Acesso em: 25/10/2017.

ACHILLAS, CH.; AIDONIS, D.; IAKOVOU, E.; THYMIANIDIS, M.; TZETZIS, D. A methodological framework for the inclusion of modern additive manufacturing into the production portfolio of a focused factory. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 37, p.328-339, 2015.

ADAM, G. A. O.; ZIMMER, D. On design for additive manufacturing: evaluating geometrical limitations. **Rapid Prototyping Journal**, v. 21, n. 6, p.662-670, 2015.

AHUJA, B.; KARG, M.; SCHMIDT, M. Additive Manufacturing in Production – Challenges and Opportunities. **Procedia of SPIE**, vol. 9353, 2015.

AURÉLIO, **Dicionário do Aurélio Online**. Disponível em: <<https://dicionariodoaurelio.com>>. Acesso em 14 de Ago. 2017.

BARNEY, J. Firm resources and sustained competitive advantage. **Journal of Management**, v.17, n.1, p. 99-120, 1991.

BAXTER, M. **Product Design**. Londres. CRC Press. 1995. 308p.

BERMAN B. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business Horizons**, 55, p155-162, 2012.

BIANCOLINO, C.A. **EAC 0548 - Sistemas de Informações Contábeis**. Notas de aula, FEA-USP, 2017.

BLEICHER, C. E. **Proposta de um método para a reestruturação do processo de desenvolvimento de produtos em pequenas e médias empresas**. 208p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. 2008

BOELTER, N. M. **Planejamento de produtos orientado pela biônica: uso de bioinspiradores.** 2018. 223 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

BOYARD, N.; RIVETTE, M.; CHRISTMANN, O.; RICHIR, S. A design methodology for parts using Additive Manufacturing. **Int. Conf. Adv. Res. Virtual Rapid Prototype.**, 2013

BROWNING, T. R.; FRICKE, E. Key concepts in modeling product development process. **Systems Engineering**, 9. p. 104-128, 2006.

CALÌ, J.; CALIAN, D. A.; AMATI, C., KLEINBERGER, R., STEED, A.; KAUTZ, J.; WEYRICH, T. 3D-Printing of Non-Assembly, Articulated Models. **ACM Trans. Graph.**, v.130, p.1-6, 2012.

CAMPBELL, R. I. DE BEER, D. J.; MAUCHLINE, D. A.; BECKER, I.; VAN DER GRIJP, R.; ARIADI, Y.; EVANS, M. A. Additive manufacturing as an enabler for enhanced consumer involvement. **South African Journal of Industrial Engineering.** Aug. v.25(2) p.67-74, 2014.

CLARK, K. B.; FUJIMOTO, T. **Product Development Performance: Strategy, Organization, and Management in the World Auto Industry.** Boston: Harvard Business School Press, 1991. 432 p.

CONNER, B. P.; MANOGHARAN, G. P.; MARTOF, A. N. Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. **Additive manufacturing**, 1, p. 64-76, 2014.

DERADJAT, D.; MINSHALL, T. Implementation of additive manufacturing Technologies for mass customisation. **IAMOT Conference Proceedings.** p.2079-2094, 2015.

DIAS, A.; CALIL, L. F. P.; RIGONI, E.; SAKURADA, E. Y.; OGLIARI, A.; KAGUEIAMA, H. A. **Metodologia para análise de risco: Mitigação de perda de SF6 em disjuntores.** Florianópolis: Ed. Studio S. 2011. 304p.

DOUBROVSKI, Z.; VERLINDEN, J. C.; GERAEDTS, J. M. P. Optimal design for additive manufacturing: opportunities and challenges. **International Design Engineering Technical Conferences**. p.1-11, 2011.

FERENHOF, H. A.; FERNANDES, R. F. Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: Método SSF. **Revista ACB**, v. 21, n. 3, 2016.

FELIX, L. A. G. **Potencial disruptivo da manufatura aditiva: influência nas cadeias de suprimentos e uma aplicação na Marinha do Brasil**. Dissertação (Mestrado). 116 p. PUC-RJ, 2017.

GAO, W.; ZHANG, Y.; RAMANUJAN, D.; RAMANI, K.; CHEN, Y.; WILLIAMS, C. B.; WANG, C. C. L.; SHIN, Y. C.; ZHANG, S.; ZAVATTIERI, P. D. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-aided Design**, v. 69, p.65-89, 2015.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: 3D printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. 2. Ed. Atlanta: Springer, 2015. 498 p.

GOUTIER, M. **Implementing additive manufacturing in a product life cycle**. 93 p. Dissertação (Mestrado). University of Twente. 2014.

HUANG, Y.; LEU, M. C.; MAZUMDER, J.; DONMEZ, A. Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. v.137, Fev, p. 1-11, 2014.

HUIWEI, L. Research on the Family Design Method of Product by 3D Printing. **2015 Seventh International Conference on Measuring Technology And Mechatronics Automation**, [s.l.], p.912-915, jun. 2015. IEEE.

ISO/ASTM 52900. **Additive manufacturing - General principles – Terminology**, 2015. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>. Acesso em: 02 de outubro de 2017.

JAHNKE, U.; LINDEMANN, C.; MOI, M.; KOCH, R. Potentials of Additive Manufacturing to Prevent Product Piracy. **Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference**. p.1023-1033, 2013.

JIANG, R.; KLEER, R.; PILLER, F. T.; Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. **Technological Forecasting and Social Change**, [s.l.], v. 117, p.84-97, abr. 2017. Elsevier BV.

JING, S.; SONG, G.; LIU, J.; ZHOU, J.; ZHANG, H. A Review of Product Design for Additive Manufacturing. **Applied Mechanics and Materials**, v. 635-637, p.97-100, 2014.

KERBRAT, O.; MOGNOL, P.; HASCOËT, J. A new approach to combine machining and additive manufacturing. **Computers in industry**, v.62, p.684-692, 2011.

KLAHN, C; SINGER, D.; MEBOLDT, M. Design guidelines for additive manufactured snap-fit joints. **Procedia CIRP**, v. 50, p.264-269, 2016.

KO, H.; MOON, S. K.; OTTO, K. N. Design knowledge representation to support personalised additive manufacturing. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 10, n. 4, p.217-226, 2015.

KUMKE, M.; WATSCHKE, H. A new methodological framework for design for additive manufacturing. **Virtual and Physical Prototyping** v. 11, n. 1, p.3-19, 2016.

KUMKE, M.; WATSCHKE, H.; BAVENDIEK, A.; VIETOR, T. Methods and tools for identifying and leveraging additive manufacturing design potentials. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, p.1-13, 2017.

LAVERNE, F. SEGONDS, F.; ANWER, N.; LE COQ, M. Assembly Based Methods to Support Product Innovation in Design for Additive Manufacturing: An Exploratory Case Study. **Journal of Mechanical Design**, v. 137. Dec. p. 1-8, 2015.

LIENEKE, T.; DENZER V. Dimensional tolerances for additive manufacturing: Experimental investigation for Fused Deposition Modeling. **Procedia CIRP** **43**, p.286-291, 2016.

LINDEMANN, C.; JAHNKE, U.; MOI, M. Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing. **Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference**, v. 23. p. 177-188, 2012.

LINDEMANN, C.; REIHER, T.; JAHNKE, U.; KOCH, R. Towards a sustainable and economic selection of part candidates for additive manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**. 21. p. 216-227, 2015.

MAIDIN, S. B.; CAMPBELL, I.; PEI, E. Development of a design feature database to support design for additive manufacturing. **Assembly Automation**, v. 32, n. 3, p.235-244, 2012.

MANÇANARES, C. G.; ZANCUL, E. S.; SILVA, J. C.; MIGUEL, P. A. C. Additive manufacturing process selection based on parts' selection criteria. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 80, n. 5-8, p.1007-1014, 12 abr. 2015.

MANÇANARES, C. G. **Modelo de processo de avaliação para adoção de manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado**. 136p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2016.

MELLOR, S.; HAO, L.; ZHANG, D. Additive manufacturing: A framework for implementation. **Int. J. Production Economics**, 149, p. 194-201, 2014.

MINETOLA, P.; IULIANO, L.; MARCHIANDI, G. Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades. **Procedia CIRP**, v.41, p. 1027-1032, 2016

NEWBERT, S. Value, rareness, competitive advantage, and performance: a conceptual-level empirical investigation of the resource-based view of the firm. **Strategic Management Journal**, v. 29, p. 745-768. 2008.

NIAKI, M. K.; NONINO, F. Impact of additive manufacturing on business competitiveness: a multiple case study. **Journal of**

**Manufacturing Technology Management**, [s.l.], v. 28, n. 1, p.56-74, 6 fev. 2017. Emerald.

NONAKA, I.; TAKEUCHI, H. **Teoria da criação do conhecimento organizacional**. In: TAKEUCHI, H.; NONAKA, I. Gestão do conhecimento. Tradução Ana Thorell. Porto Alegre: Bookman, 2008. p. 54-90.

ORQUÉRA, M.; CAMPOCASSO, S.; MILLET, D. Design for Additive Manufacturing Method for a Mechanical System Downsizing. **Procedia CIRP**, v. 60, p.223-228, 2017.

OTTOSSON, S. SKOGSRØD, T. Some experiences from using 3D-printing in the modelling of a new product. **NordDesign**, Aug., 2016.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. H. **Projeto na engenharia: Fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos; Métodos e aplicações**. 6. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2007. 412 p.

PMBOK GUIDE – **Project Management Body of Knowledge** - Um Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos, Terceira edição, PMI – Project Management Institute, Newtown Square, Pennsylvania, EUA, 2004.

POULSEN, S. N. **A Delphi study of additive manufacturing applicability for United States air force civil engineer contingency operations**. 102 p. Dissertação (Mestrado). Air Force Institute of Technology, 2015.

POUR, M. A.; ZANARDINI, M.; BACCHETTI, A., ZANONI, S. Additive Manufacturing Impacts on Productions and Logistics Systems. **Ifac-papersonline**, v. 49, n. 12, p.1679-1684, 2016.

PUGH, S. **Total Design** - Integrated Methods for Successful Product Engineering. 3 ed., UK, Addison-Wesley, Wokingham, 1990.

QI, N.; ZHANG, X.; YIN, G.; Opportunities and Challenges of Industrial Design Brought by 3D Printing Technology. **Advances In Transdisciplinary Engineering**, v.1, p.369-376, 2014.

RAUT, S.; JATTI, V. S.; KHEDKAR, N. K.; SINGH, T. P.; Investigation of the Effect of Built Orientation on Mechanical Properties and Total Cost of FDM Parts. **Procedia Materials Science**, v. 6, p.1625-1630, 2014.

RIAS, A.; BOUCHARD, C.; SEGONDS, F.; ABED, S.; Design for additive manufacturing: a creative approach. **International Design Conference**, p.411- 420, 2016.

RODRIGUES, V. P.; ZANCUL, E. S.; MANÇANARES, C. G.; GIORDANO, C. M.; SALERNO, M. S. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Ano 12, nº 3, p. 1-34, 2016

ROSEN, D. W.; Design for additive manufacturing: a method to explore unexplored regions of the design space. **Georgia Institute of Technology**. Atlanta, USA, 2007.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F.; AMARAL, D.; TOLEDO, J. C.; ALIPRANDINI, D. H.; SILVA, S. L.; SCALICE, R. K. **Gestão de desenvolvimento de produtos – uma abordagem para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006. 542p.

SALONITIS, K. Redesign optimization for manufacturing using additive layer techniques. **Procedia CIRP 36**, p.193-198, 2015.

SALONITIS, K. Design for additive manufacturing based on the axiomatic design method. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, Nov. p 1-8., 2016.

SILVA, E. L. da; **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4 Ed. Florianópolis, UFSC, 2005.

SIMPSON, T.; WILLIAMS, C. Preparing industry for additive manufacturing and its applications: Summary e recommendations from a National Science Foundation workshop. **Additive Manufacturing**, 13, p.166-178, 2017.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. São Paulo: Editora Atlas. 2002. 747p.

SOSSOU, G.; DEMOLY, F.; MONTAVON, G.; GOMES, S. An additive manufacturing oriented design approach to mechanical assemblies. **Journal of Computational Design And Engineering**, [s.l.], v. 5, n. 1, p.3-18, jan. 2018. Elsevier BV.

SPALLEK, J.; KRAUSE, D. Process Types of Customisation and Personalisation in Design for Additive Manufacturing Applied to Vascular Models. **Procedia CIRP**, v. 50, p.281-286, 2016.

TEITELBAUM, G. A. **Proposed build guidelines for use in fused deposition modeling to reduce build time and material volume**. 110 p. Dissertação (Mestrado). University of Maryland, 2009.

THOMPSON, M. K.; MORONI, G.; VANEKER, T. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. **Manufacturing Technology**, 65, p. 737-760, 2016.

ULRICH K.; EPPINGER S. **Product Design and Development**. 4. Ed. New York: McGraw Hill, 2007.

VANEKER, T. H. J. The role of Design for Additive Manufacturing in the successful economical introduction of AM. **Procedia CIRP** 60, p.181-186, 2017.

VERQUIN, B.; MOVCHAN, I. **SASAM (Support Action for Standardization in Additive Manufacturing)**: guidelines for the development of the EU standards in additive manufacturing. Seventh Framework Programme, UE, 2014.

VOLPATO, N. (org). **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Edgard Blucher, 2017. 400p.

WELLER, C.; KLEER, R.; PILLER, F. Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. **International Journal Of Production Economics**, v. 164, p.43-56, 2015.

WÜRTZ, G.; LASI, H.; MORAR, D. Additive Manufacturing – Enabling Technology for Lifecycle Oriented Value-increase or Value-decrease. **Procedia CIRP**, v. 33, p.394-399, 2015.

YANG, S.; ZHAO, Y. F. Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, Mar. p.1-16., 2015.

YIM, S.; ROSEN, D. Build time and cost models for additive manufacturing process selection. **IDETC/CIE**, Aug, p.1-8, 2012.

YOSHIDA, L. S.; GONZAGA, L. M. Additive Manufacturing for conceptual design of components – A Formula SAE case study. **SAE Technical Papers**, SAE Technical Papers Series, v. 1, p. 1-10, 2018.

ZAMAN, U. K.; SIADAT, A.; RIVETTE, M.; BAQAI, A.A.; QIAO, L. Integrated product-process design: Material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making. **Robotics and Computer-integrated Manufacturing**, [s.l.], v. 51, p.169-180, jun. 2018. Elsevier BV.

ZANATTA, A. **Melhoria do processo de desenvolvimento de produtos de uma empresa de produção de bens de consumo duráveis visando à implementação de uma modelo de referência.** 208p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2010

ZANCUL, E. S. **Gestão do Ciclo de Vida de Produtos: seleção de sistemas PLM com base em modelos de referência.** Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2009.

ZHAI, Y. **Early cost estimation for additive manufacture.** 106p. Dissertação (Mestrado). Cranfield University. 2012.

ZHANG, Y.; BERNARD, A.; GUPTA, R. K. Evaluating the Design for Additive Manufacturing: A Process Planning Perspective. **Procedia CIRP** 21, p. 144-150, 2014.



## APÊNDICE A – PLANILHA DE DESENVOLVIMENTO DA SISTEMÁTICA

### A.1 Projeto Informacional

Quadro 15 - Planilha Fase de projeto informacional

Atividades	Objetivos Resumidos	Bibl. AM correspond.	Revisão AM correspond.	Proposta
Revisar e Atualizar o Escopo do Produto	Análise do problema de projeto - Analisar tecnologias disponíveis e necessárias - Pesquisar padrões / normas e legislação - Pesquisar produtos concorrentes e similares	Niaki (2017)	Processo AM x aplicação x competitividade de NIAKI (2017)	Compreender as capacidades e limitações do processo de AM de domínio e verificar se estão alinhadas com a declaração do escopo do produto
		Ajuha (2015)	Implementação com claro entendimento – AJUHA et al. (2015)	
		Lindemann (2015)	Reprodução via arquivos digitais – LINDEMANN et al. (2015)	Pesquisa de concorrentes com escâneres, protótipos e arquivos CAD <i>open source</i>
Detalhar ciclo de vida do produto e definir seus clientes	Refinar o ciclo de vida do produto - Definir os clientes do projeto ao longo do ciclo de vida	Deradjat (2015)	Implementação em nível operacional - DERADJAT (2015)	Avaliar o impacto na cadeia de suprimentos utilizando AM e o nível de conhecimento dos <i>stakeholders</i> sobre este processo de fabricação
		Lindemann (2013)	Redução de custo logístico de Lindemann et al (2013)	
		Simpson (2016)	Workshop sobre ensino da AM na mão-de-obra de Simpson (2016)	

Atividades	Objetivos Resumidos	Bibl. AM correspond.	Revisão AM correspond.	Proposta
Definir especificações meta do produto	Valorar requisitos do produto - Analisar perfil técnico e de mercado - Analisar restrições de projeto do produto - Elaborar o conjunto de especificações-meta do produto	Lindemann (2015)	Informações básicas sobre potenciais peças para AM de Lindemann (2015). Critério K.O. na fase de avaliação de Lindemann (2015)	Definir a implementação da tecnologia de manufatura aditiva de extrusão de material e o seu papel no PDP
		Rozenfeld (2006)	Checklist baseado em Pugh p/ verificar especificações de produto.	Refletir a partir das questões de análise da AM em cada tema da lista baseada em Rozenfeld et al. (2006) de acordo com as especificações-meta
Monitorar a viabilidade econômico-financeira do produto	Avaliar mudanças nas condições de mercado, impacto das mudanças no projeto - Atualizar custo-alvo e as necessidades de investimentos	Lindemann (2012)	União do modelo de custo de Lindemann (2012) e de Conner (2014)	Estudar a estimativa de comportamento do custo na AM por extrusão de material e atualizar as projeções dos indicadores de custo de cenário de implementação
		Conner (2014)		
		Raut (2014)	Demanda de tempo e material para extrusão de materia de Raut (2014)	

Fonte: o autor

## A.2 Projeto Conceitual

Quadro 16 - Planilha Fase de projeto conceitual

Atividades	Objetivos Resumidos	Bibl. AM correspond.	Revisão AM correspond.	Proposta
Desenvolver princípios de solução para as funções	Definir efeitos físicos - Definir portadores de efeito	Kumke (2017)	Avaliação dos métodos de ideação no contexto do DfAM	Escolha dos métodos de ideação mais compatíveis para desenvolver os princípios de solução utilizando a AM
		Rosen (2007)	Abordagem de engenharia reversa baseado em bioestimuladores e representações biológicas para busca de princípios de funcionamento	Uso de modelos físicos para a redução do nível de abstração e estimulação a novas ideias. Engenharia reversa e/ou uso de bioinspiradores na geração de ideias e princípios de funcionamento.
		Boelter (2018)		
		Maidin (2012)	<i>Features</i> trazidas pelos <i>bioins</i>	
Desenvolver as alternativas de solução para o produto	Gerar alternativas de solução, elaborar matriz morfológica	Kumke (2016)	Conceito de integração de métodos e ferramentas existentes	Busca de ideias para alternativas de solução através de uma visão integradora entre os métodos DfAM Estrito e Amplo e os DfAM Oportunista e Restritivo
		Maidin (2012)	Uso de <i>database</i> de <i>features</i> de Maidin para aplicação em DfAM	
		Jiang (2017)	Projeções para o ano de 2030 (item 14)	

Atividades	Objetivos Resumidos	Bibl. AM correspond.	Revisão AM correspond.	Proposta
Definir arquitetura para o produto	Identificar Sistemas, Subsistemas e Componentes Definir integração entre SSCs e alternativas de projeto	Huiwei (2015)	Visual e design de famílias com 3D <i>printing</i>	Modularização utilizando a AM para viabilizar projeto de famílias de produtos e a customização.
		Yang (2015)	Modularização para viabilizar customização	
		Wurtz (2015)		
Analisar Sistemas, Subsistemas e Componentes (SSC)	Definir SSC	Yang (2015)	Impacto da AM no projeto: manufatura, montagem e <i>performance</i>	Correlacionar as diretrizes dos DFXs tradicionais de manufatura e montagem e traduzir em suas aplicações específicas para a AM
Definir a ergonomia e estética	Analisar as concepções alternativas - Valorar as concepções alternativas - Selecionar concepções	Deradjat (2015)	Educar clientes para as possibilidades de <i>design</i>	Incluir a participação do cliente na estética, ergonomia, customização e seleção de conceitos a partir de protótipos impressos.
Selecionar a concepção do produto		Maidin (2012)	Uso de esboços com <i>features</i> AM para ergonomia e estética	
		Campbell (2014)	Participação do cliente na seleção de conceitos no CIFP	
Definir plano macro de processo	Identificação de possíveis processos de fabricação dos SSCs e também do ferramental envolvido	Zhang (2014)	Macro e micro <i>process planning</i>	Avaliação básica da capacidade do processo de manufatura aditiva baseado em extrusão para o cumprimento dos requisitos de projeto
		Adam (2015)	Capacidades de construção do FDM. <i>Design rules</i>	

Fonte: o autor

### A.3 Projeto Detalhado

Quadro 17 - Planilha Fase de projeto detalhado

Atividades	Objetivos Resumidos	Bibl. AM correspond.	Revisão AM correspond.	Proposta
Criar e detalhar SSCs, documentação e configuração	Criar, reutilizar, procurar e codificar SSCs - Calcular e desenhar SSCs - Especificar tolerâncias - Integrar os SSCs - Finalizar desenhos e documentos - Completar BOM	Conner (2014)	União de peças por complexidade de forma	Avaliar o impacto da capacidade de união de peças via AM no projeto
		Lieneke (2016)	Verificar tolerâncias de acordo com a tabela de IT do FDM	Levantamento de informações de tolerância, área de impressão, parâmetros e matérias-primas disponíveis
		Rozenfeld (2006)	Síntese das características de cálculo e desenho dos SSCs	Uso de ferramentas CAE de otimização topológica para cálculo e desenho iterativo de SSC
		Gibson (2015)	Otimização e CAE para AM.	
Decidir por fazer ou comprar SSC	<i>Make or Buy</i>	Yim (2012)	Tempo de construção e custo por FDM	Equacionamento do custo geral de fabricação por extrusão de material e análise de nível de participação de cada fator de custo.
		Gibson (2010)	Equação de custo de material	
		Lindemann (2012)	Análise de custo e nível de participação ( <i>cost drivers</i> )	

Atividades	Objetivos Resumidos	Bibl. AM correspond.	Revisão AM correspond.	Proposta
Planejar o processo de fabricação e montagem	Plano de processo	Teitelbaum (2009)	8 <i>guidelines</i> de aplicação: altura, direção, preenchimento.	Estudo sobre posicionamento e orientação de impressão, levando em conta os esforços físicos, tempo, custo, e superfícies funcionais da peça
		Raut (2014)	Relação de orientação, propriedades mecânicas e custo em FDM	
		Kerbrat (2011)	Combinação de usinagem com impressão 3D no projeto	Análise sobre a possibilidade de um processo de fabricação híbrido e/ou divisão de componentes de acordo com a complexidade
Projetar recursos de fabricação	Projetar equipamentos, dispositivos, etc	Minetola (2016)	Comparação de máquinas FDM com relação a IT e qualidade	Listagem e ranqueamento de maquinário em potencial para compra/utilização nos processos de fabricação.
		Mancanares (2016 p.108)	Lógica de seleção e ranqueamento multicritério de máquinas	
		Gao (2015)	Classificação de máquinas. Gao (2015)	
Avaliar SSCs, configuração e documentação do produto e processo	Testes, tolerância e análise de falhas	Rozenfeld (2006)	Métodos de avaliação SSC	Impressão de maquetes para facilitar a avaliação qualitativa em protótipos não funcionais e abordagem experimental em protótipos funcionais

Atividades	Objetivos Resumidos	Bibl. AM correspond.	Revisão AM correspond.	Proposta
Otimizar Produto e Processo	Finalizar aplicação DFX - Ajustar tolerância dos SSCs - Executar ações de correção de falhas	Maidin (2012)	<i>Features</i> de montagem	Otimizar a interface entre componentes através de encaixes tipo <i>snap-fit</i> e articulações impressas
		Klahn (2016)	Recomendações de projeto para <i>snap-fit</i> e orientação de impressão	
		Cal (2012)	Recomendação de projeto para articulações.	
Testar e Homologar produto	Verificar a documentação e o atendimento a normas - Obter certificado de homologação	<i>Stratasys</i> ISO 10993 / NCAMP	Homologação de aplicação em setores específicos.	Verificação de homologações necessárias para os materiais e para a aplicação da manufatura aditiva por extrusão de material

Fonte: o autor

## A.4 Preparação da produção

Quadro 18 - Planilha Fase de preparação da produção

Atividades	Objetivos Resumidos	Bibl. AM correspond.	Revisão AM correspond.	Proposta
Otimizar produção	Otimizar o processo produtivo	Félix (2017)	Impacto em cadeias ágeis e <i>lean</i> (enxutas)	Otimização da produção através dos impactos de redução de movimentações, materiais e estoques
Desenvolver processo de produção	Desenvolver processo planejamento e controle da produção - Desenhar os processos de logística e relação de entrega de produtos aos clientes	Pour (2016)	(Des) Centralização de produção e distribuição, lote, inventário	Planejar, programar a produção considerando ambiente fabril, descentralização da produção, cadeia de suprimentos e redes de distribuição
		Scott (2015)	Projeto de <i>supply chain</i> e comparação com modelos tradicionais	
		Achilas (2015)		
		Jiang (2017)	Projeções para o ano de 2030 (item 5 e 13)	

Fonte: o autor

## A.5 Lançamento

Quadro 19 - Planilha Fase de lançamento

Atividades	Objetivos Resumidos	Bibl. AM correspond.	Revisão AM correspond.	Proposta
Desenvolver processo de assistência técnica	Desenhar processo de assistência técnica - Implantar processo de assistência técnica	Félix (2017)	FDM e o fenômeno <i>Maker</i> . Arquivo CAD de reposição.	Estratégia de atendimento ao cliente com arquivos CAD de reposição, em substituição à própria peça de reposição
		Jiang (2017)	Projeções para o ano de 2030 (item 12 e 17)	

Fonte: o autor

## ANEXO A – Fornecimento de peças UP3D

Figura 62 - Peça de reposição com preço fixado e a pronta entrega



The image shows a screenshot of the UP3D website's shopping cart. At the top, the UP3D logo is displayed with the website address 'up3d.com.br' and the text 'Impressoras 3D'. Below the logo, the page title is 'Carrinho de compras'. A table lists the items in the cart:

Produto	Quantidade	Preço	Subtotal
 Bico de extrusão	- 1 +	R\$130,00	R\$130,00

Below the table, there is a 'Calculo de frete:' section with the CEP '88040003' and a 'CALCULAR FRETE' button. To the right, the subtotal is shown as 'Subtotal (sem frete) : R\$130,00'. Below this, the total is displayed as 'Total: R\$130,00' with a note 'Ou até 12 x de R\$13,05'. At the bottom, there are three shipping options:

- Grátis**  
Retirar na Loja1 - Louveira-SP
- R\$24,79 - 11 dias úteis**  
Correios - PAC
- R\$45,12 - 5 dias úteis**  
Correios - SEDEX

A green 'FINALIZAR COMPRA' button is located at the bottom right of the cart area.

Fonte: UP 3D. Disponível em: <https://www.up3dbrasil.com.br/pecas-de-reposicao/bico-de-extrusao/>. Acesso em 10/11/2018.

Figura 63 - Peça de reposição com preço sob consulta



The image shows a screenshot of a website page for a 3D printer part. At the top, there is a logo for UP3D, consisting of a green and blue cube icon and the text "UP3D up3d.com.br Impressoras 3D". Below the logo, the page title is "Bico de extrusão montado". A central image shows a yellow extruder assembly with a metal nozzle. To the right of the image is a green button with the text "PREÇO SOB CONSULTA". Below the image, there is a description: "Bico de extrusão montado com sistema de aquecimento, sensor de temperatura e bico de extrusão. Completo". At the bottom, it says "Serve na UPmini, UPmini2, UPPlus2 e UPBOX."

UP3D  
up3d.com.br  
Impressoras 3D

Início / Peças de reposição / Bico de extrusão montado

## Bico de extrusão montado

PREÇO SOB CONSULTA

Bico de extrusão montado com sistema de aquecimento, sensor de temperatura e bico de extrusão.  
Completo  
Serve na UPmini, UPmini2, UPPlus2 e UPBOX .

Fonte: UP 3D. Disponível em <https://www.up3dbrasil.com.br/peças-de-reposicao/bico-de-extrusao-montado/>. Acesso em 10/11/2018.

Figura 64 - Peça de reposição com estoque esgotado



(<http://www.up3dbrasil.com.br>)

Início (<http://www.up3dbrasil.com.br>) / Peças de reposição (/pecas-de-reposicao) / Alicate Original UP

Alicate Original UP



(//d26lpennugtm8s.cloudfront.net/stores/028/617/products/alicate-original-up-eff813a440a35b924115121897107947-1024-1024.jpg)

**R\$69,90**

ESGOTADO

<https://www.up3dbrasil.com.br/pecas-de-reposicao/perfboard-up-plus-2-copia/>

1/4

Fonte: Up Mini. Disponível em: <https://www.up3dbrasil.com.br/pecas-de-reposicao/perfboard-up-plus-2-copia/>. Acesso em 11/11/2018

## ANEXO B – Cotações de peças via AM simuladas via site 3D Hubs

Figura 65 - Cotação Only3D Limited's Hub



**Only3D Limited's Hub**  
 ★★★★★ 4.8 (190 reviews)

Only3D – 3D Printing studio equipped with cutting edge FDM print technology – Raise3D and Prusa Original and Creality - world renown printers Only3D has full colour...  
[Read more](#)

[See reviews and images](#)

---

### Your order request



1x v1.stl

Material	Generic Standard ABS
Color	White
Layer height	300µm

[Add discount code](#)

<b>Total</b>	<b>£9.18</b>
--------------	--------------

Fonte: 3D HUBS. Disponível em:

<https://www.3dhubs.com/3dprint/checkout/#/h/69180?uid=1>.

Acesso em 10/11/2018.

Figura 66 - Cotação Flux Design's Hub



**Flux Design's Hub**  
 ★★★★★ 4.9 (157 reviews)

I can print in various colors of ABS, PLA, PETG, Polycarbonate (PC), and Nylon on 4 different FDM printers, as well as various colors of Standard Resin on an SLA printer. I can...  
[Read more](#)

See reviews and images

---

**Your order request**



1x v1.stl

Material	Generic Standard ABS
Color	White
Layer height	200µm

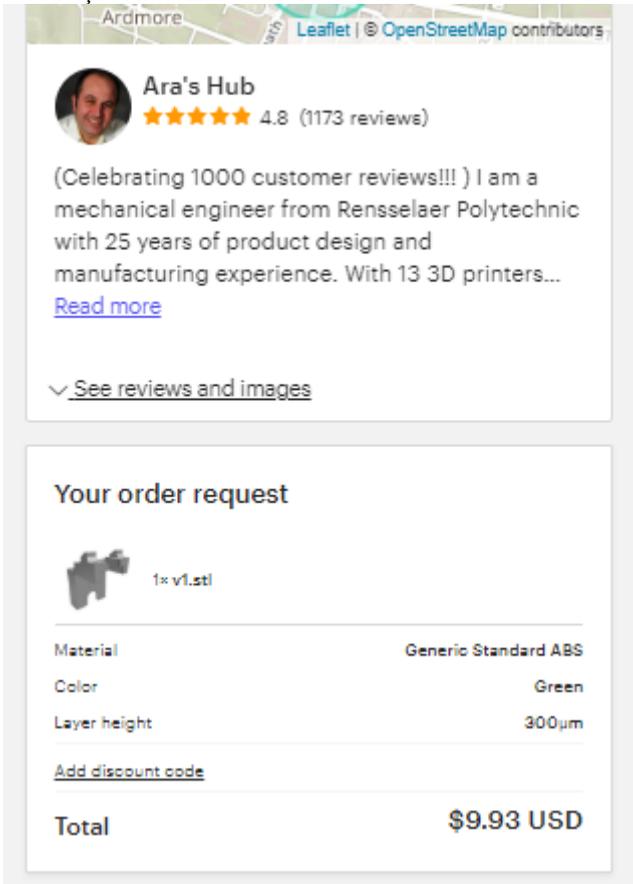
[Add discount code](#)

**Total** **\$8.06 USD**

Fonte: 3D HUBS. Disponível em:

<https://www.3dhubs.com/3dprint/checkout/#/h/206598?uid=2>. Acesso em 10/11/2018.

Figura 67 - Cotação Ara's Hub



Ardmore  
Leaflet | © OpenStreetMap contributors

 **Ara's Hub**  
★★★★★ 4.8 (1173 reviews)

(Celebrating 1000 customer reviews!!!) I am a mechanical engineer from Rensselaer Polytechnic with 25 years of product design and manufacturing experience. With 13 3D printers...  
[Read more](#)

∨ [See reviews and images](#)

### Your order request

 1x v1.stl

Material	Generic Standard ABS
Color	Green
Layer height	300µm

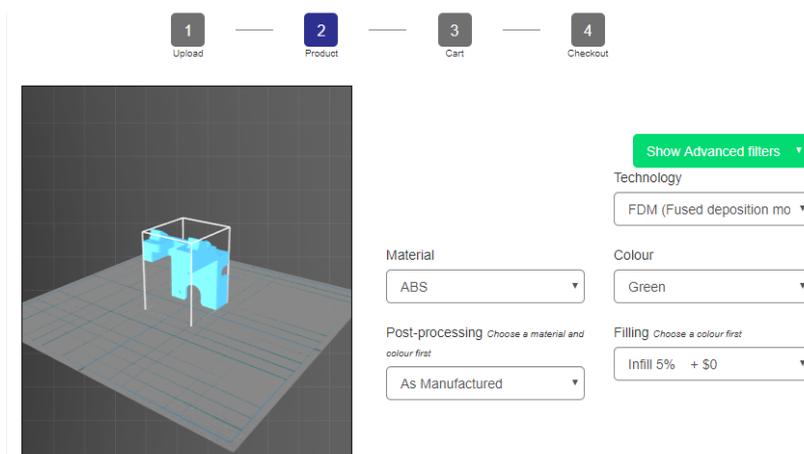
[Add discount code](#)

**Total** **\$9.93 USD**

Fonte: 3D HUBS. Disponível em: Disponível em <https://www.3dhubs.com/3dprint/checkout/#/h/4450?uid=3> Acesso 10/11/2018

## ANEXO C – Cotações de peças via AM simuladas via site 3D Compare

Figura 68 - Configurações do pedido do produto



Fonte: 3D Compare. Disponível em: <https://app.3dcompare.com/>. Acesso em 11/11/2018.

Figura 69 - Cotação RexRoi LLC

 RexRoi LLC	Material Type : Material Name : ABS Color : Black, White, Green Post Pro : As manufactured Infill : 20%	Quantity : 1 Per Unit : \$4.72 Set Up Cost : \$3.93 Min order price \$3.93 Produced By : November 14th 2018	Pickup : Yes USA, Los Angeles Delivered : No \$NaN
	From <b>\$8.65</b>		<b>ADD TO CART</b>

Fonte: 3D Compare. Disponível em: <https://app.3dcompare.com/>. Acesso em 11/11/2018.

Figura 70 - Cotação Oppus Locus

 <b>Opus Locus</b> Atelier	<b>Material Type :</b> Material Name : ABS Color : Black, Blue, Green, Magenta, Orange, Red, Silver, Transparent, White, Yellow Post Pro : As manufactured Infill : 20%	<b>Quantity :</b> 1 <b>Per Unit :</b> \$8.51 <b>Set Up Cost :</b> \$6.77 <b>Min order price</b> \$17.13 <hr/> <b>Produced By :</b> November 14th 2018	<b>Pickup :</b> Yes United Kingdom, london  <b>Delivered :</b> No \$NaN
			<b>From</b> <b>\$17.13</b> <div style="background-color: green; color: white; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <b>ADD TO CART</b> </div>

Fonte: 3D Compare. Disponível em: <https://app.3dcompare.com/>. Acesso em 11/11/2018.

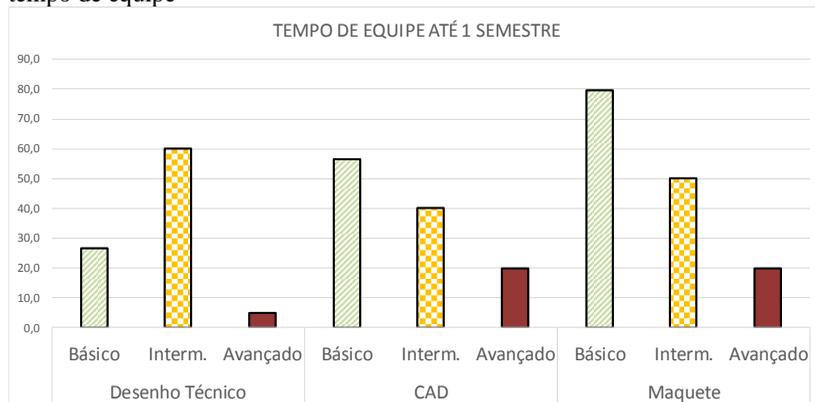
Figura 71 - Cotação PRODPOINT Ltd.

 <b>PRODPOINT</b> Ltd	<b>Material Type :</b> Material Name : ABS Color : Black, Blue, Green, Grey, Orange, Red, Silver, White, Yellow Post Pro : As manufactured Infill : 20%	<b>Quantity :</b> 1 <b>Per Unit :</b> \$6.19 <b>Set Up Cost :</b> \$6.85 <b>Min order price</b> \$17.13 <hr/> <b>Produced By :</b> November 14th 2018	<b>Pickup :</b> Yes United Kingdom, London  <b>Delivered :</b> No \$NaN
			<b>From</b> <b>\$17.13</b> <div style="background-color: green; color: white; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <b>ADD TO CART</b> </div>

Fonte: 3D Compare. Disponível em: <https://app.3dcompare.com/>. Acesso em 11/11/2018.

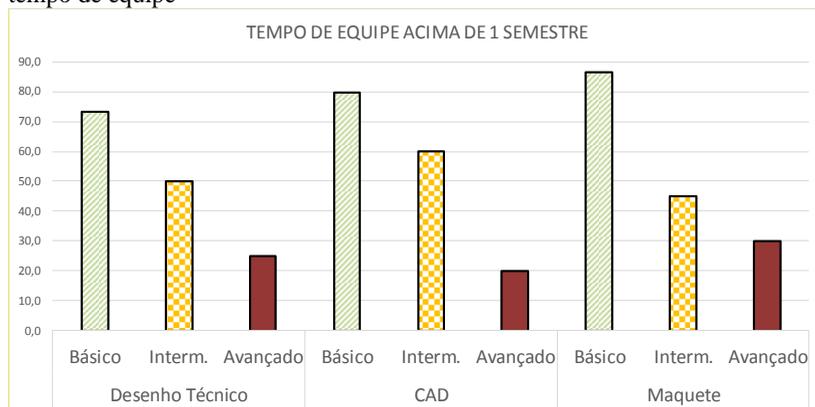
## ANEXO D – Avaliações sobre o sistema de transmissão do FSAE

Figura 72 - Evolução das notas médias da amostra dos integrantes com menos tempo de equipe



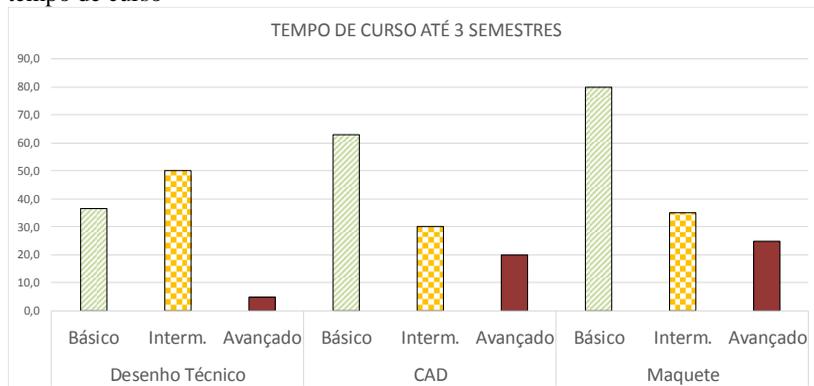
Fonte: Yoshida e Gonzaga (2018)

Figura 73 - Evolução das notas médias da amostra dos integrantes com mais tempo de equipe



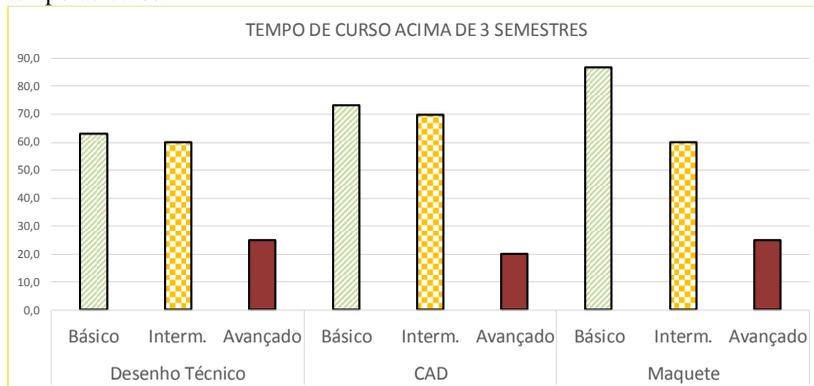
Fonte: Yoshida e Gonzaga (2018)

Figura 74 - Evolução das notas médias da amostra dos integrantes com menos tempo de curso



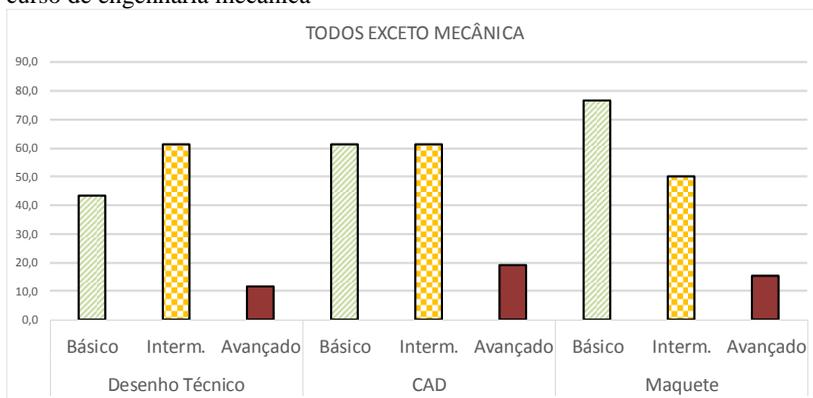
Fonte: Yoshida e Gonzaga (2018)

Figura 75 - Evolução das notas médias da amostra dos integrantes com mais tempo de curso



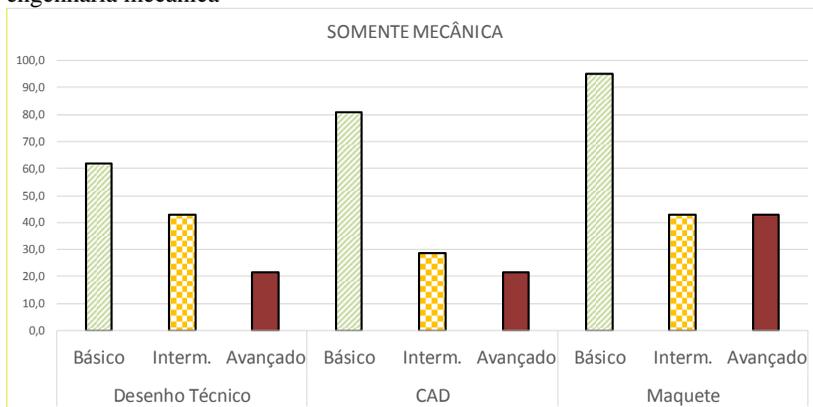
Fonte: Yoshida e Gonzaga (2018)

Figura 76 - Evolução das notas médias da amostra de integrantes exceto os do curso de engenharia mecânica



Fonte: Yoshida e Gonzaga (2018)

Figura 77 - Evolução das notas médias da amostra de integrantes do curso de engenharia mecânica



Fonte: Yoshida e Gonzaga (2018)

## ANEXO E – Avaliações sobre conceito de volante para o FSAE

Quadro 20 - Matriz de Pugh de avaliação dos modelos de volante.

REQUISITOS DO USUÁRIO	Pesos	PROTÓTIPO																	
		MDF 4			MDF 1			MDF 2			MDF 3			2016			IMPRESSO		
Posição da mão e dedos	5	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	-1
Firmeza movimento de mãos	5	0	0	0	-1	-1	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	-1	0	1	-1	0
Dimensões Gerais	3	0	0	0	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	-1
Facilidade retirada do veículo	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	-1	-1	0
Disponibilidade para botões	1	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	1
Disponibilidade de telas	1	0	0	0	-1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0
SOMATÓRIO PESO		0	0	0	-12	-15	-8	-10	-14	-8	-13	-13	-8	-13	-16	-3	4	-10	-7
<u>COLOCAÇÃO PESO</u>		<u>2º</u>	<u>1º</u>	<u>1º</u>	<u>4º</u>	<u>5º</u>	<u>4º</u>	<u>3º</u>	<u>4º</u>	<u>4º</u>	<u>5º</u>	<u>3º</u>	<u>4º</u>	<u>5º</u>	<u>6º</u>	<u>2º</u>	<u>1º</u>	<u>2º</u>	<u>3º</u>

Fonte: Yoshida e Gonzaga (2018)