

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE MATERIAIS

ADELE CAGNATO CONTE

**PROPOSTA DE DIRETRIZES DE PROJETO PARA MANUFATURA ADITIVA POR
EXTRUSÃO DE MATERIAL USANDO FILAMENTO COM CARGA METÁLICA**

CURITIBA

2025

ADELE CAGNATO CONTE

**PROPOSTA DE DIRETRIZES DE PROJETO PARA MANUFATURA ADITIVA POR
EXTRUSÃO DE MATERIAL USANDO FILAMENTO COM CARGA METÁLICA**

**GUIDELINES PROPOSAL OF DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING FOR
MATERIAL EXTRUSION PROCESS USING METAL-LOADED FILAMENT**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. José Aguiomar Foggiatto.

Coorientador: Prof. Dr. Josmael Roberto Kampa.

CURITIBA

2025



4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



ADELE CAGNATO CONTE

PROPOSTA DE DIRETRIZES DE PROJETO PARA MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL USANDO FILAMENTO COM CARGA METÁLICA

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Engenharia De Manufatura.

Data de aprovação: 14 de Julho de 2025

Dr. Jose Aguiomar Foggiatto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Alvaro Canto Michelotti, Doutorado - Zen S.A. Indústria Metalúrgica

Dr. Antonio Verguetz Silva, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Utfpr)

Dr. Neri Volpato, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 14/07/2025.

À minha esposa, Natália.
Aos meus pais, Edna e Leuris.
À minha avó, Marlise.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Natália Nogueira Porcides, dedico o meu mais profundo agradecimento. Você foi minha companheira incansável e meu refúgio nos momentos de exaustão. Sou imensamente grata por sua compreensão e apoio constante, especialmente nos períodos em que o lazer deu lugar à pesquisa. Sem sua presença e carinho, este trabalho não teria o mesmo sentido. Esta conquista também é sua.

À minha mãe e ao meu pai, Edna Adele Cagnato Conte e Leuris Luiz Conte, por serem o alicerce de tudo o que construí. Agradeço pelo amor incondicional e pelos valores que me transmitiram. Obrigada por estarem sempre ao meu lado celebrando cada vitória.

À minha avó, Marlise Lêda Cagnato, dedico um agradecimento póstumo. Embora não possa me ver com o diploma de mestre, sou eternamente grata por seu incentivo constante aos meus estudos — vindo de quem, mesmo tendo estudado apenas até a oitava série, compreendia o valor do conhecimento — e por ter aceitado participar com tanto carinho de um dos maiores trabalhos das disciplinas deste mestrado, submetendo-se a pisar em gesso gelado e a experimentar um par de chinelos pesados.

Ao meu irmão, avós, tios, primos, sogros e cunhados, agradeço pelo apoio genuíno, ainda que sem conhecer os detalhes técnicos desta pesquisa. Obrigada por respeitarem minhas ausências em diversas reuniões familiares e por proporcionarem os momentos de distração e leveza tão necessários. Aos meus cachorros, Pipoca, Sagu e Cocada, agradeço pelos valiosos momentos de "dogterapia".

Agradeço imensamente ao meu grande amigo Rodrigo Pulido Arce pela parceria, pelas inúmeras trocas de ideias, sugestões e questionamentos ao longo desta pesquisa e pela colaboração na elaboração do artigo sobre DfAM. Obrigada pela companhia nas viagens a Brusque, para conhecer a Zen S.A. em pleno Dia dos Namorados, e a Valinhos, para buscarmos peças na Up3D. Obrigada pelos almoços, pelas tardes de estudo com pausas estratégicas para cafuné no Jake e na Pipoca e pelos intervalos para reclamações. A construção da nossa amizade foi o melhor resultado de todo esse processo.

Ao Antonio Verguetz Silva, meu muito obrigada pelos estímulos e pelos momentos de inspiração proporcionados nas inúmeras discussões que tivemos. Seu olhar crítico e suas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

Aos meus amigos, além do Rodrigo e do Antonio, agradeço ao David Kretschek, à Yvi Tiemi Mori e ao Vinicius Peixoto Moraes. Obrigada pelas discussões sobre as peças sinterizadas e colapsadas, pela investigação minuciosa de causa e efeito, pelo apoio moral, generosidade e por todas as hipóteses compartilhadas. À Daphene

Marques Solis, por ser sempre uma inspiração e pelos conhecimentos compartilhados durante a construção do Trabalho de Conclusão de Curso; muitos daqueles aprendizados foram fundamentais para esta dissertação. À Paloma Hohmann Poier, agradeço a oportunidade de aprender sobre DfAM antes mesmo de iniciar as disciplinas da pós-graduação.

À Cris e ao Flávio Ulbrich, da Up3D, agradeço pelas peças fornecidas, por todo o suporte técnico e pelas discussões. Ao Pablo Medeiros de Souza e ao Douglas Charnaud, da TecnoMIM, agradeço pela primeira peça sinterizada desta pesquisa e por todo o suporte e informações sobre o processo. Estendo os agradecimentos ao Marcio Quintão, da Versolid, pela troca de ideias no início da pesquisa.

Ao meu orientador, José Aguiomar Foggiatto, agradeço pela oportunidade concedida, pela paciência e pelas discussões e revisões que nortearam este trabalho. Ao meu coorientador, Josmael Roberto Kampa, agradeço por ter aceitado este desafio após a qualificação, pelas provocações e contribuições cruciais sobre Design Science Research e pelas ferramentas sugeridas que enriqueceram esta pesquisa.

Agradeço aos meus colegas do NUFER que contribuíram para o bom andamento desta pesquisa, com um agradecimento especial ao Felipe Di Nisio pelo suporte. Estendo minha gratidão aos alunos de iniciação científica, Bruno Benegra Denadai e Iago Alexandre de Oliveira, pelo auxílio nas atividades laboratoriais, e ao André Luís Mion pela colaboração na elaboração do artigo sobre DfAM.

Agradeço à FUNTEF-PR pelo apoio financeiro para a aquisição da impressora e dos insumos necessários à realização deste estudo.

A sementeira é livre; a colheita é obrigatória.
(Caderno da Vovó Marlise, 2022)

RESUMO

CONTE, Adele Cagnato. **Proposta De Diretrizes De Projeto Para Manufatura Aditiva Por Extrusão De Material Usando Filamento Com Carga Metálica**. 2025. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2025.

Esta dissertação propõe diretrizes de Design para Manufatura Aditiva (DfAM) aplicadas ao processo de extrusão de material com carga metálica (metal MEX), focando na produção de peças com filamento carregado com aço inoxidável. Esse processo permite a fabricação de peças complexas com precisão e viabilidade econômica, sem necessidade de moldes ou ferramentas específicas. Hoje a literatura carece de diretrizes específicas para fabricação por MEX, que possui diversos desafios intrínsecos às etapas de *debinding* e sinterização (D&S) exigindo adaptações no projeto para garantir a integridade estrutural das peças. Assim, esta pesquisa foi conduzida com base no método Design Science Research (DSR) com o objetivo de consolidar o conhecimento já disponível em literatura e complementar as diretrizes com um estudo prático. O método contemplou a seleção de geometrias fornecidas por uma empresa parceira, o planejamento de processo, a fabricação, a realização dos processos de D&S, a posterior inspeção dos resultados para análise de falhas e a investigação de suas potenciais causas. O artefato desenvolvido, isto é, a proposta de diretrizes de DfAM para metal MEX, foi construído a partir da observação dos experimentos realizados, que são as peças fabricadas e inspecionadas, combinada com informações da literatura. Os resultados mostraram que a aplicação de diretrizes específicas pode auxiliar no processo de manufatura de peças por metal MEX reduzindo a quantidade de defeitos. O compilado de diretrizes propostas abrange recomendações de projeto e planejamento de processo, envolvendo avaliação de viabilidade, definição da orientação de impressão, uso de estruturas de suporte, adaptação de espessuras e arredondamento de cantos, além de considerações sobre escala, oferecendo um referencial técnico para profissionais interessados em explorar a tecnologia.

Palavras-chave: manufatura aditiva, impressão 3D, extrusão de material, Projeto para Manufatura Aditiva, aço inoxidável.

ABSTRACT

CONTE, Adele Cagnato. **Guidelines Proposal Of Design For Additive Manufacturing For Material Extrusion Process Using Metal-Loaded Filament.** 2025. 160p. Dissertation (Master's in Engineering) – Federal University of Technology – Parana, Curitiba, 2025.

This dissertation proposes Design for Additive Manufacturing (DfAM) guidelines applied to the material extrusion process with metal-loaded filaments (metal MEX), focusing on the production of stainless steel parts. This process enables the fabrication of complex parts with precision and economic viability, without the need for molds or specific tooling. Currently, the literature lacks specific guidelines for the MEX process, which presents several intrinsic challenges related to the debinding and sintering (D&S) stages, requiring design adaptations to ensure the structural integrity of the parts. Therefore, this research was conducted using the Design Science Research (DSR) method with the goal of consolidating the existing knowledge in the literature and complementing the guidelines with a practical study. The method included the selection of geometries provided by a partner company, process planning, manufacturing, execution of D&S processes, subsequent inspection of the results for failure analysis, and investigation of potential causes. The developed artifact — namely, the proposed DfAM guidelines for metal MEX — was built from the observation of the manufacturing experiments, which are the parts produced and inspected, combined with insights from literature. The results showed that applying specific guidelines can support the manufacturing process of parts via metal MEX by reducing the number of defects. The compiled set of proposed guidelines includes design and process planning recommendations, covering feasibility assessment, definition of print orientation, use of support structures, adaptation of wall thicknesses, and rounding of corners, as well as scale considerations. These serve as a technical reference for professionals interested in exploring the technology, while also highlighting the inherent challenges of the process.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, material extrusion, Design for Additive Manufacturing, stainless steel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Etapas do processo e do planejamento de processo da AM	25
Figura 2. Etapas do processo e do planejamento de processo da AM	26
Figura 3. Parâmetros de processo da AM por MEX	27
Figura 4. Diferença entre <i>skirt</i> , <i>brim</i> e <i>raft</i>	30
Figura 5. Exemplo de impressão com suporte	31
Figura 6. Publicações sobre metal MEX.....	32
Figura 7. Exemplo de utilização do Ultrafuse® Support Layer da BASF	35
Figura 8. Etapas do processo de MEX com carga metálica	36
Figura 9. Processo de sinterização	39
Figura 10. Níveis diferentes de adaptação do design para tecnologias de AM	43
Figura 11. Estratégia para reduzir dispersão em processos de MEX com DfAM.....	44
Figura 12. Processo de definição da orientação da peça nas fases iniciais do projeto.....	52
Figura 13. Impacto no projeto da peça após o estudo de orientação para AM	53
Figura 14. Etapas de condução da DSR e saídas correspondentes	64
Figura 15. Fluxograma do trabalho de acordo com a abordagem metodológica do DSR.....	70
Figura 16. Exemplo de núcleo de impressão da Ultimaker.....	71
Figura 17. Condições de contorno do Modelo A	78
Figura 18. Condições de contorno dos Modelos B, C e D	78
Figura 19. Condições de contorno do Modelo E	78
Figura 20. Modelos selecionados lado a lado para visualização de proporção	79
Figura 21. Peças selecionadas impressas em polímero.....	79
Figura 22. Monitoramento remoto sem possibilidade de intervenção remota	85
Figura 23. Monitoramento remoto com possibilidade de intervenção remota	86
Figura 24. Fluxograma das atividades realizadas pela empresa parceira.....	87
Figura 25. Peça A1 com 100% de preenchimento em estado verde	92
Figura 26. Peça A2 com 100% de preenchimento em estado verde	92
Figura 27. Peça B com 60% de preenchimento em estado verde	93
Figura 28. Peça C com 60% de preenchimento em estado verde	93
Figura 29. Peças D1 e D2 com 100% de preenchimento em estado verde	94
Figura 30. Peça E com 60% de preenchimento em estado verde	94
Figura 31. Peças entrando no processo de <i>debinding</i>	97
Figura 32. Peças A1 e A2 com 60 e 100% de preenchimento após o processo de <i>debinding</i>	97
Figura 33. Peças B e D1 e D2 com 60 e 100% de preenchimento após o processo de <i>debinding</i>	98
Figura 34. Peça C após o processo de <i>debinding</i>	98
Figura 35. Peça E após o processo de <i>debinding</i>	98
Figura 36. Peça C com fácil desintegração após o <i>debinding</i>	100

Figura 37. Peças B, E e D1 e D2 entrando no forno de sinterização	101
Figura 38. Peças A1 e A2 logo após a sinterização	102
Figura 39. Peças B, E e D1 e D2 logo após a sinterização.....	102
Figura 40. Identificação das vistas das peças sinterizadas	103
Figura 41. Peça metálica A1 com 60% de preenchimento	104
Figura 42. Peça metálica A1 com 100% de preenchimento	104
Figura 43. Peça metálica A2 com 60% de preenchimento	105
Figura 44. Peça metálica A2 com 100% de preenchimento	105
Figura 45. Peça metálica B com 60% de preenchimento	105
Figura 46. Peças metálicas D1 e D2 com 60% de preenchimento	106
Figura 47. Peças metálicas D1 e D2 com 100% de preenchimento	107
Figura 48. Peça metálica E com 60% de preenchimento	108
Figura 49. Investigação de causa e efeito.....	111
Figura 50. Opiniões sobre a proposta de diretrizes captadas pelo questionário.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados sobre contração de peças fabricadas por metal MEX.	35
Tabela 2. Estimativas de tempo e massa por peça	83
Tabela 3. Estimativas custo de matéria-prima por peça	84
Tabela 4. Massa das peças impressas em estado verde	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Direção de construção e efeitos na resistência da peça.	28
Quadro 2. Materiais comercialmente disponíveis atualmente para metal MEX	34
Quadro 3. Compilado de diretrizes da literatura que podem ser aplicadas para MEX.....	45
Quadro 4. Diretrizes de Djokikj e Kandikjan (2022)	48
Quadro 5. Diretrizes de Diegel <i>et al.</i> (2020).....	50
Quadro 6. Diretrizes de Leutenecker-Twelsiek <i>et al.</i> (2016).....	53
Quadro 7. Diretrizes de Asadollahi-Yazdi <i>et al.</i> (2017)	54
Quadro 8. Diretrizes de Adam e Zimmer (2012, 2014 e 2015)	56
Quadro 9. Diretrizes da BASF Forward AM (2025)	58
Quadro 10. Diretrizes da Markforged (2025)	61
Quadro 11. Métodos para avaliação dos artefatos	66
Quadro 12. Tipos de artefatos previstos pela DSR	68
Quadro 13. Materiais e programas de computador utilizados	71
Quadro 14. Tipos de núcleos de impressão e materiais compatíveis	72
Quadro 15. Geometrias pré-selecionadas em conjunto com a empresa parceira	76
Quadro 16. Peças selecionadas e novas denominações.....	76
Quadro 17. Seleção das geometrias a serem estudadas.....	77
Quadro 18. Modelos originais e modificações para primeiro lote do estudo	81
Quadro 19. Quadro padronizado para resumo das diretrizes.	89
Quadro 20. Empenamento das peças em estado verde	95
Quadro 21. Referências de cada diretriz proposta	113
Quadro 22. Diretriz n° 1.....	115
Quadro 23. Diretriz n° 2.....	117
Quadro 24. Diretriz n° 3.....	118
Quadro 25. Diretriz n° 4.....	120
Quadro 26. Diretriz n° 5.....	123
Quadro 27. Diretriz n° 6.....	125
Quadro 28. Diretriz n° 7.....	127
Quadro 29. Diretriz n° 8.....	128
Quadro 30. Diretriz n° 9.....	130
Quadro 31. Diretriz n° 10.....	131
Quadro 32. Diretriz n° 11.....	131
Quadro 33. Diretriz n° 12.....	132
Quadro 34. Diretriz n° 13.....	133
Quadro 35. Diretriz n° 14.....	135
Quadro 36. Diretriz n° 15.....	137
Quadro 37. Diretriz n° 16.....	139

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AM	Manufatura Aditiva (<i>Additive Manufacturing</i>)
BJT	Jateamento de aglutinante (<i>Binder Jetting</i>)
D&S	<i>Debinding (debinding)</i> e sinterização (<i>sintering</i>)
DED	Deposição com energia direcionada (<i>Directed Energy Deposition</i>)
DfAM	Design para Manufatura Aditiva (<i>Design for Additive Manufacturing</i>)
DfMA	Design para Manufatura e Montagem (<i>Design for Manufacturing and Assembly</i>)
DfM	Design para Manufatura (<i>Design for Manufacturing</i>)
DfX	Design para X (<i>Design for X</i>)
DSR	Pesquisa Científica em Design (<i>Design Science Research</i>)
Metal MEX	Extrusão de material com carga metálica (<i>Material Extrusion of Metal</i>)
MEX	Extrusão de material (<i>Material Extrusion</i>)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MJT	Jateamento de Material (<i>Material Jetting</i>)
NUFER	Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental
PBF	Fusão em leito de pó (<i>Powder Bed Fusion</i>)
PLA	Poliácido láctico
POM	Polióxido de metileno ou Poliacetal
PP	Polipropileno
PPP	Programa de Planejamento de Processo
RP	Prototipagem Rápida (<i>Rapid Prototyping</i>)
SDR	Regras Específicas de Design (<i>Specific Design Rules</i>)

- SHL Adição de lâminas (*Sheet Lamination*)
- SFF Fabricação de Forma Livre (*Solid Freeform Fabrication*)
- TO Otimização topológica (*Topology Optimization*)
- UTFPR Universidade Tecnológica Federal do Paraná
- VPP Fotopolimerização em cuba (*Vat PhotoPolymerization*)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Oportunidade de pesquisa	20
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
1.3 Justificativa	21
1.4 Abordagem metodológica	22
1.5 Estrutura do trabalho	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 Manufatura Aditiva	24
2.2 Manufatura aditiva por extrusão de material	26
2.2.1 Orientação, posicionamento e escala.....	27
2.2.2 Base e estruturas de suporte	29
2.3 Manufatura aditiva por extrusão de material com carga metálica	31
2.4 <i>Debinding</i> e Sinterização	36
2.5 Design para Manufatura Aditiva	40
2.5.1 Djokikj e Kandikjan (2022).....	46
2.5.2 Diegel <i>et al.</i> (2020)	49
2.5.3 Leutenecker-Twelsiek <i>et al.</i> (2016)	51
2.5.4 Asadollahi-Yazdi <i>et al.</i> (2017).....	54
2.5.5 Adam e Zimmer (2014, 2015); Zimmer e Adam (2012).....	55
2.5.6 BASF Forward AM (2025)	57
2.5.7 Markforged (2025).....	60
2.6 Design Science Research	63
2.7 Considerações sobre a revisão bibliográfica	68
3 MATERIAIS E MÉTODOS	69
3.1 Equipamentos, materiais e ferramentas	69
3.1.1 Filamento BASF Ultrafuse® 17-4PH	73
3.1.2 Filamento BASF Ultrafuse® Support Layer	74
3.2 Etapa 1 do DSR: Conscientização do problema	74
3.3 Etapa 2 do DSR: Sugestão	74

3.3.1 Seleção das geometrias da empresa parceira	75
3.3.2 Planejamento do processo	82
3.3.3 Fabricação das geometrias (impressão e D&S)	85
3.3.4. Inspeção das peças	87
3.4 Etapa 3 do DSR: Desenvolvimento	88
3.5 Etapa 4 do DSR: Avaliação.....	89
3.6 Etapa 5 do DSR: Conclusão	90
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
4.1 Etapa 2: As tentativas	91
4.2 Etapa 3: O artefato	112
4.2.1 Diretriz n° 1 – Selecionar o processo de fabricação adequado	114
4.2.2 Diretriz n° 2 – Avaliar a viabilidade para fazer <i>debinding</i> e sinterização	115
4.2.3 Diretriz n° 3 – Definir a orientação da peça na plataforma de construção.....	117
4.2.4 Diretriz n° 4 – Evitar de transições abruptas de espessura e seção transversal/longitudinal.....	119
4.2.5 Diretriz n° 5 – Minimizar concentrações de massa de material e materiais de suporte	121
4.2.6 Diretriz n° 6 – Assegurar estabilidade estrutural das geometrias para <i>debinding</i>	123
4.2.7 Diretriz n° 7 – Arredondar os cantos vivos	125
4.2.8 Diretriz n° 8 – Adaptar as geometrias circulares	127
4.2.9 Diretriz n° 9 – Considerar a correlação entre parâmetros de projeto	128
4.2.10 Diretriz n° 10 – Evitar estruturas que não atendam a relação máxima recomendada entre altura e largura	130
4.2.11 Diretriz n° 11 – Evitar paredes sem suporte que não atendam a relação máxima recomendada entre altura e largura.....	131
4.2.12 Diretriz n° 12 – Evitar paredes com espessura menor que a recomendada.	132
4.2.13 Diretriz n° 13 – Agregar funcionalidades relacionadas à aparência	132
4.2.14 Diretriz n° 14 – Definir o preenchimento da peça	134
4.2.15 Diretriz n° 15 – Atentar à contração da peça após <i>debinding</i> e sinterização	136
4.2.16 Diretriz n° 16 – Atentar às estruturas da peça ao aplicar fatores de escala .	138
4.3 Etapa 4: As medidas de desempenho	139
4.4 Etapa 5: Os resultados.....	141

4.5 Discussões	142
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	Erro! Indicador não definido.
5.1 Conclusões	146
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	148
REFERÊNCIAS.....	150
ANEXO A – FICHA TÉCNICA BASF ULTRAFUSE® 17-4PH.....	154
ANEXO B – FICHA TÉCNICA BASF ULTRAFUSE® SUPPORT LAYER.....	157
ANEXO C – PERFIS DE IMPRESSÃO PARA FILAMENTOS ULTRAFUSE®	159
ANEXO D – PERFIL ULTIMAKER CURA METAL MEX UTILIZADO.....	160

1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (AM - *Additive Manufacturing*), também conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia em expansão nas últimas décadas. Desde o primeiro uso comercial em 1987 com a estereolitografia até os dias de hoje foi percebida uma grande evolução (WOHLERS; GORNET, 2016).

Diversas tecnologias com diferentes processos foram desenvolvidas desde então. Entre elas, a tecnologia de extrusão de material (MEX - *material extrusion*) com polímeros foi bastante difundida por conta do desenvolvimento de impressoras 3D de código aberto e baixo custo após a patente da tecnologia de extrusão de material (MEX) da Stratasys (FDM - *Fused Deposition Modeling*) expirar em 2009.

Possivelmente os lançamentos da solução Metal X™ da Markforged em 2017 (3D Printing Media Network, 2017) e do material Ultrafuse® 316L da BASF em 2019 (3D Printing Media Network, 2019), combinados com a percepção das aplicações que podem se beneficiar da MEX com cargas metálicas (metal MEX - *material extrusion of metal*) e de seu custo mais baixo em comparação com soluções fechadas, contribuíram para o retorno dos estudos sobre a fabricação de peças em metal baseada nessa tecnologia. Isso porque alguns autores, como, Wu *et al.* (2002), Masood e Song (2004; 2005), Bandyopadhyay *et al.* (2006) e Mireles *et al.* (2012), anos antes pesquisaram tecnologias de manufatura aditiva por extrusão de material, ou similares, com carga metálica.

Dentre as aplicações da tecnologia de MEX com cargas metálicas estão dispositivos de construção e fixação, mandris de eletrodeposição, moldes de encapsulamento, matrizes, aplicações de adesão de eletrônica e circuitos tridimensionais (MIRELES *et al.*, 2012).

Ademais, propriedades mecânicas das peças fabricadas são desafiadoras não apenas em processos de MEX, mas na maioria dos processos de AM de metal. Assim, muitos pesquisadores focam em estudar as propriedades mecânicas e térmicas de peças de metal fabricadas por AM (YAKOUT *et al.*, 2018).

Além dos desafios técnicos, os obstáculos financeiros são significativos com relação a materiais metálicos específicos para AM.

1.1 Oportunidade de pesquisa

A MEX foi patenteada, sob a denominação FDM, em 1989 por Scott Crump, fundador da Stratasys (SU; AL'AREF, 2018). O uso de materiais metálicos em tecnologias com conceito similar à MEX foi inicialmente registrado pelo artigo de Greulich *et al.* (1995).

Possivelmente os lançamentos de materiais com carga metálica não proprietários têm contribuído com a divulgação da tecnologia associada a esse tipo de material, assim como ocorreu o movimento de disseminação da tecnologia de MEX após a patente da Stratasys expirar em 2009.

No entanto, o acesso e uso facilitados aos materiais para metal MEX podem não ser suficientes para uma propagação eficiente da tecnologia associada aos materiais com carga metálica.

Na MEX de polímeros, após a impressão a peça está pronta para o, nem sempre necessário, pós-processamento. A metal MEX exige que sejam realizados os processos de *debinding* e sinterização (D&S) após a impressão para a obtenção de uma peça metálica (BASF FORWARD AM, 2025).

No entanto, deve-se considerar as características e o comportamento dos materiais metálicos durante as três etapas do processo de metal MEX – impressão 3D, *debinding* e sinterização - a fim de obter-se uma peça metálica com resistência, durabilidade e adequação ao propósito para o qual foi projetada.

Além disso, o projeto das peças adaptado para a manufatura aditiva por extrusão especificamente de materiais com cargas metálicas - isto é, o DfAM para metal MEX - é uma etapa anterior à impressão, que pode impactar de forma positiva a peça resultante após o D&S.

Alguns autores, como Zimmer e Adam (2012), Adam e Zimmer (2014, 2015), Leutenecker-Twelsiek *et al.* (2016), Asadollahi-Yazdi *et al.* (2016, 2017), Diegel *et al.* (2020) e Djokikj e Kandikjan (2022), escreveram sobre DfAM para MEX. No entanto, ainda há um hiato na literatura com relação a DfAM para metal MEX.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é desenvolver e prescrever uma proposta de diretrizes de Design para Manufatura Aditiva para extrusão de material com carga metálica, estudando especificamente o projeto de peças em aço inoxidável 17-4PH, a fim de tornar a aplicação de materiais metálicos mais assertiva.

1.2.2 Objetivos específicos

Conforme os princípios teóricos delineados na literatura, foram estabelecidas etapas a serem cumpridas para atingir o objetivo geral proposto. Nesse sentido, foram delimitados os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar um levantamento de diretrizes de Design para Manufatura Aditiva para extrusão de material da bibliografia e dos fabricantes de filamentos com cargas metálicas;
- b) Usar modelos tridimensionais de demanda de uma empresa parceira, aproveitando o financiamento dos custos da pesquisa, para fabricar geometrias por extrusão de material com cargas metálicas e buscar extrair lições delas, sejam inéditas ou por aderência às diretrizes de outros autores;
- c) Avaliar as peças metálicas (depois de sinterizadas) por inspeção visual e realizar uma análise de causa e efeito acerca das falhas;
- d) Definir as diretrizes de projeto a serem propostas para Design para Manufatura Aditiva para extrusão de material com cargas metálicas consideradas adequadas para o material escolhido para o estudo com base nos experimentos realizados e nas referências levantadas.

1.3 Justificativa

Este trabalho pretende contribuir para a ampliação do conhecimento acerca do processo de AM por metal MEX, que ainda é escasso quando comparado ao do MEX de polímeros. Os custos envolvidos na fabricação de peças metálicas por MEX é alto e deve-se considerar não apenas os custos da matéria-prima, mas também de

mão de obra especializada para modelagem e impressão das peças e custos de empresas específicas que fornecem serviços de *debinding* e sinterização.

Em particular, ao divulgar uma proposta de diretrizes a serem utilizadas durante o projeto de peças metálicas especificamente para MEX, procura-se fornecer um referencial para auxiliar aos profissionais a adentrar e explorar a tecnologia de MEX para a produção de peças metálicas, reduzindo incertezas e atenuando riscos financeiros associados à sua implementação.

Este conhecimento tem o potencial de ser utilizado em áreas que fazem uso de materiais metálicos, que necessitam de um processo de fabricação eficiente para obtenção de componentes com geometrias complexas, especialmente em baixas quantidades, como, por exemplo, componentes personalizados, empresas com muitas variantes de componentes e itens de reposição de componentes já descontinuados.

1.4 Abordagem metodológica

Esta pesquisa adota a Design Science Research (DSR) como abordagem metodológica para auxiliar o cumprimento dos objetivos propostos por sua capacidade de unir a criação de soluções práticas com o desenvolvimento de conhecimento aplicável. A DSR busca resolver problemas reais por meio do design e validação de artefatos inovadores, em um processo que equilibra relevância prática e consistência teórica. Essa abordagem é especialmente adequada quando se pretende gerar contribuições estruturadas para o campo científico.

A estrutura metodológica da DSR envolve cinco etapas principais: conscientização do problema, sugestão de soluções, desenvolvimento do artefato, avaliação e conclusão. Cada etapa é acompanhada de entregas específicas e permite o refinamento contínuo da solução, com foco tanto na eficácia prática quanto na clareza metodológica. Essa abordagem permite que o artefato desenvolvido nesta pesquisa seja avaliado e aplicado a uma classe de problemas similares, ampliando o impacto e a aplicabilidade dos resultados obtidos.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos convergindo às etapas do método escolhido. Por se tratar de um estudo que busca prescrever um artefato no contexto do processo de desenvolvimento de novos produtos, este trabalho se caracteriza como aderente à ciência do artificial – algo que é criado – e, assim, ao Design Science Research (DSR). O primeiro capítulo apresenta a introdução, na qual são apresentadas a motivação, a oportunidade de pesquisa, os objetivos geral e específicos, além da justificativa para a realização do estudo e abordagem metodológica. No segundo capítulo, é realizada uma revisão bibliográfica abrangente sobre AM e o processo de MEX, incluindo uma análise detalhada sobre o uso de materiais com carga metálica, os processos de D&S, os princípios de DfAM e a abordagem metodológica. O terceiro capítulo descreve os materiais e métodos utilizados, apresentando os filamentos e equipamentos empregados, bem como as etapas do método escolhido, que englobam desde a seleção das geometrias e planejamento do processo até a impressão, D&S e inspeção das peças fabricadas. No quarto capítulo, são expostos os resultados obtidos durante o estudo, com as saídas das etapas do método escolhido, isto é, as tentativas com os respectivos dados de inspeção, a avaliação do artefato desenvolvido como medida de desempenho e seus resultados, seguidas por uma seção com discussões. Por fim, o capítulo cinco traz as considerações finais, com a síntese dos principais resultados, a contribuição do estudo para o campo de DfAM para metal MEX, e sugestões para trabalhos futuros. A estrutura é complementada por referências bibliográficas, apêndices que detalham investigações e as diretrizes propostas e anexos contendo informações técnicas sobre os materiais e equipamentos utilizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão de literatura acerca dos temas abordados por este estudo, sendo eles: AM por MEX, materiais para metal MEX, materiais utilizados como matriz para as cargas metálicas, D&S e DfAM.

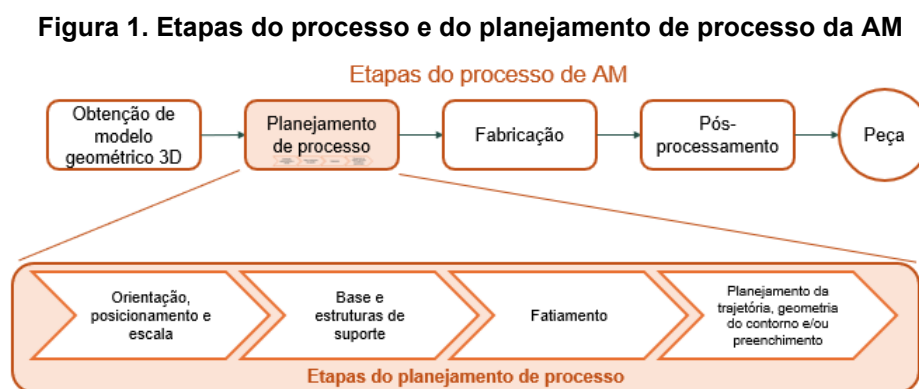
2.1 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva (AM), amplamente conhecida como impressão 3D, é definida pela norma ISO/ASTM 52900:2015 como tecnologias de obtenção de modelos físicos 3D partindo da adição de material comumente realizada pelo empilhamento de camadas.

As tecnologias de AM são classificadas conforme a norma supracitada pela similaridade de processamento:

- Jateamento de aglutinante (BJT - *Binder Jetting*): processo em que o líquido aglutinante é depositado seletivamente para unir materiais em pó;
- Deposição com energia direcionada (DED - *Direct Energy Deposition*): processo em que uma energia térmica focada é usada para fundir materiais conforme são depositados;
- Extrusão de material (MEX - *Material Extrusion*, como já mencionado): processo em que o material é depositado seletivamente por meio de um bico ou orifício;
- Jateamento de material (MJT - *Material Jetting*): processo em que gotículas de material são depositadas seletivamente;
- Fusão de leito de pó (PBF - *Powder Bed Fusion*): processo em que energia térmica funde regiões de um leito de pó de forma seletiva;
- Adição de lâminas (SHL - *Sheet Lamination*): processo em que lâminas de material são unidas para formar um objeto;
- Fotopolimerização em cuba (VPP - *Vat PhotoPolymerization*): processo em que o fotopolímero líquido é curado seletivamente em uma cuba por polimerização ativada por luz.

Com relação ao planejamento de processo da AM, geralmente estão envolvidas as etapas que influenciam a fabricação final da peça, seu acabamento e desempenho na aplicação. A Figura 1 mostra as etapas do processo de AM e as etapas do planejamento de processo.



Fonte: Adaptado de Volpato e Silva (2017).

Existem diversos processos de AM, mas, de acordo com Redwood *et al.* (2017), o processo geral do modelo até a peça final consiste em algumas etapas similares independente da tecnologia utilizada. Inicia-se pela produção do modelo 3D, comumente com o auxílio do CAD (*Computer Aided Design* – projeto feito no computador), ou mesmo utilizando-se da engenharia reversa para escanear uma peça. Na sequência, o modelo CAD é convertido para um formato que um programa de planejamento de processo (PPP) pode interpretar. O formato STL (*STereoLithography*) é o mais utilizado.

Uma vez que o arquivo foi criado, é necessário importá-lo para o PPP de AM - comumente chamado de fatiador. Nessa etapa do processo o programa permitirá que o usuário da impressora defina parâmetros de construção da peça como localização dos suportes, altura de camada, orientação da peça, entre outros, para então converter o arquivo para um código de máquina (seja formato G-code ou outros) (REDWOOD *et al.*, 2017).

Com o arquivo G-code pronto, pode-se dar sequência à impressão e então à remoção da peça impressa da plataforma de construção da impressora. Para alguns processos a remoção da impressão deve ser bastante precisa, uma vez que a peça pode estar envolta por suporte ou presa à plataforma de construção.

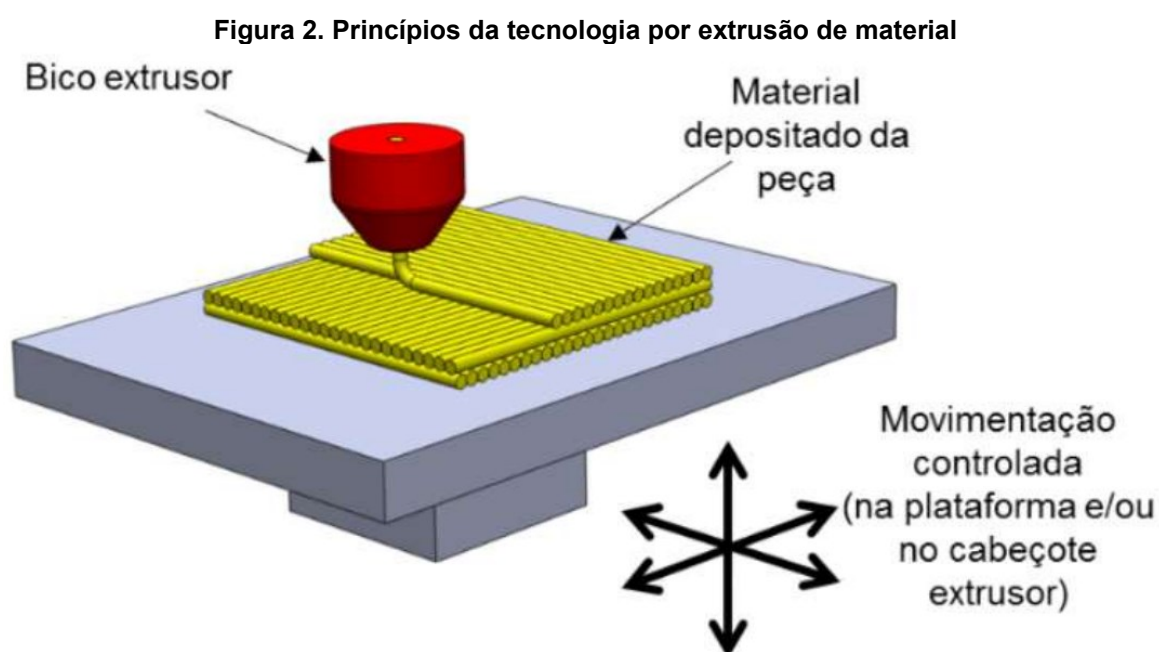
Os procedimentos de pós-processamento também variam dependendo da tecnologia utilizada. Algumas tecnologias requerem um período de cura antes do manuseio, enquanto outras permitem que as peças sejam manipuladas imediatamente. Além disso, para tecnologias que utilizam suporte, ele também é removido nessa etapa (REDWOOD *et al.*, 2017).

2.2 Manufatura aditiva por extrusão de material

A manufatura aditiva baseada na tecnologia por extrusão de material (MEX) polimérico é uma das escolhas mais comuns durante as primeiras etapas de desenvolvimento nos projetos de produtos na indústria atualmente.

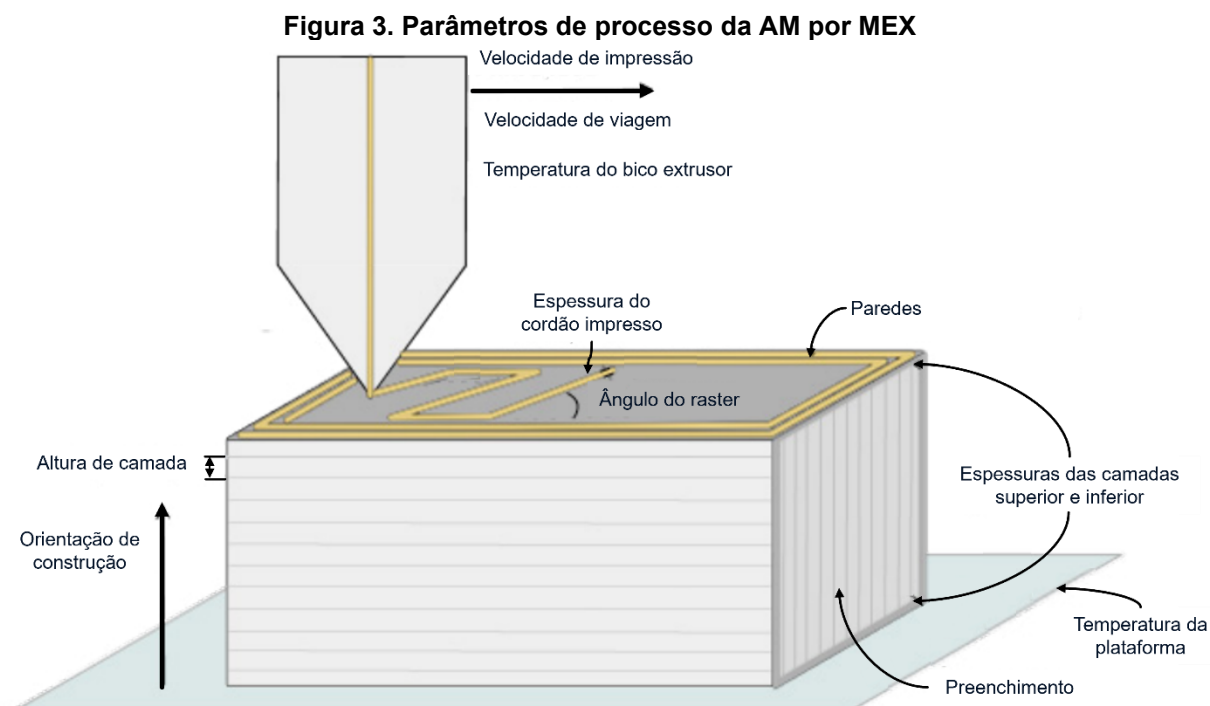
Segundo Redwood *et al.* (2017), um rolo com filamento é posicionado na impressora e alimenta um cabeçote extrusor. De acordo com Volpato (2017), os processos que se enquadram no grupo de AM por MEX depositam o material na forma de um filamento com redução de seu diâmetro após sua extrusão por um bico calibrado.

Para obtenção da geometria de cada camada, o cabeçote extrusor é normalmente montado sobre um sistema com controle de movimentos no plano X-Y, como mostrado na Figura 2 (VOLPATO, 2017).



Fonte: Volpato (2017).

A MEX apresenta algumas peculiaridades com relação principalmente à orientação, posicionamento, base, estruturas de suporte, planejamento de trajetória. Como é um processo que permite que o usuário controle uma quantidade considerável de parâmetros de manufatura, com alguns representados na Figura 3, resulta-se em um espaço de solução multidimensional (GOUDSWAARD *et al.*, 2019).



Fonte: Adaptado de Goudswaard *et al.* (2019).

As seções subsequentes apresentam um aprofundamento dos conceitos de orientação, posicionamento, escala, estruturas de base e de suporte, uma vez que influenciam e estão presentes na proposta de diretrizes deste estudo. Pressupõe-se conhecimento prévio de conceitos como formato de arquivo, planejamento de trajetória, fatiamento em AM e torres de sacrifício.

2.2.1 Orientação, posicionamento e escala

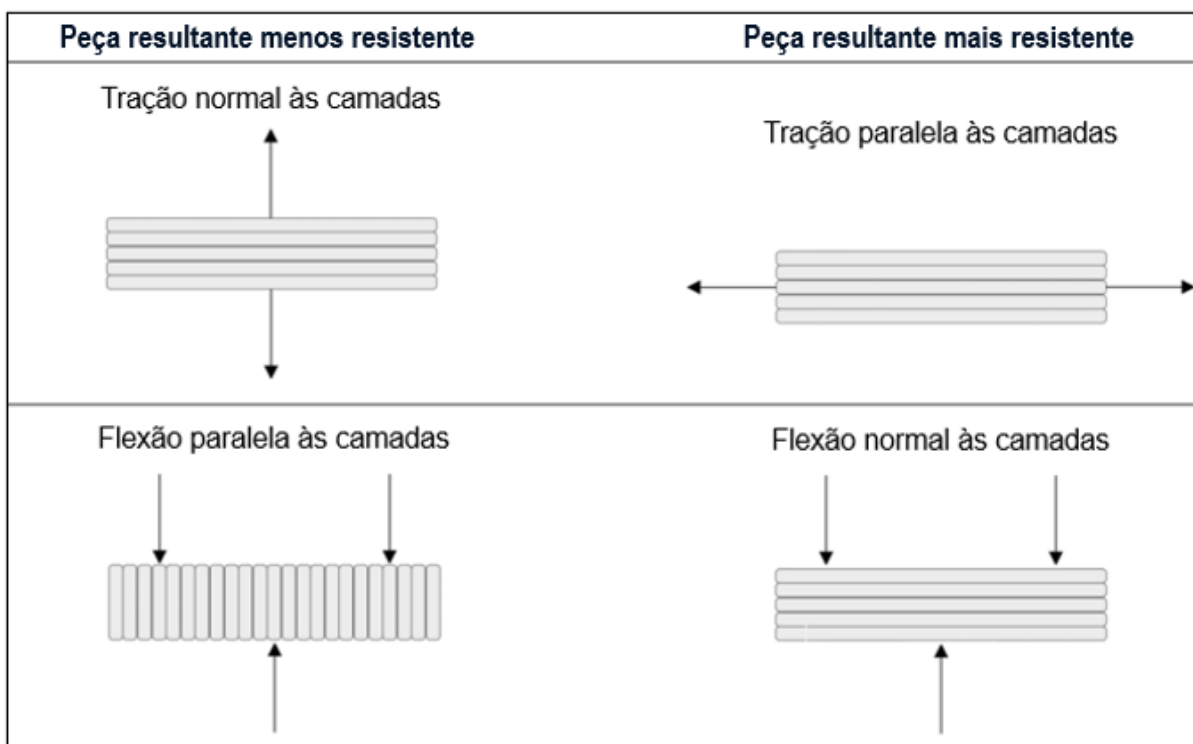
Considerando o processo de manufatura de camada por camada, ressalta-se que existe uma diferença entre a geometria da peça na direção de construção (geralmente a direção Z do sistema de coordenada da máquina) e a geometria ortogonal à direção de construção. A geometria da direção ortogonal é produzida

praticamente de forma contínua, enquanto a produção da geometria na direção Z ocorre de forma descontínua em passos discretos de uma camada de espessura constante (LEUTENECKER-TWELSIEK *et al.*, 2016).

Devido à essa característica anisotrópica inerente aos processos de MEX, é importante posicionar o modelo na orientação correta para obtenção do melhor desempenho mecânico possível, se for o atributo desejado para a peça (LOH *et al.*, 2020). Por exemplo, peças em ABS fabricadas por MEX testadas perpendicularmente às camadas tiveram apenas entre 74 e 79% da resistência à tração das peças testadas ao longo das camadas. Isso se deve à geometria ovalada dos filetes das camadas não contribuir para uma grande superfície de adesão entre elas e à solda fria entre as camadas ocasionar uma junção mais fraca entre elas (RANEY *et al.*, 2017; REDWOOD *et al.*, 2017).

Dessa forma, a resistência à tração quando a carga é aplicada perpendicularmente à direção de deposição é maior, como mostrado no Quadro 1.

Quadro 1. Direção de construção e efeitos na resistência da peça.



Fonte: Adaptada de Loh *et al.* (2020).

Além das consequências manifestadas na resistência mecânica, a orientação definida para fabricação das peças influencia também o efeito degrau de escada, o tempo de fabricação (quanto mais camadas, geralmente maior o tempo despendido para fabricar uma peça), a necessidade de estruturas de suporte, a variação dimensional e o empenamento.

Com relação ao empenamento, Redwood *et al.* (2017) afirmam que esse fenômeno ocorre devido ao diferencial de resfriamento. Seções diferentes da impressão resfriam a diferentes taxas, contraem e encolhem, puxando as regiões próximas, criando tensões internas que podem acarretar empenamentos ou distorções. É importante uma plataforma de construção aquecida e uma boa adesão a ela para uma eficiente ancoragem, limitando a probabilidade de ocorrer empenamentos ou distorções.

Com relação ao posicionamento das peças no volume de construção, de maneira geral, quanto maior o número de peças fabricadas no mesmo lote, menor o custo unitário das peças. No entanto, a tecnologia de MEX permite a distribuição das peças apenas no plano 2D, ou seja, permite apenas uma camada de peças, sem empacotamento das peças no espaço 3D (VOLPATO, 2017).

Já com relação à escala, os PPPs geralmente oferecem a possibilidade de utilizar o recurso sem a necessidade de alteração do modelo 3D. No entanto, recomenda-se aplicar escala com cautela, pois as peças podem ser modificadas equivocadamente em pontos inicialmente negligenciados, o que pode resultar em complicações durante a manufatura ou mesmo no processo de montagem.

2.2.2 Base e estruturas de suporte

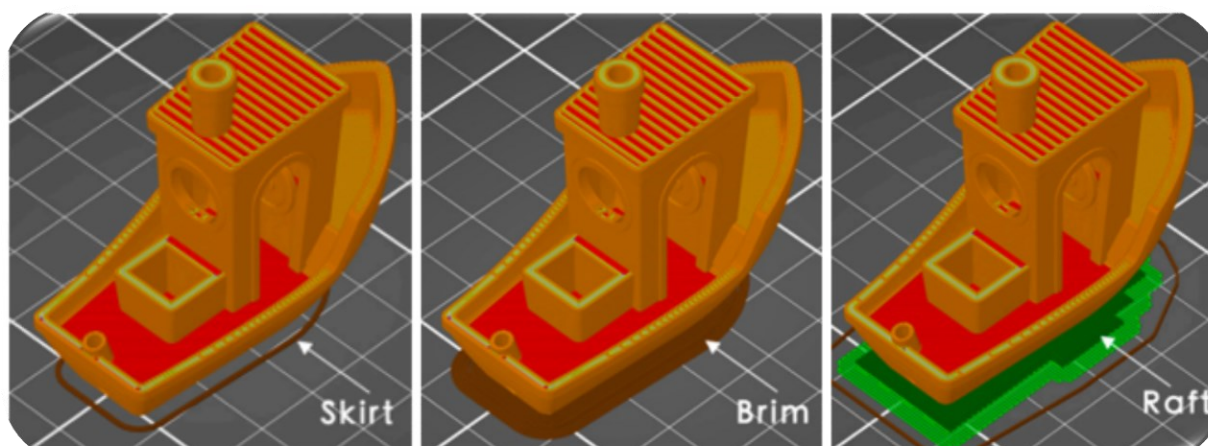
A tecnologia de MEX é uma das que precisa depositar material adicional além do volume da peça para atuar como base e/ou estruturas de suporte (VOLPATO, 2017).

Dentre as funções principais da base estão a adesão da peça à plataforma de construção para evitar empenamento por contração do material, evitar danos à peça durante sua remoção da plataforma e compensar desnivelamentos ou não planicidades da superfície da plataforma de construção (VOLPATO, 2017).

As alternativas mais utilizadas como parâmetros de base na MEX são *skirt*, *brim* e *raft* – que em português significam respectivamente saia, aba e base – (LOH *et al.*, 2020), como mostra a Figura 4:

- *Skirt*: é composta por algumas camadas do contorno da peça a uma certa distância da peça e é usada para preparar e purgar a extrusora antes da impressão e para verificar se o nivelamento da plataforma de construção está adequado.
- *Brim*: é composta por algumas camadas do contorno da peça conectadas à peça e é empregada para preparar a extrusora antes da impressão, aumentar a superfície da primeira camada e promover melhor adesão das bordas da peça na mesa evitando empenamento.
- *Raft*: é composta por uma quantidade pré-determinada de camadas com uma porcentagem de preenchimento ajustável que tem como função estabilizar a peça com pouca área de contato com a plataforma de construção propiciando melhor adesão e reduzindo empenamento e delaminação.

Figura 4. Diferença entre *skirt*, *brim* e *raft*



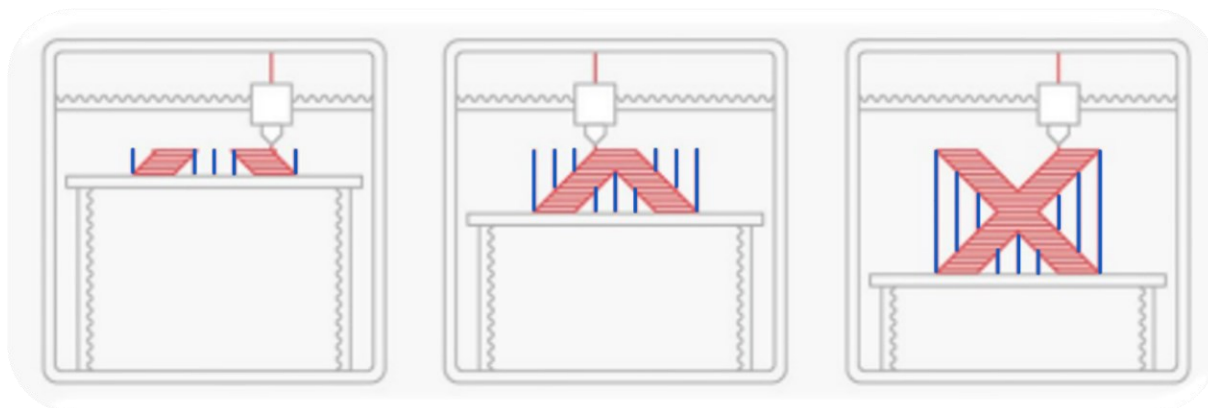
Fonte: Adaptado de Loh *et al.*, (2020).

De acordo com Volpato (2017), o importante é que o material que sair do bico em estado pastoso deve se solidificar e aderir rapidamente ao material sobre a plataforma de construção e, na sequência, sobre os filamentos depositados previamente. A solidificação do material deve atender a um ponto ótimo, com rapidez relativa para permitir que o material mantenha estruturação e lentidão suficiente para

que o filamento depositado possa ter a melhor adesão possível aos filamentos já depositados.

Outra consideração importante para MEX é a exigência das estruturas de suporte. Como mostrado em azul na Figura 5, as estruturas de suporte, quando necessárias, são feitas para permitir a fabricação de regiões de uma peça que estão suspensas, desconectadas temporariamente ou têm superfícies negativas; isso é, menores que 90° em relação ao plano XY, com inclinação menor que o ângulo de autossuporte. O ângulo de autossuporte é o ângulo acima do qual o material da camada anterior consegue manter, de maneira estável, a camada seguinte na posição desejada, dentro de um desvio aceitável (VOLPATO, 2017).

Figura 5. Exemplo de impressão com suporte



Fonte: Adaptado de Redwood *et al.* (2017).

2.3 Manufatura aditiva por extrusão de material com carga metálica

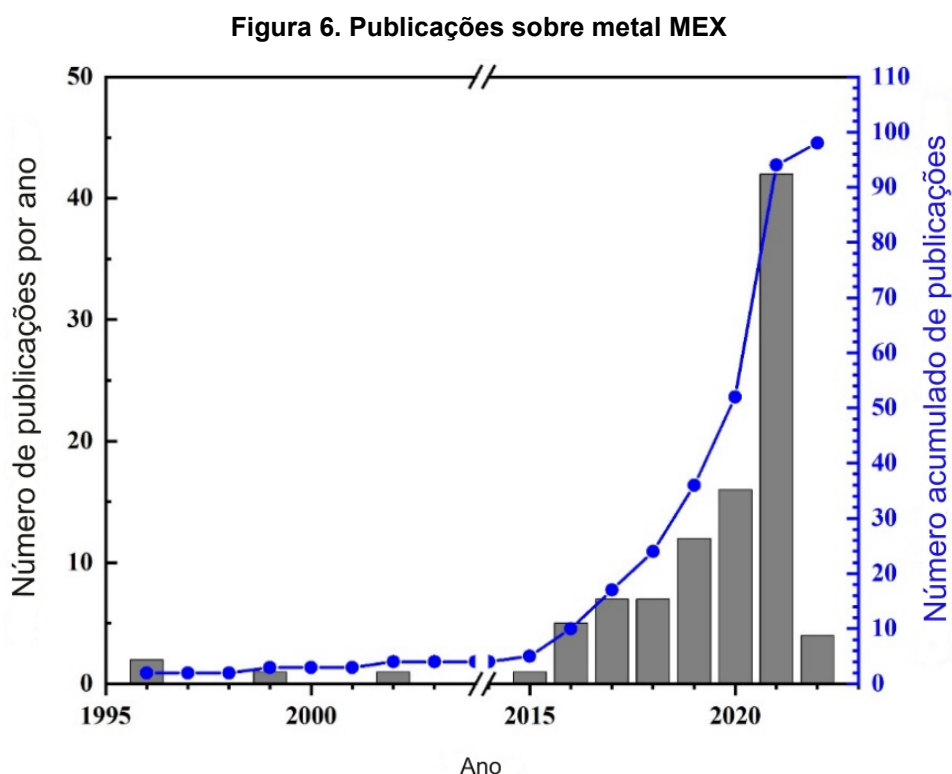
A manufatura aditiva por extrusão de materiais com carga metálica (metal MEX) foi estudada anteriormente aos lançamentos da Markforged (3D Printing Media Network, 2017) e da BASF Forward AM (3D Printing Media Network, 2019). Greulich *et al.* (1995) publicaram sobre o desenvolvimento do processo que denominaram de solidificação por jato multifásico (MJS - *Multiphase Jet Solidification*).

Agarwala *et al.* (1996) estudaram a qualidade estrutural de peças fabricadas por processamento de deposição de materiais fundidos, tanto por deposição de cerâmicas fundidas (FDC - *Fused Deposition of Ceramics*) como por deposição de metais fundidos (FDMet - *Fused Deposition of Metals*). Wu *et al.* (2002) desenvolveram uma tecnologia de FDMet para fabricação de peças verdes seguidas

pelo processo térmico chamado de queima de aglutinante (BBO - *binder burn out*) e pela sinterização.

Alguns anos depois, Masood e Song (2004; 2005) trabalharam no desenvolvimento de material compósito metal/polímero de partículas de aço com matriz de nylon para uso em MEX com o objetivo de reduzir custo e tempo no processo de prototipagem rápida de insertos de moldes para injeção. Na sequência, Bandyopadhyay *et al.* (2006) buscaram aplicações para o processo de deposição fundida direta para fabricação de compósitos cerâmico/metal. Anos depois, Mireles *et al.* (2012) trabalharam para complementar os estudos de FDM para metais (FDMm - *Fused Deposition Modeling for metals*).

Com base no levantamento conduzido por Suwanpreecha e Manonukul (2022) Suwanpreecha e Manonukul (2022), representado na Figura 6, é notável o aumento significativo no volume de publicações sobre metal MEX em 2015, contrastando com a quantidade de estudos divulgados entre 1996 e 2015.



Fonte: Adaptado de Suwanpreecha e Manonukul (2022).

Atualmente, são oferecidos processos análogos ao de interesse por empresas específicas. A tecnologia denominada de Deposição de Metais Ligados (BDM - *Bound Metal Deposition*) para o sistema Desktop Metal Studio System™ 2, da empresa

Desktop Metal (Desktop Metal, 2022) usa barras de pó metálico com matriz polimérica (chamado de aglutinante pela empresa) em formulação similar à utilizada por misturas de moldagem por injeção de metal (MIM - *Metal Injection Moulding*). Isso é, com maior quantidade de pó metálico do que as soluções em filamento, já que não é necessário ter flexibilidade para conformar o material em uma barra. Como consequência da menor quantidade de material polimérico, as peças produzidas por esse processo têm menor contração.

O sistema Metal X™, da empresa Markforged (Markforged, 2022), tem impressora e filamentos proprietários, assim como a lavadora para o *debinding* químico e forno para sinterização. A empresa intitula sua tecnologia como Manufatura Aditiva por Difusão Atômica (ADAM - *Atomic Diffusion Additive Manufacturing*).

A The Virtual Foundry (2022) utiliza o termo fabricação por filamento fundido de metal (FFF metal - *Fused Filament Fabrication*) e afirma que Filamet™ é o único filamento que permite a impressão e sinterização de metal, cerâmica e vidro com equipamento simples e acessível financeiramente. Sendo a impressão em impressoras de bancada de MEX comuns e o *debinding* e a sinterização no equipamento “FireX Sintering Kiln” ou no “The Virtual Foundry Sintering Kiln”, a empresa enfatiza que é possível produzir peças de metal puro em casa.

A BASF Forward AM, que também chama de FFF a tecnologia de AM designada pela norma como MEX, apresenta os filamentos com carga de aços inoxidáveis comercialmente rotulados de BASF Ultrafuse® 316L e BASF Ultrafuse® 17-4PH.

Por fim, a Raise3D também chama a tecnologia de FFF e oferece o sistema MetalFuse, composto pela impressora 3D de metal Forge1, o forno para *debinding* catalítico D200-E, o forno de sinterização S200-C e o PPP IdeaMaker Metal. O Quadro 2 mostra os materiais com carga metálica comercialmente disponíveis no Brasil no momento desse estudo e seus respectivos fabricantes.

Quadro 2. Materiais comercialmente disponíveis atualmente para metal MEX

Material disponível	Fabricante/Sistema	BASF Forward AM Ultrafuse®	Markforged Metal X	Desktop Metal Studio System™ 2	The Virtual Foundry Filamet™
Aço inoxidável 17-4PH		X	X	X	X
Aço inoxidável 316L		X		X	X
Aço ferramenta H13			X	X	
Aço ferramenta A2			X	X	
Aço ferramenta D2			X	X	
Aço de baixa liga 4140				X	
Aço de alto carbono					X
Alumínio 6061					X
Bronze					X
Cobre			X		X
Inconel 625			X		
Inconel® 718					X
Liga de níquel IN625				X	
Rapid 3DShield					X
Titânio Ti64				X	
Tungstênio					X
Titânio 64-5					X

Fonte: Autoria própria (2025).

Abe *et al.* (2021) estudaram fabricação por MEX em 17-4PH e demonstraram que o comportamento mecânico das peças também é afetado pelos vazios orientados nas peças, especialmente o das peças com vazios orientados perpendicularmente à direção de tração.

Considerando especificamente o material BASF Ultrafuse® 17-4PH, o documento de diretrizes para o usuário para impressão 3D de peças de metal da empresa recomenda que, por conta da quantidade de polímero na matriz do filamento, as escalas utilizadas no planejamento do processo sejam XY 119% e Z 122% (BASF FORWARD AM, 2025) para compensar as contrações de 16% na direção X-Y e de 20% na direção Z. Alguns pesquisadores estudaram metal MEX com outros materiais e apresentaram resultados aproximados, como mostra a Tabela 1.

Também foi desenvolvido pela BASF um material chamado Ultrafuse® Support Layer – análogo aos materiais Ceramic Release Layer da Desktop Metal e da Markforged e PLA Support Material da The Virtual Foundry - com o objetivo de auxiliar a remoção do suporte após sinterização da peça. Recomenda-se depositar esse material em camadas finas entre o suporte e a peça, como apresentado na Figura 7, e por meio de um bico com resistência à abrasão, como bico de rubi, uma vez que causa desgaste ainda maior do que os filamentos com cargas metálicas (BASF FORWARD AM, 2025).

Tabela 1. Resultados sobre contração de peças fabricadas por metal MEX.

Autor (Ano)	Material	Contração Direção X-Y	Contração Direção Z
Gong et al. (2018)	BASF Ultrafuse® 316L	de 13 a 18%	de 18 a 23%
Kurose et al. (2020)	316L Taisei Kogyo	de 14 a 15%	de 15 a 17%
Watson et al. (2020)	17-4PH Desktop Metal	18,6%	19,5%
Liu et al. (2020)	316L*	17%	17%
Quarto et al. (2021)	BASF Ultrafuse® 316L	16,4%	20%

*Sem mais detalhes da especificação

Fonte: Autoria própria (2025).

Após o processo de *debinding*, com as peças em estado marrom, a estabilidade estrutural das peças é mínima. Dessa forma, definir a melhor orientação para a peça e usar as estruturas de suporte reduz o risco de falhas no D&S (BASF FORWARD AM, 2025).

Ademais, de acordo com o fabricante, materiais com cargas metálicas requerem uma quantidade maior de suporte comparado à aplicação de MEX com polímeros porque as peças podem ficar distorcidas ou entrar em colapso durante os processos de D&S. Portanto, é recomendado utilizar suportes para peças com ângulo de autossuporte menor que 45° e com densidade mínima de 50% para manter a estabilidade durante D&S.

Figura 7. Exemplo de utilização do Ultrafuse® Support Layer da BASF

Fonte: Adaptado de (BASF FORWARD AM, 2022a).

As etapas a serem seguidas para obtenção de peças metálicas – também chamadas de brancas – recomendadas pelo fabricante do filamento (BASF FORWARD AM, 2019) estão representadas na Figura 8.



Fonte: Adaptado de BASF Forward AM (2019).

Devido à alta similaridade com os processos de MIM, a implementação do metal MEX torna-se mais fácil, rápida e econômica para os fabricantes de MIM. Como esses profissionais já estão familiarizados com o material e podem aproveitar seus sistemas de *debinding* e sinterização, é possível utilizar a infraestrutura de uma indústria já consolidada – fornecedora de instrumentos cirúrgicos, implantes, ortodontia e componentes da indústria bélica, para a produção de peças metálicas por metal MEX (SUWANPREECHA; MANONUKUL, 2022).

2.4 *Debinding* e Sinterização

A metalurgia do pó é um processo de fabricação tradicional que consiste em usar pós metálicos para produzir peças. O processo envolve a compactação do pó em um molde, seguida de um tratamento térmico de sinterização para consolidar o material. Os pós metálicos podem ser produzidos de diferentes modos, incluindo processos químicos, físicos e mecânicos. A escolha do processo mais adequado depende do tipo de metal e das propriedades desejadas no produto. Uma das principais vantagens dessa tecnologia é a possibilidade de combinar dois ou mais tipos de pós metálicos para obter um conjunto específico de propriedades mecânicas (UPADHYAYA, 2002).

Upadhyaya (2002) menciona que um dos métodos mais comuns para a obtenção de pó metálico é o processo físico de atomização. Nesse processo, o metal base é fundido e superaquecido, sendo então expelido por um orifício em alta velocidade. Ao mesmo tempo, um gás é forçado a sair pelo mesmo orifício, o que faz com que o metal líquido seja pulverizado e solidificado de forma instantânea. Existe

também uma variação desse método em que a água é utilizada no lugar do gás para realizar o processo de pulverização.

Antes da sinterização, o aglutinante orgânico deve ser removido sem desagregar as partículas de pó recém-saídas do molde – ou da impressora – esse processo é comumente conhecido como *debinding*. Os polímeros orgânicos precisam ser completamente removidos da peça verde, já que resíduos de carbono podem influenciar o processo de sinterização e afetar negativamente a qualidade final da peça (GONZALEZ-GUTIERREZ *et al.*, 2012).

Além disso, a remoção do aglutinante é uma das etapas mais críticas nos processos de moldagem por injeção de pó (PIM – Powder Injection Moulding) – e MIM – pois defeitos podem ser gerados por um *debinding* inadequado, como inchaço, formação de bolhas, rachaduras na superfície e grandes vazios internos. Foi demonstrado que a velocidade de remoção do aglutinante desempenha um papel fundamental na produção de defeitos devido a alterações estruturais nos capilares dentro da peça verde (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

As técnicas de *debinding* mais comumente utilizadas são: térmica, por solvente e catalítica. No entanto, também existem algumas técnicas experimentais, como o *debinding* por plasma (SANTOS *et al.*, 2004).

Gonzalez-Gutierrez *et al.* (2012) comparam os três processos de *debinding* e publicam um compilado com as principais características, vantagens e desvantagens de cada um. No *debinding* térmico, a peça verde é aquecida lentamente até temperaturas de fusão ou degradação, utilizando um gás de varredura contínuo para remover o aglutinante. A principal vantagem desse método é que ele é um processo de uma etapa, o que significa que não é necessário manusear o produto entre o *debinding* e a sinterização. É um método de baixo custo e pode ser aplicado a uma ampla variedade de aglutinantes. No entanto, o aglutinante amolecido pode causar empenamento, controle dimensional dificultado e o processo é relativamente lento (até 60 horas).

No *debinding* por solvente, a peça verde é colocada em um solvente em estado gasoso ou líquido – utilizado pelo sistema Metal X™ da Markforged – para extrair o aglutinante por meio de dissolução. Esse método permite que o componente permaneça rígido sem reações químicas, e as temperaturas mais baixas ajudam a minimizar defeitos e distorções. Além disso, é mais rápido que o *debinding* térmico

(cerca de 6 horas). Contudo, o uso de solventes pode apresentar riscos químicos e ambientais (a menos que o aglutinante seja solúvel em água). Equipamentos para extração supercrítica são caros e, se for utilizado um solvente líquido, é necessário secar a peça antes da sinterização (GONZALEZ-GUTIERREZ *et al.*, 2012).

No *debinding* catalítico, a peça verde é aquecida em uma atmosfera contendo um catalisador para despolimerizar o aglutinante e varrer os monômeros, fazendo com que o aglutinante passe do estado sólido para o gasoso. Esse método é rápido (4 a 6 horas) e funciona bem em peças com seções espessas e finas, com excelente retenção de forma. No entanto, o uso de catalisadores ácidos e produtos de decomposição pode apresentar riscos à saúde e ao meio ambiente. Os produtos residuais devem ser tratados adequadamente para evitar impactos ambientais e à saúde (GONZALEZ-GUTIERREZ *et al.*, 2012).

Considerando especificamente a disponibilidade no Brasil, a Up3D fornece os serviços de D&S e, de acordo com Ulbrich e Ulbrich, (2024), o sistema *MetalFuse* da Raise3D, utilizado pela empresa, é uma boa alternativa para empresas pequenas e médias, uma vez que apresenta um bom custo-benefício, com o menor investimento inicial, redução dos custos operacionais por conta da utilização compartilhada do forno e diminuição dos preços dos materiais. Destaca-se o compromisso da *MetalFuse* com a sustentabilidade uma vez que o sistema consome menos energia, minimiza a geração de resíduos e utiliza um catalisador biodegradável no processo de *debinding* (ULBRICH; ULBRICH, 2024).

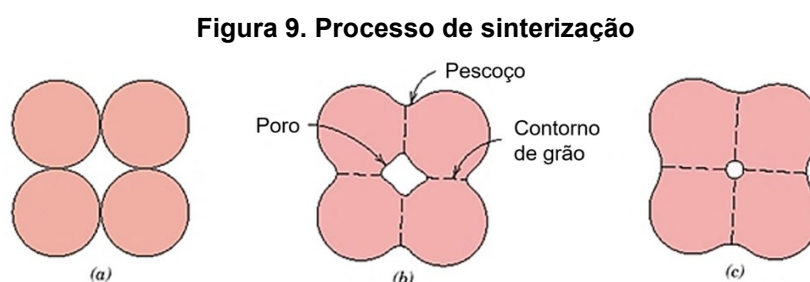
A BASF Forward AM (2019) indica o *debinding* catalítico como um processo termoquímico no qual as peças no estado verde são expostas ao ácido nítrico gasoso (HNO_3) em uma atmosfera de nitrogênio e aquecidas. Esse processo remove o material aglutinante de 1 a 2 mm/hora para cada superfície externa; quanto mais espessa for a peça, maior será o tempo de *debinding* necessário. O fabricante BASF Forward AM (2019) afirma que os filamentos metálicos Ultrafuse[®] utilizam vários sistemas de aglutinantes para garantir uma remoção rápida e controlada do material aglutinante.

Com o polímero retirado por *debinding*, a peça encontra-se um estado no qual as suas partículas metálicas estão unidas por forças muito fracas, debilitando as propriedades mecânicas da peça. A solução é submeter a peça à sinterização com o

objetivo de que suas partículas coalesçam para eliminar vazios e aumentar a densidade da peça (UPADHYAYA, 2002).

A sinterização é um processo físico que ocorre em altas temperaturas, em uma atmosfera inerte, para formar uma massa densa pela união de partículas. O processo começa com a formação de pescoços que unem partículas metálicas vizinhas, enquanto contornos de grão se formam e o espaço entre as partículas se transforma em poros. Com o avanço da sinterização, os poros se fecham e assumem uma forma esférica. Não há fase líquida envolvida, e as mudanças resultam da difusão atômica pelas áreas dos pescoços formados (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

A Figura 9 apresenta o fenômeno de sinterização com a etapa inicial de união entre as partículas (a), seguida pela formação dos pescoços e enclausuramento de poros (b) e arredondamento dos poros e densificação (c).



De acordo com Lame *et al.* (2003), a sinterização transforma pós metálicos ou cerâmicos em materiais densos com maior resistência mecânica, mas que, na maioria dos casos, ainda apresentam porosidade residual. O processo é realizado a temperaturas abaixo do ponto de fusão do principal constituinte do pó metálico ou cerâmico, geralmente entre 70% e 90% do ponto de fusão. A temperatura no forno de sinterização é alta o suficiente para iniciar o processo de recristalização das partículas metálicas ou cerâmicas, mas baixa o bastante para evitar que as partículas derretam. Nessas condições, as partículas se recristalizam e se fundem umas às outras (BOLJANOVIC, 2010).

Devido à transição de uma peça marrom porosa para um estado branco denso, isto é, a peça metálica, as dimensões da peça são reduzidas. Essa redução no tamanho é normalmente chamada de contração e deve ser considerada durante a fase de projeto – ou planejamento de processo (BASF FORWARD AM, 2025). Muitas variáveis devem ser levadas em conta para que o processo seja bem-sucedido como

o material utilizado, o tamanho e formato das partículas e o tamanho e formato da peça, o que dificulta bastante esta etapa da produção (UPADHYAYA, 2002).

Como regra geral, a direção e os parâmetros de impressão têm uma influência maior sobre a magnitude da contração do que a orientação da peça no processo de D&S. Estruturas de suporte, como em qualquer peça de MEX são necessárias ao imprimir balanços ou outras estruturas horizontais. No entanto, ao contrário do MEX típico, os componentes metálicos Ultrafuse® exigem um aumento nas estruturas de suporte para garantir a integridade estrutural durante os processos de D&S (BASF FORWARD AM, 2025).

É importante mencionar a utilização do termo em inglês neste trabalho. O termo “*debinding*” foi mantido por ser o mais usual e conhecido – do que desaglutinação, por exemplo - como o processo responsável pela decomposição da matriz polimérica dos filamentos com carga metálica nos processos de MIM e metal MEX. O termo “*debinding*” também é utilizado por conta da consideração da matriz polimérica como um aglutinante. No entanto, o termo “aglutinante” é mais utilizado nos processos de BJT.

2.5 Design para Manufatura Aditiva

A flexibilidade da AM é uma vantagem, uma vez que sistemas desse tipo não requerem investimento inicial de ferramenta, diferente das técnicas convencionais de produção (ITUARTE, 2013). Dessa forma, por serem tecnologias utilizadas para criação de geometrias por adição de material, diferente do conceito subtrativo convencional de usinagem, por exemplo, outro ponto positivo da AM é a maximização da eficiência no uso da matéria-prima (RASIYA *et al.*, 2020).

Entre os benefícios oferecidos pelo emprego da AM estão a produção de peças complexas, resistentes e leves em tempo e custo reduzidos, não restringindo a fabricação apenas a protótipos, mas também permitindo sua utilização para manufatura em pequena escala de produtos. Em alguns casos a tecnologia é tão adequada à aplicação e às exigências de geometria, resistência e acabamento que não é necessário fazer pós-processamento (BHATIA; SEHGAL, 2023; SOLIS *et al.*, 2019).

Conhecimentos de AM e aperfeiçoamento de parâmetros de impressão são importantes para a qualidade de uma peça fabricada. Porém, para que o uso da AM em produção direta apresente os resultados esperados, é necessário repensar o processo de desenvolvimento do produto analisando em quais aspectos o mesmo pode ser melhorado por meio dessas tecnologias (VANEKER, 2017). É possível produzir por AM uma peça que originalmente foi projetada para outras formas de fabricação, mas isso não é o ideal, uma vez que o projeto pode ser prejudicado em funcionalidades, consolidação e estética (MAIDIN *et al.*, 2012).

O objetivo do Design para Manufatura e Montagem (DfMA – *Design for Manufacturing and Assembly*), é incluir o conhecimento de manufatura e montagem no início do processo para aumentar as chances de sucesso e encurtar o ciclo de desenvolvimento (BAYOUMI, 2000). Da mesma forma, como indicado por Chaudhuri *et al.* (2019), pode-se entender que o DfAM é uma nova sub-categoria do paradigma abrangente de Design para X (DfX – *Design for X*), sendo que X pode ser representado por manufatura, montagem, testabilidade, confiabilidade, desmontagem ou custo – que está alinhado com o Design para Manufatura (DfM – *Design for Manufacturing*), mas aplicado às tecnologias de AM.

De acordo com Gebisa e Lemu (2017), o DfAM tem o objetivo de otimizar os produtos por meio da análise de possibilidades particulares a esse processo de fabricação alterando o projeto de forma a conceber produtos com melhor desempenho. Para isso, destaca-se a importância de ocorrer uma transição de pensamento dos projetistas para o DfAM, uma vez que se deve planejar o desenvolvimento do produto com previsões às questões referentes à fabricação e à sustentabilidade do sistema e do produto gerado (GEBISA; LEMU, 2017).

De acordo com Coykendall *et al.* (2014), a AM é implementada na indústria para aumentar o valor percebido em algum dos três pontos: lucro, risco e tempo. Foram identificadas quatro rotas táticas, caracterizadas por mudança de produto ou de cadeia logística, que as indústrias incorporaram na implementação da AM, sendo elas:

- Rota 1: descreve empresas que não buscam por modificação radical de seus produtos nem de sua cadeia logística, mas procuram pela AM para melhorar a proposição de valor para seus clientes usando a impressão de protótipos e ferramentas;

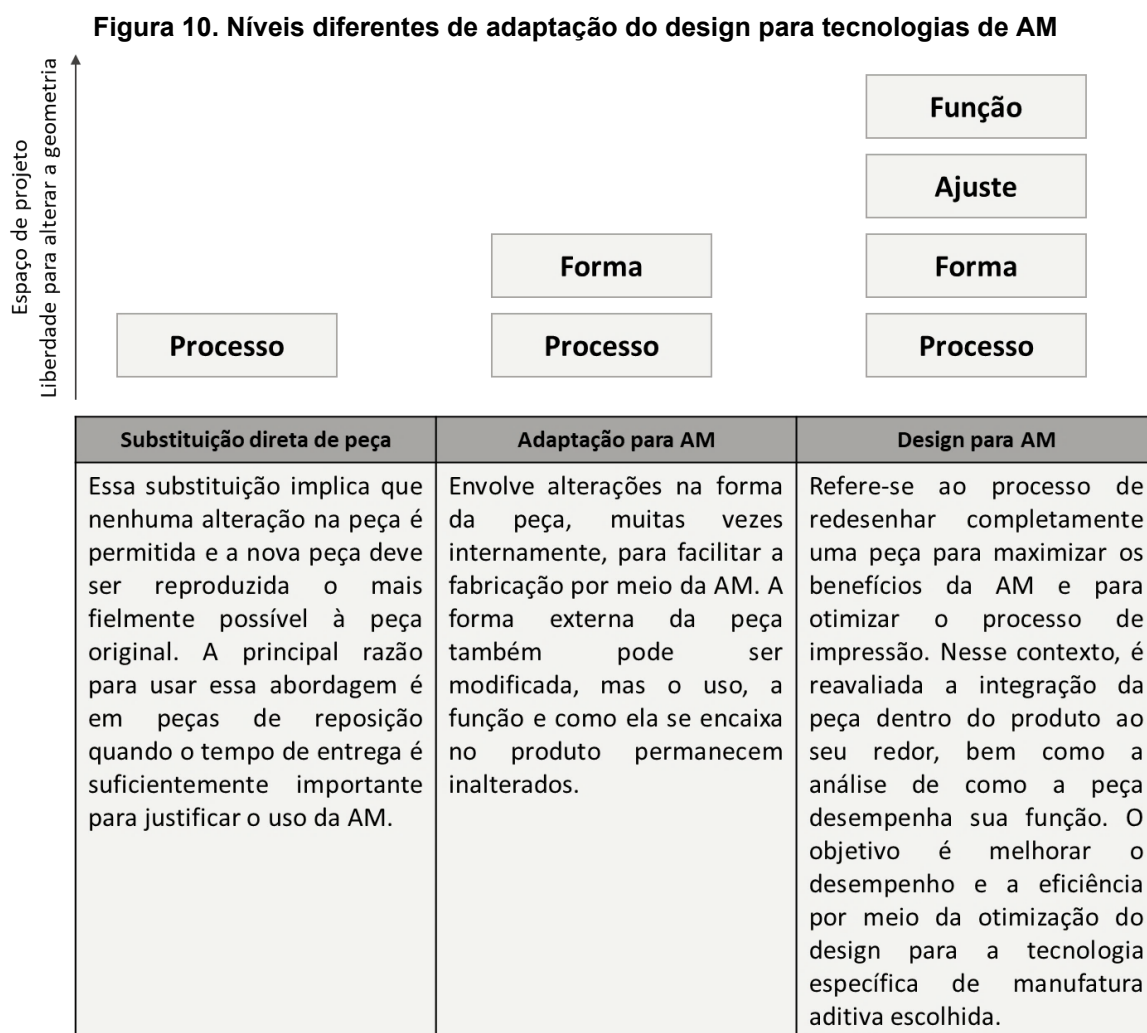
- Rota 2: percebe a AM como meio de definir novos casos de sucesso com produção de produtos para o consumidor final, seja com produção de peças de reposição ou produção em locais complicados como o espaço, zonas de guerra ou mesmo indústria de óleo e gás;
- Rota 3: apresenta estratégias viabilizadas por novo desempenho de produto de AM, como exemplo de bicos de combustível, eletrônica embarcada e estruturas leves;
- Rota 4: descreve empresas que baseiam seu negócio em mudanças tanto na cadeia logística quanto nos produtos, como, por exemplo, as lojas com escaneamento e impressão 3D para a produção de calçados personalizados.

É difícil encontrar uma definição universal para DfAM. Cada artigo e estudo apresenta uma sugestão que geralmente está relacionada ao problema estudado (WIBERG *et al.*, 2019). No entanto, de maneira muito similar ao DfM, o DfAM representa um conjunto de melhores práticas e sugestões que aprimoram designs que serão fabricados por meio de tecnologias de AM para superar limitações e aproveitar ao máximo a sua capacidade (LEUTENECKER-TWELSIEK *et al.*, 2016).

Ao abranger todos os procedimentos desde o primeiro conceito até a versão final do produto, o DfAM visa alcançar o melhor desempenho geométrico e material combinando otimização de custo, tempo e qualidade (LOPEZ TABORDA *et al.*, 2021). Enquanto a literatura apresenta algumas revisões sobre DfAM (DJOKIKJ; KANDIKJAN, 2022), é interessante notar que poucas delas direcionam seu foco especificamente para os processos de MEX (ATATREH *et al.*, 2023). Essa escassez de enfoque específico em processos dessa tecnologia contrasta com a extensa pesquisa e atenção dada a ela, evidenciada por Djokikj e Kandikjan (2022) e Hamel *et al.* (2018), sendo MEX uma das tecnologias mais utilizadas e estudadas nesse campo.

De uma perspectiva diferente, Diegel *et al.* (2020) explicam que AM pode ser empregada em três níveis diferentes de profundidade, como mostrado na Figura 10. O primeiro nível considera o caso em que a AM é apenas utilizada como substituto para outro processo convencional de fabricação, como pode ocorrer na substituição direta de peças. No segundo nível, tanto o processo quanto as formas são características que se deseja alterar, de modo que um componente específico seja

adaptado para que qualquer tecnologia de AM possa fabricá-lo. Finalmente, no último nível, todo o processo de projetar é realizado com base na premissa de que a fabricação ocorrerá por adição de material, o que leva a um redesenho completo da forma e função.

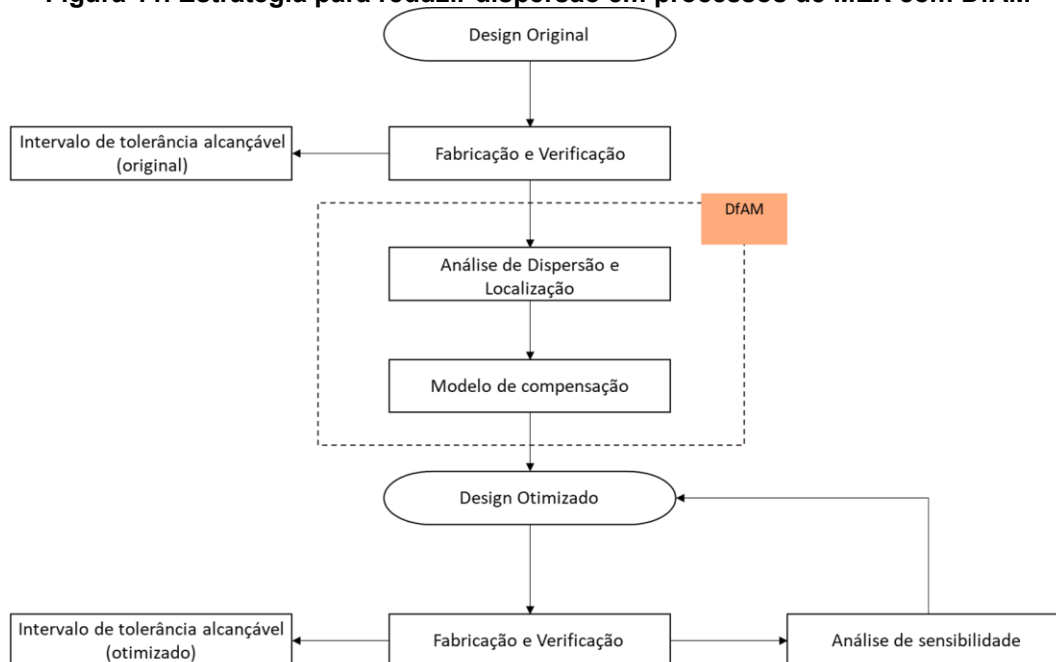


Fonte: Adaptado de Diegel *et al.* (2020).

Beltrán *et al.* (2021) criaram um método, mostrado na Figura 11, para aprimorar a obtenção de tolerância dentro de um intervalo, definindo compensações globais e locais nos modelos 3D. A estratégia permite ao usuário criar uma série de designs personalizados que melhor se adequem ao equipamento e à posição na bandeja da impressora, reduzindo desvios na fabricação. Portanto, um lote com algumas unidades do mesmo componente é fabricado antecipadamente e medido. Na sequência, é realizada uma análise da dispersão para compensar os modelos e reduzir a discrepância entre o tamanho médio. Os resultados permitiram a redução do

intervalo de tolerância de IT14 para IT11. Essa abordagem geral utiliza um número limitado de experimentos físicos para responder a uma questão específica de DfAM e os resultados podem então ser utilizados para projetar peças funcionais sem a necessidade de dados adicionais.

Figura 11. Estratégia para reduzir dispersão em processos de MEX com DfAM



Fonte: Adaptado de Beltrán *et al.* (2021).

Vários autores têm se dedicado ao estudo do tema DfAM e à implementação de diretrizes (DJOKIKJ; KANDIKJAN, 2022; LOPEZ TABORDA *et al.*, 2021; HAMEL *et al.*, 2018). No entanto, em comparação com o número de artigos que afirmam utilizar regras de DfAM em seus estudos (LIM *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2023; PRAJAPATI *et al.*, 2022; STANO *et al.*, 2022; BELTRÁN *et al.*, 2021; RANE *et al.*, 2019), há poucos autores que se dedicaram a esse campo. Encontrar regras de design adequadas na literatura não é fácil, pois muitas delas são baseadas nas experiências práticas dos desenvolvedores (LEUTENECKER-TWELSIEK *et al.*, 2016).

As técnicas de DfAM surgiram da necessidade de ampliar as aplicações das técnicas de AM e aumentar a eficiência desses processos para alcançar taxas de produção semelhantes às dos processos de produção convencionais (ASADOLLAHI-YAZDI *et al.*, 2017). Assim, a importância do DfAM está vinculada a eventos mais recentes, especialmente devido aos avanços tecnológicos nas tecnologias MEX em relação a novos materiais.

Dessa forma, Djokikj e Kandikjan (2022) propuseram uma metodologia específica para criar peças a serem fabricadas por MEX. Inicialmente, conduziram uma pesquisa que revelou que muitos dos problemas com os resultados da AM estão diretamente relacionados à falta de procedimentos padronizados, o que impede os usuários de acessar o conhecimento adequado para controlar os processos MEX. Em seu estudo, foram encontradas outras metodologias disponíveis (URBANIC; HEDRICK, 2016; ADAM; ZIMMER, 2015; ZIMMER; ADAM, 2012; TEITELBAUM *et al.*, 2009), mas julgam que são conjuntos simples de regras de design sem um foco aprofundado nos fenômenos físicos por trás dos parâmetros de impressão.

Entre alguns parâmetros de MEX, como velocidade de impressão, velocidade de extrusão e espaçamento entre filetes, a altura da camada é a que mais impacta a qualidade da superfície das peças (RANE *et al.*, 2019). Outro parâmetro vital em MEX é a largura do filamento (ZIMMER; ADAM, 2012). Somente após considerar todas essas restrições MEX no processo de design será possível utilizar toda a capacidade dessa tecnologia (LEUTENECKER-TWELSIEK *et al.*, 2016).

Dessa forma, foi possível identificar outros métodos de DfAM por meio de uma busca aprofundada na literatura, resumidos no Quadro 3. Alguns foram desenvolvidos exclusivamente para MEX, enquanto outros afirmam ser adequados para mais de um princípio de adição de material.

Quadro 3. Compilado de diretrizes da literatura que podem ser aplicadas para MEX

Autoria (ano)	Descrição do estudo	Tecnologia à qual as diretrizes podem ser aplicadas
Djokikj e Kandikjan (2022)	Pesquisa e revisão realizadas na Universidade de Skopje. Apresenta 10 Regras de Design Geral (RDG) e 27 Regras de Design Específicas (RDE).	Focado em MEX.
Diegel <i>et al.</i> (2020)	Conjunto de 7 regras como diretrizes gerais.	Alegam que são princípios que podem ser aplicados a quase qualquer princípio de AM.
Leutenecker-Twelsiek <i>et al.</i> (2016)	Estrutura para diretrizes de design que distinguem entre características do processo, princípios de design e regras de design, concentrando-se na determinação da orientação da peça no estágio inicial de design.	As diretrizes de design apresentadas focam principalmente nos processos de Manufatura Aditiva para produzir peças para usuários finais, especialmente em SLS, SLM e MEX.
Asadollahi-Yazdi <i>et al.</i> (2017)	Propuseram uma abordagem integrada e completa de DfM para AM para gerenciar novos critérios de fabricação provenientes da AM. Usou a abordagem DfM-Skin and Skeleton.	MEX é a tecnologia de AM escolhida para ser analisada abrangentemente, considerando diferentes atributos, critérios e restrições devido ao processo e à máquina.
Adam e Zimmer (2014, 2015); Zimmer e Adam (2012)	Propuseram um conjunto de regras por meio do projeto de pesquisa chamado "Regras de Design para Manufatura Direta" com base em elementos geométricos padrão, transições de elementos e estruturas agregadas.	As regras de design foram desenvolvidas com base em elementos geométricos padrão para SLS, SLM e MEX.

Fonte: Autoria própria (2024).

Em cumprimento ao “objetivo específico a”, as seções subsequentes apresentam maiores detalhes sobre as referências consideradas para a elaboração da proposta de diretrizes, sendo elas:

- Djokikj e Kandikjan (2022);
- Diegel et al. (2020);
- Leutenecker-Twelsiek et al. (2016);
- Asadollahi-Yazdi et al. (2017);
- Adam e Zimmer (2014, 2015); Zimmer e Adam (2012);
- BASF Forward AM (2025);
- Markforged (2025).

2.5.1 Djokikj e Kandikjan (2022)

O artigo de Djokikj e Kandikjan (2022) propõe uma metodologia para o desenvolvimento de regras de design para o processo de MEX abordando desafios específicos encontrados por usuários ao projetar e fabricar peças utilizando essa tecnologia. As autoras afirmam que o uso de MEX para peças finais ainda é limitado devido à falta de diretrizes claras de design, o que resulta em falhas na fabricação de estruturas principalmente em peças complexas e baixa precisão dimensional devido a parâmetros de processo inadequados.

O objetivo do estudo foi desenvolver um conjunto de regras de design específicas para MEX, oferecendo diretrizes para propriedades geométricas, posicionamento na plataforma de construção, uso de estruturas de suporte e parâmetros de processo, como temperatura, espessura de camada e velocidade de impressão. A metodologia utilizada foi estruturada em um ciclo de "design - fabricação - avaliação - implementação - validação", incluindo o design de amostras experimentais, definição de parâmetros de processo, fabricação, avaliação com base em desvio de forma e qualidade dimensional, e validação das regras com quatro estudos de caso.

As autoras desenvolveram 10 Regras Gerais de Design (GDR) e 27 Regras Específicas de Design (SDR), baseadas tanto em revisão da literatura quanto em suas próprias experiências práticas. As regras foram validadas experimentalmente e organizadas para apoiar o projeto de peças em manufatura aditiva, especialmente no

contexto de MEX. As GDR reúnem recomendações iniciais, como evitar mudanças abruptas de espessura e reduzir a necessidade de suportes. Já as SDR definem limites técnicos específicos, como espessura mínima de parede, diâmetro mínimo de furos e comprimento máximo para estruturas em balanço e pontes. A aplicação prática dessas regras mostrou que seu uso pode aumentar a confiabilidade no processo de MEX, melhorar a precisão dimensional e minimizar a ocorrência de falhas.

De acordo com Djokikj e Kandikjan (2022), os problemas enfrentados pelos usuários durante a fabricação MEX podem ser classificados em dois grupos: os causados pela própria tecnologia e os decorrentes de designs inadequados para MEX. Ao analisar o segundo grupo, os autores identificaram uma lista de problemas comuns relacionados a:

1. Projetar paredes verticais finas;
2. Elementos finos;
3. Inclinação inadequada;
4. Pequenos detalhes que podem ser distorcidos na etapa de fatiamento;
5. Conexões de montagem inadequadas;
6. Falta de material de suporte quando necessário.

Dessa forma, criar regras que definam precisamente os valores limites para os parâmetros críticos de controle do MEX é uma maneira que deveria ajudar na melhor compreensão e familiarização dos fenômenos físicos da tecnologia (DJOKIKJ; KANDIKJAN, 2022). Algumas das regras publicadas, apresentadas no Quadro 4, foram consideradas de forma integrada com pontos mencionados por outros autores no compilado de diretrizes deste estudo, sendo elas sobre: estruturas de suporte, arredondamentos, chanfros, curvaturas e escala.

Quadro 4. Diretrizes de Djokikj e Kandikjan (2022)

Regras Gerais de Design (GDR) e Regras Específicas de Design (SDR)
GDR01 – Antes de projetar uma peça, o propósito dela deve ser claramente definido. Com base nisso, um processo de AM apropriado e parâmetros de trabalho adequados podem ser
GDR02 – Ao projetar, deve-se evitar o uso de transições bruscas de paredes muito espessas para muito finas, pois isso pode resultar em tensões residuais.
GDR04 – Ao projetar, devem ser feitos esforços para criar um modelo que não exija estruturas de suporte durante a fabricação.
GDR05 – Ao projetar grandes balanços e pontes, o uso de estruturas de suporte deve ser considerado.
GDR06 – Superfícies planas grandes devem ser evitadas ao projetar, pois são resfriadas de maneira desigual, o que pode levar à deformação da peça.
GDR07 – Ao projetar, deve-se considerar o uso de filetes ou chanfros na superfície inferior para facilitar a remoção da peça da plataforma de construção.
GDR08 – Ao projetar elementos altos e finos independentes, deve-se considerar que pode ocorrer arredondamento na base do elemento (efeito de "pé de elefante"), porque as camadas
GDR09 – Ao projetar, deve-se usar uma malha poligonal, pois o modelo poligonal (.stl) é necessário para a fabricação, o que reduz a possibilidade de erros.
GDR10 – A escala da peça antes da fabricação não é recomendada, pois pode resultar em dimensões de recursos que estão além das capacidades da máquina.
SDR01 – Ao criar um arquivo .stl, deve-se usar uma tolerância de desvio de 0,001 mm e uma tolerância de ângulo de 15°.
SDR02 – Ao projetar uma parede integrada, a espessura mínima que pode ser feita é de 0,5 mm.
SDR03 – Ao projetar uma parede integrada que é um elemento integral de um modelo maior, a espessura mínima da parede deve ser ≥ 1 mm.
SDR04 – Ao projetar uma parede integrada, pode ocorrer curvatura nas bordas, dependendo da orientação do elemento.
SDR05 – Ao projetar uma parede independente, a espessura mínima da parede que pode ser feita é de 0,5 mm.
SDR06 – Ao projetar uma parede independente, a espessura mínima a ser utilizada para criar um modelo completo é ≥ 1 mm.
SDR07 – Ao projetar uma parede independente, pode ocorrer curvatura na base da parede, dependendo da orientação do elemento.
SDR08 – Ao projetar um elemento independente com seção transversal quadrada, a espessura mínima que pode ser feita, independentemente da orientação do elemento, é de 0,5 mm.
SDR09 – Ao projetar um elemento independente com seção transversal quadrada, a espessura mínima recomendada para uso é ≥ 1 mm.
SDR10 – Ao projetar um elemento independente com seção transversal circular, o diâmetro mínimo que pode ser feito, independentemente da orientação do elemento, é de 0,5 mm.
SDR11 – Ao projetar um elemento independente com seção transversal circular, o diâmetro mínimo recomendado para uso é ≥ 1 mm.
SDR13 – Ao projetar elementos independentes com grande altura e dimensões laterais ≤ 2 mm, grandes desvios na forma são possíveis.
SDR15 – Ao projetar uma junta entre paredes colocadas verticalmente, a espessura mínima da junta que pode ser feita é de 0,1 mm.
SDR16 – Ao projetar um espaço entre paredes colocadas verticalmente, a espessura mínima recomendada da junta é $\geq 0,2$ mm.
SDR18 – Ao projetar um balanço, o comprimento do balanço deve ser ≤ 2 mm, para que possa ser feito corretamente sem o uso de estruturas de suporte.
SDR23 – Ao projetar um elemento de ponte, o comprimento máximo da ponte deve ser ≤ 4 mm, para que possa ser feito corretamente sem o uso de estruturas de suporte.
SDR24 – Ao projetar um modelo com elementos finos e altos, evite agrupá-los para reduzir o efeito de stringing (formação de fios indesejados).
SDR26 – Ao projetar um modelo, é desejável utilizar o arredondamento das bordas que são paralelas à superfície de trabalho, com uma espessura mínima de camada.
SDR27 – Ao projetar um modelo, o arredondamento deve ser aplicado na base de elementos finos e altos para aumentar a área de contato.

Fonte: Adaptado de Djokikj e Kandikjan (2022).

2.5.2 Diegel *et al.* (2020)

O conceito central do terceiro capítulo de Diegel *et al.* (2020) é que o DfAM vai além de simplesmente adaptar peças - ele envolve aproveitar os benefícios exclusivos dessa tecnologia para criar projetos mais eficientes e funcionais. Os autores destacam que a AM permite maior liberdade geométrica, possibilitando a criação de formas complexas, integração de múltiplas funções em uma única peça e redução de peso por meio de estruturas otimizadas.

No entanto, essas vantagens devem ser equilibradas com os custos mais altos e o tempo de produção mais longo da AM. O design estratégico para AM deve considerar a orientação de impressão, minimizar o uso de material e suportes, reduzir a anisotropia e priorizar o desempenho funcional em relação ao material utilizado.

Praticamente todas as questões apontadas por Diegel *et al.* (2020), mostradas no Quadro 5 estão presentes no artefato desenvolvido – algumas independentes, outras combinadas para formação de uma abordagem unificada - sendo elas: correlação entre parâmetros de projeto, escolha da AM para fabricação, detalhes estéticos, arredondamentos, orientação de impressão, e minimização de massas e de estruturas de suporte e otimização topológica (TO). A consideração de seleção de material não se aplica, uma vez que o objetivo deste estudo envolve um material definido.

Quadro 5. Diretrizes de Diegel et al. (2020)

Considerações Estratégicas de DfAM e Diretrizes Gerais para Projetar Peças em AM

Regra nº 1 de DfAM: Depende!

Muitos parâmetros de projeto, como tamanho mínimo de furos, espessura da camada e orientação de impressão, dependem das condições específicas de impressão e das características da máquina utilizada, enquanto fatores como fusão parcial do pó em furos estreitos e o espaçamento entre peças móveis variam conforme o tamanho, a área de superfície e o tempo de retenção de calor, tornando essencial a experiência prática para obter peças impressas com precisão.

Regra nº 2 de DfAM: Primeiramente, você deveria estar usando AM?

A AM deve ser usada para produção apenas quando a peça não puder ser facilmente fabricada por métodos tradicionais, como usinagem CNC ou corte a laser, pois AM é relativamente lenta e mais cara, mas se destaca quando a complexidade da peça torna inviável a fabricação convencional.

Regra nº 3 de DfAM: Não custa mais caro fazer as coisas bonitas!

A característica de liberdade da AM permite criar formas complexas e adicionar detalhes estéticos, como logotipos e instruções, sem aumentar os custos, o que facilita a montagem, fortalece a identidade da marca e simplifica o controle de estoque.

Regra nº 4 de DfAM: Arredonde todos os cantos.

Arredondar as bordas internas e externas melhora a ergonomia, reduz concentrações de tensão que podem comprometer a resistência da peça e, como não aumenta o custo de impressão, é uma boa prática usar filetes com aproximadamente $\frac{1}{4}$ da espessura da peça.

Regra nº 5 de DfAM: Você não pode projetar para AM sem considerar a orientação de impressão.

A orientação de impressão afeta diretamente a qualidade da peça (resistência, propriedades do material, acabamento e necessidade de suporte), sendo ideal posicionar as áreas que exigem maior resistência na direção horizontal considerando a anisotropia, minimizar a altura total para reduzir o tempo e o custo de impressão, e imprimir furos verticalmente para garantir maior precisão e evitar o efeito de degraus de escada.

Regra nº 6 de DfAM: Projete para minimizar grandes massas de material.

Massas excessivas de material aumentam o custo, o tempo de impressão e a tensão residual sem agregar valor real, sendo essencial evitar material desnecessário para reduzir a necessidade de suporte e tratamento térmico.

Regra nº 7 de DfAM: Projete para minimizar material de suporte.

A orientação de impressão determina a necessidade e o posicionamento do material de suporte, que afeta diretamente o custo, a qualidade da peça e o tempo de pós-processamento, tornando essencial minimizar o uso de suporte por meio de um design e orientação de impressão estratégicos.

Função primeiro, depois material

Em AM, é mais eficiente primeiro projetar a peça com base em sua função e, depois, selecionar o material mais adequado. Como peças projetadas para AM geralmente requerem menos material, é possível usar materiais de especificação superior sem aumentar o custo em comparação com o design convencional.

Use otimização topológica ou estruturas treliçadas

A AM permite a produção de peças topologicamente otimizadas, uma metodologia que remove matematicamente material não funcional para atingir melhores parâmetros de desempenho. Embora a fabricação tradicional de designs otimizados seja cara ou inviável, a AM viabiliza essas formas complexas, permitindo também o uso de materiais de maior qualidade sem aumentar o custo.

Fonte: Adaptado de Diegel et al. (2020).

2.5.3 Leutenecker-Twelsiek et al. (2016)

Considerando principalmente o contexto de DfAM, Leutenecker-Twelsiek et al. (2016) propuseram uma diretriz centrada no usuário para projetistas, composta por características de processo, princípios de design e regras de projeto com o objetivo de apoiar o projetista em todas as fases do desenvolvimento maximizando as potencialidades da AM.

Um dos pontos de maior destaque no trabalho dos autores é a importância da orientação da peça no processo de DfAM, e como essa decisão influencia diretamente a qualidade, o tempo de produção e os custos das peças fabricadas. A orientação deve ser definida desde as fases iniciais do projeto, uma vez que a natureza camada por camada da AM gera variações significativas em termos de precisão dimensional, qualidade superficial, necessidade de suportes e estabilidade mecânica, dependendo da orientação escolhida. Antecipar essa decisão permite explorar todo o potencial da tecnologia e evitar retrabalhos ou falhas na produção.

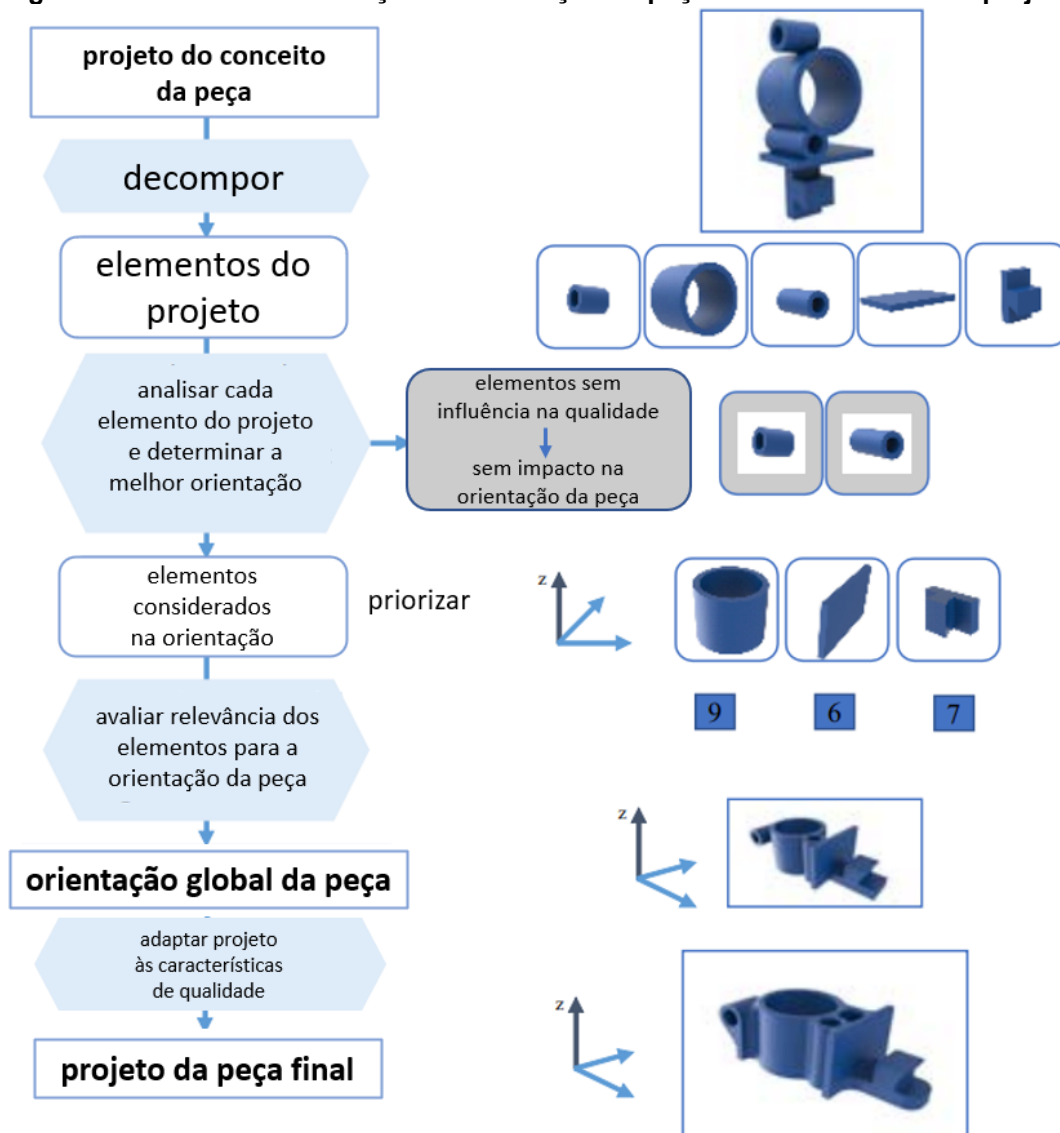
Para sistematizar essa abordagem, os autores propõem um modelo dividido em três componentes principais: características do processo, que descrevem limites e comportamentos específicos de cada tecnologia AM; princípios de design, que orientam como aproveitar a liberdade geométrica para reduzir material e tempo de impressão; e regras de projeto, que estabelecem parâmetros técnicos, como espessura mínima de parede e ângulos máximos de saliência sem suporte, conforme ilustrado na Figura 12.

Entre os princípios apresentados, destaca-se o conceito da determinação antecipada da orientação da peça, que recomenda que a orientação seja definida antes mesmo da conclusão do projeto. Essa prática permite ajustar a geometria e os detalhes da peça para minimizar a necessidade de suportes, reduzir distorções e otimizar o acabamento superficial, conforme indicado no Quadro 6.

Embora o princípio da determinação antecipada da orientação seja altamente relevante para os resultados de peças em AM, o modelo completo proposto por Leutenecker-Twelsiek et al. (2016) não é explorado em profundidade neste trabalho. Isso se deve ao fato de que a proposta de diretrizes aqui apresentada busca manter um caráter mais generalizado, voltado à aplicação do DfAM em processos de

manufatura por extrusão de material (MEX), focando nos aspectos mais amplos e adaptáveis às diferentes realidades práticas.

Figura 12. Processo de definição da orientação da peça nas fases iniciais do projeto



Fonte: Adaptado de Leutenecker-Twelsiek *et al.* (2016).

Da mesma forma que Djokikj e Kandikjan (2022), Leutenecker-Twelsiek *et al.* (2016) concluem que o uso de diretrizes em conjunto com treinamento pode facilmente alterar a mentalidade dos projetistas. Para eles, as instalações de MEX podem ser mais bem exploradas uma vez que os projetistas dominem as características do processo e os princípios de funcionamento. A complexidade da estratégia DfAM é variável. Isso depende de cada caso específico, de recomendações básicas de simplificação até considerações que podem transformar completamente o design devido à função.

Quadro 6. Diretrizes de Leutenecker-Twelsiek et al. (2016)

Princípio de Design: Determinação Antecipada da Orientação da Peça
O princípio de determinação antecipada da orientação de peça na AM propõe que a orientação de construção deve ser definida logo nas primeiras etapas do processo de design, antes de concluir o projeto final. A orientação de impressão afeta diretamente a qualidade da peça (como acabamento, estabilidade dimensional e necessidade de suporte), sendo fundamental para reduzir distorções e melhorar o desempenho mecânico. Esse processo permite que os projetistas aproveitem os benefícios exclusivos da AM, como maior liberdade de design, para criar peças otimizadas desde o início do desenvolvimento. O processo sugerido para determinar a orientação inclui os seguintes passos.
Passo 1: Dividir o conceito de peça em elementos de design. Dividir a peça em elementos de design que representem partes funcionais distintas, como roscas, superfícies de contato ou canais. Essa divisão facilita a análise individual do impacto da orientação em cada elemento.
Passo 2: Avaliar o impacto da orientação nos elementos de design. Se a orientação não afetar a qualidade de um elemento, ele pode ser ignorado na decisão final. Para elementos críticos, o designer deve priorizar características como acabamento, estabilidade e resistência.
Passo 3: Definir a orientação final da peça. A orientação final é determinada com base na melhor posição dos elementos de design, considerando a funcionalidade e o equilíbrio estrutural. A prioridade deve ser reduzir o esforço de pós-processamento e garantir um bom acabamento.
Passo 4: Transferência para o design viável. Após definir a orientação ideal, o design é ajustado para garantir que ele possa ser produzido com eficiência por AM. Isso inclui reforços estruturais, remoção de material desnecessário e otimização de superfícies.

Fonte: Adaptado de Leutenecker-Twelsiek et al. (2016).

Os autores apresentaram um exemplo por meio de um redesenho significativo conduzido em um componente específico, mostrado na Figura 13. Após executar o fluxo de trabalho sugerido, identificar os elementos básicos e analisar quais poderiam ser impactados pela orientação de fabricação, Leutenecker-Twelsiek et al. (2016) reforçaram que essa estratégia permite aos projetistas contornarem ou evitarem certas restrições do processo, já que o projeto é ajustado para atender à capacidade do sistema MEX.

Figura 13. Impacto no projeto da peça após o estudo de orientação para AM



Fonte: Leutenecker-Twelsiek et al. (2016).

2.5.4 Asadollahi-Yazdi et al. (2017)

O trabalho de Asadollahi-Yazdi et al. (2017) propõe um método integrado de DfAM baseado na abordagem *skin-skeleton*. Essa metodologia considera os atributos de uso e de fabricação desde o início do processo de design, permitindo a criação de um modelo de produto mais eficiente e otimizado. A abordagem *skin-skeleton* é dividida em dois componentes principais: *skin* (pele) e *skeleton* (esqueleto). A pele de uso representa a superfície funcional do produto, onde ocorre o fluxo de energia (mecânica, térmica ou elétrica), e o esqueleto de uso representa o trajeto desse fluxo dentro da peça. Do lado da fabricação, a pele de manufatura refere-se às camadas e contornos criados durante o processo de manufatura, enquanto o esqueleto de manufatura corresponde à orientação de construção e aos parâmetros de fabricação.

O trabalho propõe que o modelo *skin-skeleton*, como apresentado no Quadro 7, ajude a definir um modelo de interface entre o design e o processo de fabricação, permitindo que as restrições e atributos de fabricação sejam considerados ainda na fase inicial de projeto. Para otimizar o design, o artigo sugere o uso de TO para definir a estrutura inicial (*skin*) e o algoritmo power crust para criar o esqueleto (*skeleton*), fornecendo uma representação do eixo central da peça. O modelo resultante é então adaptado às limitações e parâmetros da tecnologia de manufatura aditiva escolhida, garantindo que o produto seja fabricável e atenda aos requisitos de desempenho e qualidade. Para o artefato desenvolvido, apenas as considerações de TO foram aproveitadas.

Quadro 7. Diretrizes de Asadollahi-Yazdi et al. (2017)

Abordagem Skin-Skeleton	
Skin:	Define a superfície funcional externa da peça (como acabamento e tolerância).
Skeleton:	Representa o fluxo de material e forças dentro da peça, modelando o comportamento estrutural.
Modelo de interface:	Modelo que conecta a <i>skin</i> (projeto) e o <i>skeleton</i> (processo de fabricação), permitindo a otimização conjunta.
Otimização Topológica:	A otimização topológica permite remover material desnecessário, criando uma peça mais leve e resistente. Usa algoritmos para definir o esqueleto estrutural.

Fonte: Adaptado de Asadollahi-Yazdi et al. (2017).

2.5.5 Adam e Zimmer (2014, 2015); Zimmer e Adam (2012)

Os três trabalhos de Adam e Zimmer (2014, 2015); Zimmer e Adam (2012) apresentam uma abordagem sistemática para o desenvolvimento de Regras de DfAM, com o objetivo de criar um conjunto de diretrizes claras e aplicáveis para diferentes tecnologias de AM, incluindo MEX e outras duas tecnologias. A pesquisa dos autores evoluiu em três etapas principais:

- Primeiro artigo (2012) – Definiu os elementos geométricos básicos (paredes, cilindros e furos) e propôs as primeiras regras de DfAM.
- Segundo artigo (2014) – Expandiu o foco para incluir transições entre elementos e estruturas agregadas, abordando desafios como orientação e estabilidade estrutural.
- Terceiro artigo (2015) – Refinou e validou as regras através de testes práticos, identificando limitações geométricas específicas e consolidando um catálogo de diretrizes técnicas.

O catálogo resultante fornece uma base para projetistas e engenheiros que trabalham com AM, oferecendo detalhes sobre dimensões mínimas, orientação ideal, limitações geométricas e melhores práticas para as tecnologias estudadas, como apresentado pelo Quadro 8. Adam e Zimmer (2014, 2015) e Zimmer e Adam (2012) afirmam que, ao seguir essas regras, é possível maximizar a precisão, a resistência e o desempenho das peças fabricadas por AM, otimizando o processo desde a fase de projeto até a produção final.

Quadro 8. Diretrizes de Adam e Zimmer (2012, 2014 e 2015)

Catálogo de regras para AM MEX	
1. Espessura mínima de parede	1,5 mm – Espessuras menores podem resultar em falhas de adesão entre camadas e baixa resistência mecânica.
2. Orientação de parede	Paralela ou perpendicular à plataforma de construção – Para garantir melhor adesão entre as camadas e reduzir deformações.
3. Altura máxima de parede sem suporte	20 mm – Paredes acima dessa altura tendem a se deformar ou desmoronar devido à baixa resistência estrutural.
4. Espessura mínima para paredes em transição	1,5 mm – Para garantir estabilidade estrutural e evitar quebras em áreas de transição.
5. Diâmetro mínimo de furos	1,0 mm (sem suporte) – Diâmetros menores podem não ser formados corretamente devido à precisão limitada do bico de extrusão. 0,8 mm (com suporte) – Com suporte, é possível criar furos menores sem colapso.
6. Comprimento máximo de furos em relação ao diâmetro	6:1 – Para garantir que o furo fique livre de material residual e mantenha a estabilidade estrutural.
7. Ângulo de overhang para furos	45° – Ângulos acima desse valor requerem suporte adicional para evitar colapso da camada.
8. Diâmetro mínimo externo para cilindros	1,0 mm – Para garantir que o cilindro mantenha sua forma e resistência.
9. Orientação recomendada para cilindros	Paralela à plataforma – Para garantir melhor precisão e estabilidade durante o processo de construção.
10. Espessura mínima em junções e transições	1,5 mm – Para garantir resistência suficiente em áreas de transição entre diferentes elementos.
11. Ângulo de transição mínimo para overhang	45° – Para evitar que o material caia ou deforme durante a construção.
12. Posição ideal na plataforma de construção	Centro da plataforma – Para garantir uniformidade na construção e minimizar tensões internas.
13. Direção de orientação recomendada	Paralela à plataforma – Para reduzir deformações e garantir melhor acabamento superficial.
14. Tolerância dimensional	±0,3 mm – Para compensar variações naturais do processo de extrusão e resfriamento.

Fonte: Adaptado de Adam e Zimmer (2014, 2015); Zimmer e Adam (2012).

2.5.6 BASF Forward AM (2025)

O documento intitulado, em tradução para o português, “Filamentos de Metal Ultrafuse® – Diretrizes para usuários para impressão 3D em peças metálicas”, publicado pela BASF é um guia técnico que explica o processo completo de impressão 3D com filamentos metálicos Ultrafuse®, cobrindo desde a preparação do design até o pós-processamento. Ele detalha parâmetros de impressão, requisitos de equipamentos, processos de D&S, além de técnicas de simulação para prever e corrigir distorções.

O quinto capítulo é chamado “Diretrizes de Design” e destaca aspectos críticos para o sucesso na impressão e sinterização. Apesar do título do capítulo, são abordadas diretrizes de fabricação além das de projeto, sendo elas: tamanho limite da peça, relação máxima entre altura e largura, limite de altura de paredes sem suporte, orientação da peça na plataforma de impressão, calibração da largura de extrusão da impressora, espessura mínima de parede, importância da primeira camada, relevância de uma base plana, cuidados com a remoção da peça, falhas na sinterização, prudência com o resfriamento da peça, adição de arredondamentos ou chanfros em transições de forma, adaptação de características circulares e recomendações para preenchimento.

Afirma-se que cada um desses fatores é detalhado para garantir precisão dimensional, estabilidade estrutural e sucesso no processo de sinterização, evitando falhas como deformações, rachaduras e baixa resistência mecânica. As diretrizes publicadas não estão numeradas originalmente; portanto, foi criada uma numeração para facilitar a discussão. Além disso, as diretrizes de fabricação foram sinalizadas por círculos de cor roxa no Quadro 9.

Quadro 9. Diretrizes da BASF Forward AM (2025)

(continua)

Filamentos de Metal Ultrafuse® – Diretrizes para usuários para impressão 3D em peças metálicas
<p>1. Tamanho da peça O tamanho máximo da peça verde não pode exceder 100 x 100 x 100 mm para caber nas placas cerâmicas que sustentam as peças durante o debinding e a sinterização. Se forem necessárias peças maiores, podem ser feitos acordos especiais com o prestador de serviços de D&S, como Elnik ou DSH. Embora isso seja possível, peças maiores podem sofrer empenamento durante a impressão e geralmente exigem tempos de desenvolvimento mais longos. Peças dentro de um cubo de 60 mm demonstraram ter mais sucesso para novos usuários.</p>
<p>2. Relação altura/largura Relações altura/largura inferiores a 3:1 provaram ser eficazes na prevenção de colapsos ou distorções durante o processo de D&S. Garantir uma base plana também é essencial para reduzir possíveis inclinações que podem levar à distorção da peça. Antes que as partículas de metal estejam completamente fundidas, algumas características podem sofrer afundamento em altas temperaturas. Exemplo de peça com razão entre altura e largura de 8:1 e estrutura em balanço com distorções.</p>
<p>3. Paredes sem suporte Para minimizar o risco de colapso e distorção, as relações altura/largura para paredes sem suporte devem ser inferiores a 6:1. Embora possam ser facilmente impressas, relações acima desse valor resultaram em rachaduras e até mesmo no colapso da peça. Exemplos de falhas em peças que ultrapassaram essa relação, com 8:1, 12:1 e 16:1.</p>
<p>4. Orientação da peça O alinhamento de uma peça na mesa de impressão pode afetar criticamente a precisão, resistência, tempo de impressão e estabilidade durante os processos de D&S. Em geral, as peças devem ser orientadas de forma a fornecer a maior área de superfície possível em contato com a mesa para garantir aderência suficiente durante a impressão e estabilidade durante o pós-processamento.</p>
<p>5. Seleção de Largura de Extrusão ● A largura do material sendo extrudido pelo bico da impressora é chamada de largura de extrusão. A calibração da largura de extrusão é essencial para garantir precisão e densidade da peça. Como a maioria dos fatiadores cria caminhos a partir da camada externa até o centro da peça, lacunas podem ser formadas quando a largura de extrusão não está configurada corretamente para preencher a área.</p>
<p>6. Espessura de parede Paredes finas devem ter pelo menos 1 mm de espessura em seu estado verde. Paredes finas com apenas uma largura de extrusão de 0,4 mm apresentaram grandes distorções durante o processo de sinterização.</p>
<p>7. Primeira camada ● Imprimir uma primeira camada perfeita é o primeiro passo para uma peça FFF bem-sucedida. A primeira camada fixa a peça à superfície de construção; se falhar, todo o trabalho será comprometido. É recomendável uma superfície de construção limpa e nivelada, aquecida a 90-105°C. Produtos como Dimafix ou Magigoo Pro Metal demonstraram fornecer excelente aderência e facilidade de uso.</p>
<p>8. Adesão à plataforma de construção ● A adição de características de impressão extras, não incluídas no modelo da peça, pode ser útil para melhorar a aderência, garantir uma extrusão adequada antes do início da impressão da peça e aumentar a estabilidade. Os exemplos mais comuns incluem: <u>Skirt</u> – Utilizada para preparar o bico e permitir o ajuste do nível da mesa antes do início da impressão da peça. <u>Brim</u> – Reduz a deformação nos cantos e fornece maior área de superfície para seções finas. <u>Raft</u> – Cria uma camada de base grande para a peça se fixar. É uma solução comum para problemas de adesão ou para superfícies de impressão que são difíceis de nivelar.</p>

Quadro 9. Diretrizes da BASF Forward AM (2025)

(conclusão)

Filamentos de Metal Ultrafuse® – Diretrizes para usuários para impressão 3D em peças metálicas	
<p>9. Base plana ●</p> <p>As superfícies inferiores das peças devem ser planas para evitar rachaduras e o risco de colapso durante a sinterização. Superfícies inferiores deformadas, geralmente resultantes de adesão inadequada à mesa, podem fazer com que as peças se inclinem e distorçam ou até colapsem durante o processo de sinterização. Lixar a superfície inferior para garantir que a peça esteja o mais equilibrada e estável possível é o método mais simples para melhorar os resultados do processo de D&S.</p>	
<p>10. Remoção da peça da plataforma ●</p> <p>Deve-se ter cuidado ao remover peças da superfície de construção. Remover uma peça antes de estar completamente resfriada pode causar distorção e até mesmo arrancar as camadas inferiores. Deformações na parte inferior podem causar rachaduras na parte superior da peça durante o sinterização.</p>	
<p>11. Resfriamento da peça ●</p> <p>Embora seja comum em materiais FFF, os filamentos metálicos Ultrafuse® não requerem resfriamento. O uso de resfriamento geralmente resulta em delaminação. Uma exceção é o uso limitado de resfriamento para permitir melhores resultados em pontes (bridging).</p>	
<p>12. Sinterização não corrige rachaduras ●</p> <p>Rachaduras e delaminação vistas durante a impressão só serão amplificadas durante o processo de sinterização. É, portanto, importante enviar apenas peças de alta qualidade para processamento.</p>	
<p>13. Placa de encolhimento ●</p> <p>Deformações na peça, causadas por atrito adesivo na área inferior durante o processo de sinterização, podem ser evitadas com o uso de uma shrinkage plate. Essa placa é revestida com um material inativo para sinterização e colocada sob a peça verde durante o processo de D&S. Ela encolhe uniformemente com a peça verde, eliminando o atrito adesivo na área inferior e minimizando distorções na peça.</p>	
<p>14. Transição</p> <p>Tensões térmicas durante o processo de D&S podem intensificar e amplificar a delaminação de camadas ou rachaduras presentes na peça verde. O uso de raios ou chanfros demonstrou reduzir o surgimento de rachaduras e separação de camadas. Se as restrições geométricas da peça limitarem o reprojeto, a orientação da impressão pode ser adaptada para reduzir distorções geométricas.</p>	
<p>15. Características Circulares</p> <p>As características circulares são mais bem produzidas quando o eixo de rotação está alinhado com a direção de impressão. As impressoras FFF típicas fornecem precisões dimensionais na ordem da largura de extrusão. Para uma largura de extrusão de 0,35 mm, as precisões dimensionais típicas no plano XY são de aproximadamente $\pm 0,35$ mm. A altura da camada está diretamente relacionada à precisão e ao nível de fidelidade da característica, sendo, em grande parte, dependente da impressora utilizada. A relação entre a altura da camada e a precisão dimensional é mais pronunciada em características circulares. Recomenda-se retrabalhar furos roscados, independentemente da direção de impressão ou do tamanho. O diâmetro do furo deve ser reduzido ao diâmetro do furo base para que a rosca possa ser refeita após a sinterização. Furos horizontais podem ter sua geometria adaptada para formato de gota para monoextrusão, isto é, evitar o uso de estruturas de suporte.</p>	
<p>16. Preenchimento</p> <p>Embora muitas peças utilizem 100% de preenchimento para fornecer a maior densidade final e estabilidade durante o processo de D&S, reduções drásticas na massa da peça podem ser obtidas com estruturas de preenchimento. Isso não é possível na maioria dos outros métodos de impressão 3D em metal. As estruturas de preenchimento em FFF permitem a criação de verdadeiras características ocas dentro das peças. Normalmente, preenchimentos abaixo de 50% não são recomendados sem considerações especiais ou adaptações no design da peça.</p> <p>Um padrão de preenchimento retangular de 60% foi utilizado para produzir peças artísticas e proporcionou uma redução de peso superior a 40% em comparação com uma peça de densidade total. Embora maiores quantidades de preenchimento tendam a garantir maior sucesso na primeira tentativa, o aumento na variedade de padrões de preenchimento continua a melhorar a estabilidade da peça, oferecendo oportunidades de economia de peso.</p>	

Fonte: Adaptado de BASF Forward AM (2025).

2.5.7 Markforged (2025)

O documento intitulado, em tradução para o português, “Guia de Design para Impressão 3D com Metais”, publicado pela Markforged é um guia técnico de impressão com filamentos metálicos do sistema Metal X™. O fabricante informa que esse guia apresenta recomendações que podem não refletir todas as implementações, já que a impressão 3D é um processo dependente da geometria.

Estão incluídas informações de referência de design (isto é, projeto), otimização para o processo de impressão, *debinding* e sinterização, além de práticas estratégicas para impressão em metal, pós-processamento e seleção de material. Sendo que os itens mencionados como referências de design envolvem dimensões projetadas para a peça final, a menos que especificado de outra forma. O documento está organizado em categorias sem numeração. Portanto, para fins de padronização, os assuntos foram enumerados e as diretrizes de fabricação também estão sinalizadas com círculos de cor roxa no Quadro 10.

Quadro 10. Diretrizes da Markforged (2025)

(continua)

Guia de Design para Impressão 3D com metais
<p>1. Referência de Design - Tamanho máximo da peça final Dimensões máximas pós-sinterização de uma única peça feita com o sistema Metal X, incluindo fatores de escala, volume de impressão, plataforma de base da peça e bandeja de suporte. O tamanho da peça é limitado pelo tamanho da câmara de impressão, estação de lavagem e forno. Embora peças maiores sejam possíveis, peças típicas de até 100x100x100 mm (ou 100x100x80 mm (CxLxA) para cobre) têm sido as mais bem-sucedidas. Peças maiores podem entortar ou sofrer degradação da integridade estrutural se permanecerem por muito tempo na plataforma de construção ou racharem no forno devido a altas tensões. Apresentadas imagens com dimensões máximas para peças de quatro geometrias diferentes.</p>
<p>2. Referência de Design - Dimensões mínimas da peça O tamanho mínimo da peça é limitado à largura e altura de extrusão da impressora. As dimensões são definidas a partir do número mínimo de camadas de topo, camadas de base e paredes necessárias para imprimir uma peça com sucesso. 2 x 2 x 1,3 mm (XYZ).</p>
<p>3. Referência de Design - Estruturas em balanço sem suporte Este é o ângulo mínimo em relação à horizontal no qual uma característica de uma peça pode ser impressa sem precisar de suportes para sustentação. O Eiger gerará suportes para todos os balanços com ângulos abaixo de θ. θ: 45° para 17-4PH, A2, D2, H13. θ: 50° para inonel e cobre.</p>
<p>4. Referência de Design - Diâmetro mínimo de furo Furos com diâmetro muito pequeno podem se fechar durante a impressão ou serem impressos de forma imprecisa. Furos em superfícies horizontais (Z) são impressos com mais precisão do que em superfícies verticais (XY). XY: 1,5 mm e Z: 1 mm</p>
<p>5. Referência de Design - Diâmetro mínimo de pino Pinos com diâmetro muito pequeno podem não ser impressos ou sinterizados com precisão. Considere adicionar filetes às bases dos pinos para reduzir o potencial de cisalhamento no estado verde. XYZ: 3 mm <u>Nota importante:</u> Evite características independentes com alturas (H) superiores a seis vezes sua largura (W). Essas características são mais suscetíveis a inclinar durante a sinterização. Integre características estruturalmente estáveis, como reforços ou ângulos de inclinação, para dar suporte a elas.</p>
<p>6. Referência de Design - Características mínimas para rebaixos Um rebaixo é uma característica que fica rebaixada em relação à superfície do modelo. Exemplos comuns incluem letras e textura. Rebaixos podem se misturar ao restante do modelo se forem muito pequenos. Apresentada uma imagem com as características dimensionadas e cada dimensão mínima recomendada em diferentes regiões da peça.</p>
<p>7. Referência de Design - Características mínimas para ressaltos Uma característica ressaltada é aquela que fica elevada em relação à superfície do modelo. Exemplos comuns incluem letras e textura. Características ressaltadas podem se misturar ao restante do modelo se forem muito pequenas. Apresentada uma imagem com as características dimensionadas e cada dimensão mínima recomendada em diferentes regiões da peça. <u>Nota importante:</u> Para eliminar lacunas em características com menos de 2 mm de largura, projete os ressaltos para terem múltiplos exatos de 0,25 mm, que é a largura de uma única extrusão de metal após a sinterização.</p>
<p>8. Otimização para impressão - Identificar dimensões críticas Impressoras 3D têm maior precisão em planos paralelos à plataforma de construção. Quais são as dimensões ou características críticas da sua peça?</p>
<p>9. Otimização para impressão - Maximizar o contato com a base Uma maior área de superfície na plataforma de impressão minimiza os suportes e melhora a adesão à base. Qual face da sua peça está em contato com a base?</p>
<p>10. Otimização para impressão - Reduzir os suportes Menos suportes reduzem o tempo de impressão e de processamento. Como você pode projetar para minimizar os suportes? Os suportes em sua peça estão acessíveis?</p>

Quadro 10. Diretrizes da Markforged (2025)

(conclusão)

Guia de Design para Impressão 3D com metais	
11. Otimização para impressão - Modificar estruturas em balanço para otimizar suportes	Os suportes são necessários para evitar o colapso de balanços durante a impressão e sinterização. Considere onde a peça precisará de suportes e o que pode ser feito para minimizá-los, a fim de reduzir o tempo de impressão. Certifique-se de que os suportes na peça sejam fáceis de remover antes de imprimir. Caso contrário, considere modificar os balanços para facilitar a remoção dos suportes.
12. Otimização para lavagem - Aliviar peças espessas	Quanto mais espessa for a peça, maior será o tempo necessário para a lavagem. Remova o material interno de grandes volumes e aumente a área de superfície para minimizar o tempo que suas peças passam na lavagem. Tente manter uma espessura de parede consistente em toda a peça.
13. Otimização para lavagem - Lavar peças de cabeça para baixo ●	Lave peças em formato de vasilha de cabeça para baixo (não é necessário mudar a orientação de impressão). O solvente de lavagem é mais leve que o material aglutinante. Quando colocada de cabeça para baixo, o solvente permeia para dentro da peça, resultando em um tempo de lavagem menor.
14. Otimização para lavagem - Preenchimento triangular x Sólido x Paredes espessas	As configurações de impressão também influenciam os tempos de lavagem e secagem. Paredes e pisos mais espessos levam mais tempo para secar do que peças com preenchimento triangular padrão, mas peças com preenchimento sólido levam um tempo consideravelmente maior do que ambos. Ao planejar a produção de peças com preenchimento sólido, deve-se considerar o ciclo prolongado de lavagem e secagem no cronograma. Os tempos de lavagem dependem da característica com a maior área de seção transversal em uma peça verde.
15. Otimização para sinterização - Reduzir concentrações de tensões	As peças passam por tensões térmicas durante a sinterização, pois elas se contraem enquanto encolhem. Reduza as concentrações de tensão arredondando as bordas e projetando mudanças graduais na espessura.
16. Otimização para sinterização - Garantir estruturas estáveis	À medida que as peças passam pelo processo de sinterização, o calor induz um estado semelhante a argila, tornando-as maleáveis. Se as peças não precisarem de suportes, é recomendado que elas sejam estruturalmente estáveis na orientação de impressão. É importante evitar estruturas com centro de massa elevado, em balanço ou muito altas e finas.
17. Otimização para sinterização - Adicionar suporte em estruturas independentes	Estruturas altas e finas com mais de seis vezes a sua altura podem inclinar ou tombar durante a sinterização. Recomenda-se criar suporte para estruturas independentes adicionando ângulos de inclinação ou nervuras para aumentar sua resistência e estabilidade durante a sinterização.
18. Otimização para sinterização - Adicionar chanfros em arestas inferiores	A borda inferior da peça pode se expandir durante a sinterização. Adicionar um chanfro de 0,5 a 1 mm às bordas inferiores da peça ajudará a evitar a expansão das bordas, especialmente em estruturas pequenas como furos e canais.
19. Otimização para sinterização - Desativar impressão do raft ●	Por padrão, as peças da Metal X são impressas com <i>raft</i> , que garante boa adesão à plataforma de impressão e contração uniforme da peça durante a sinterização, além de estar claramente identificado com o material para ajudar a evitar trocas. Desativar o raft pode ser considerado para peças menores que tenham um bom contato inicial com a base de impressão e que não tenham características que exijam um <i>raft</i> para evitar distorção durante a sinterização. Desativar o raft resultará em uma superfície inferior da peça muito mais lisa.
20. Otimização para sinterização - Ativar preenchimento exposto ●	A opção de preenchimento exposto pode ser usada para obter a máxima redução de peso ou para destacar o preenchimento interno de uma peça. Como a ausência de camadas inferiores na peça reduz o contato com a base de impressão, peças com preenchimento exposto devem sempre ser impressas com o uso de raft. Pequenos pinos verticais podem não ser impressos corretamente nesse modo; também é recomendável evitar superfícies com baixo ângulo (de 1° a 25° em relação à horizontal).

Fonte: Adaptado de Markforged (2025).

2.6 Design Science Research

Pela definição de Rodrigues (2018), a *Design Science Research* (DSR), traduzida para o português como “Pesquisa Científica em Design”, é uma abordagem que contempla dois tipos de problema:

- De ordem prática: que demandam mudanças em um cenário real;
- Problemas de conhecimento: que demandam mudanças no campo do saber.

Esse autor descreve a DSR como design e validação de propostas de soluções para problemas práticos, baseando-se em um paradigma de pesquisa pragmático e visa desenvolver artefatos inovadores para resolver problemas do mundo real. Já para Lacerda *et al.* (2013), a DSR é "um conjunto de técnicas analíticas que possibilita o desenvolvimento de pesquisas em diversas áreas, especialmente na engenharia". Os autores afirmam que o conhecimento gerado por esse método não tem caráter descritivo-explicativo, mas sim prescritivo, o que está alinhado com a abordagem desta pesquisa.

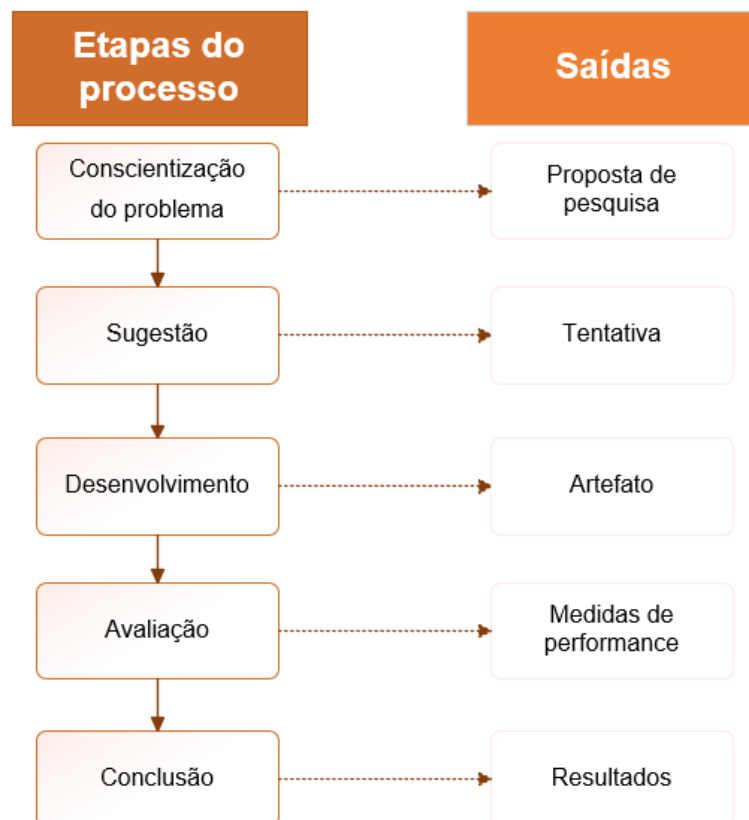
Dresch (2013) aponta que há diversas recomendações sobre como conduzir uma pesquisa utilizando a DSR e identifica seus principais elementos, que garantem sua aplicação efetiva. Na sequência, apresentam-se os itens com um resumo das características mais importantes dessa abordagem.

- a) Objetivos: Desenvolver artefatos que proporcionem soluções adequadas para problemas práticos. Projetar. Prescrever;
- b) Principais atividades (etapas): Definir o problema, Sugerir, Desenvolver, Avaliar e Concluir;
- c) Resultados: Artefatos (constructos, modelos, instâncias) e o aprimoramento de teorias;
- d) Tipo de conhecimento: Como as coisas deveriam ser;
- e) Papel do pesquisador: Criador e/ou avaliador do artefato;
- f) Base empírica: Opcional;
- g) Colaboração entre pesquisador e participantes: Opcional;
- h) Implementação: Opcional;
- i) Avaliação dos resultados: Aplicações, simulações, experimentos;
- j) Abordagem: Qualitativa e/ou quantitativa;
- k) Especificidade: Generalizável a uma determinada classe de problemas

A partir deles, podem-se destacar elementos indispensáveis em uma pesquisa que utiliza a DSR, como a avaliação dos artefatos desenvolvidos, bem como elementos opcionais, como a realização de uma pesquisa com base empírica ou a implementação dos resultados obtidos. Além disso, é relevante observar que a DSR engloba tanto pesquisas com abordagens quantitativas quanto qualitativas.

Com base nisso, é possível afirmar que o contexto apresentado nas seções iniciais deste trabalho está alinhado às características da DSR, cujas etapas são detalhadas pela Figura 14, que apresenta a sequência metodológica verificada por Dresch (2013) a partir das propostas do método de Vaishnavi; Kuechler; Petter (2004) e das saídas de Manson (2006): em cada fase, há uma saída associada, que vai desde a proposta inicial até o resultado da pesquisa.

Figura 14. Etapas de condução da DSR e saídas correspondentes



Fonte: Adaptado de Vaishnavi; Kuechler; Petter (2004).

Segundo Lacerda *et al.* (2013), a avaliação deve ser uma atividade contínua na condução da pesquisa baseada na DSR, assegurando tanto o rigor quanto a relevância da investigação. Assim, além da avaliação final do artefato, recomenda-se realizar avaliações parciais durante cada etapa do desenvolvimento.

Conforme destacado por Lacerda *et al.* (2013), a avaliação final do artefato não substitui a necessidade de realizar avaliações parciais em cada etapa do método da DSR. Essas avaliações intermediárias são fundamentais para garantir que a pesquisa esteja direcionada aos objetivos definidos.

Na primeira etapa, ocorre a identificação do problema e a definição da motivação para a pesquisa. O pesquisador deve justificar sua relevância e aplicabilidade. Lacerda *et al.* (2013) explicam que o principal resultado da conscientização é a definição e a formalização do problema a ser solucionado, suas fronteiras (ambiente externo) e as soluções satisfatórias necessárias.

Após essa etapa inicial, é essencial realizar uma revisão sistemática da literatura, como indicado por Silva (2009). O objetivo é identificar o panorama das soluções empíricas existentes. Lacerda *et al.* (2013) esclarecem: "Esta 'revisão empírica' deve consistir na busca e identificação dos artefatos que procuram encaminhar soluções ao problema em tela".

A segunda etapa, sugestão, envolve a exploração das alternativas disponíveis para resolver o problema de maneira satisfatória. Ao final dessa fase, espera-se identificar um conjunto de possíveis artefatos e selecionar aqueles que serão desenvolvidos. Essa etapa é caracterizada por subjetividade e especificidades, não sendo padronizável. Segundo Lacerda *et al.* (2013), deve-se detalhar as classes de problemas, os artefatos já existentes e suas limitações. Dresch (2013) complementa, afirmando que, ao final da etapa, as premissas e os requisitos para a construção do artefato devem estar claros e devidamente documentados.

A terceira etapa corresponde ao desenvolvimento do artefato, resultando em sua implementação funcional. Lacerda *et al.* (2013) observam que o desenvolvimento não se limita à criação de um produto, mas também envolve a geração de conhecimento útil para resolver problemas, aprimorar sistemas existentes e criar soluções. É nessa etapa que o pesquisador deve definir como o artefato será avaliado.

Na quarta etapa, de avaliação, o pesquisador analisa como o artefato se comporta na resolução do problema proposto. Dresch (2013) explica que, na Avaliação o investigador deve comparar os resultados obtidos da atuação do artefato com o que havia sido definido como requisitos para a solução do problema, isto é, a segunda etapa do método.

A DSR exige que o artefato seja avaliado de forma rigorosa, verificando seu desempenho no contexto para o qual foi projetado. Ainda de acordo com Lacerda *et*

al. (2013), a validade científica, caracterizada pelo rigor na elaboração e execução da pesquisa, não assegura, por si só, a validade prática, relacionada à eficácia e eficiência no contexto organizacional. O principal resultado do processo de avaliação consiste em registros detalhados e nas métricas de desempenho obtidas, que servem como evidência final da adequação do artefato.

A escolha do método de avaliação deve considerar os objetivos do artefato, sua estrutura e o ambiente em que será aplicado. Lacerda *et al.* (2013) destacam que a DSR abrange diversos métodos de avaliação, conforme especificados no Quadro 11.

Quadro 11. Métodos para avaliação dos artefatos

Forma de Avaliação	Métodos Propostos
Observacional	<p>Estudo de Caso: Estudar o artefato existente, ou não, em profundidade no ambiente de negócios.</p> <p>Estudo de Campo: Monitorar o uso do artefato em projetos múltiplos. Esses estudos podem, inclusive, fornecer uma avaliação mais ampla do funcionamento dos artefatos configurando, dessa forma, um método misto de condução da pesquisa.</p>
Analítico	<p>Análise Estatística: Examinar a estrutura do artefato para qualidades estatísticas.</p> <p>Análise da Arquitetura: Estudar o encaixe do artefato na arquitetura técnica do sistema técnico geral.</p> <p>Otimização: Demonstrar as propriedades ótimas inerentes ao artefato ou então demonstrar os limites de otimização no comportamento do artefato.</p> <p>Análise Dinâmica: Estudar o artefato durante o uso para avaliar suas qualidades dinâmicas (por exemplo, desempenho).</p>
Experimental	<p>Experimento Controlado: Estudar o artefato em um ambiente controlado para verificar suas qualidades (por exemplo, usabilidade).</p> <p>Simulação: Executar o artefato com dados artificiais.</p>
Teste	<p>Teste Funcional (Black Box): Executar as interfaces do artefato para descobrir possíveis falhas e identificar defeitos.</p> <p>Teste Estrutural (White Box): Realizar testes de cobertura de algumas métricas para implementação do artefato (por exemplo, caminhos para a execução).</p>
Descritivo	<p>Argumento informado: Utilizar a informação das bases de conhecimento (por exemplo, das pesquisas relevantes) para construir um argumento convincente a respeito da utilidade do artefato.</p> <p>Cenários: Construir cenários detalhados em torno do artefato, para demonstrar sua utilidade.</p>

Fonte: Adaptado de Hevner *et al.* (2004).

A conclusão, quinta e última etapa, é o momento em que o pesquisador deve comunicar e discutir formalmente sua pesquisa à comunidade acadêmica e profissional. Para Lacerda *et al.* (2013), a DSR parte do princípio de que os problemas enfrentados pelas organizações são, em grande parte, específicos. Essa

particularidade poderia dificultar a criação de um conhecimento que possa ser amplamente aplicado. No entanto, Van Aken (2004) defende que as prescrições e os artefatos desenvolvidos sejam generalizáveis, sendo assim aplicáveis a uma classe de problemas.

Lacerda *et al.* (2013) argumentam que tanto os problemas reais quanto os artefatos que os resolvem de maneira eficaz são sempre específicos dentro de seu contexto. No entanto, eles podem compartilhar características com outras situações, o que possibilita a generalização e contribui para o avanço do conhecimento em determinada área. Assim, as soluções desenvolvidas por meio da DSR não devem ser apenas respostas isoladas para um problema específico, mas sim aplicáveis a uma classe de problemas, sejam eles de natureza prática ou teórica.

De acordo com Simon (1996), um artefato é um objeto artificial caracterizado por seus objetivos, funções e adaptações. Já Lacerda *et al.* (2013) definem artefato como a organização dos componentes de um ambiente interno para alcançar objetivos dentro de um ambiente externo. Esses artefatos podem ser classificados em constructos, modelos, métodos e instanciações, cujas características são resumidas no Quadro 12.

De acordo com Lacerda *et al.* (2013), os métodos e as instanciações são os artefatos de maior relevância nesse método. Para os autores, as instanciações frequentemente geram controvérsias quanto à sua definição. Elas indicam como implementar ou utilizar um determinado artefato, bem como seus possíveis resultados. Dessa forma, podem estar associadas a um artefato específico ou à articulação de vários artefatos para alcançar um determinado resultado dentro de um contexto Lacerda *et al.* (2013).

Durante as etapas de Sugestão e Desenvolvimento, o pesquisador tem a possibilidade de definir os requisitos necessários para garantir o funcionamento adequado do artefato, considerando o efeito desejado no ambiente onde será aplicado. Após a etapa de Avaliação, torna-se possível explicitar os limites do artefato, suas condições de uso e os cenários nos quais será útil. Com isso, a solução pode ser generalizada para a classe de problemas à qual o problema inicial pertence. Um exemplo dessa relação entre classe de problemas e artefato é o uso do Kanban (artefato) para planejamento e controle de produção (classe de problemas) (Dresch, 2013).

Quadro 12. Tipos de artefatos previstos pela DSR

Tipos de Artefato	Descrição
Constructos	Constructos, também conhecidos como conceitos, constituem o vocabulário de um determinado domínio. Eles representam a conceituação usada para descrever os problemas dentro desse contexto e para definir as soluções correspondentes. A formulação dessas conceituações é fundamental tanto para as ciências naturais quanto para a ciência do design, pois facilita a compreensão e a comunicação dentro da área de estudo.
Modelos	Um Modelo é um conjunto de proposições ou declarações que expressam as relações entre os constructos. Os Modelos são considerados representações da realidade que apresentam tanto as variáveis de determinado sistema, como também suas relações. Cientistas naturais muitas vezes usam o termo 'modelo' como sinônimo de 'teoria'. Embora tenda a ser impreciso sobre detalhes, um modelo precisa sempre capturar a estrutura da realidade para ser uma representação útil.
Métodos	Um Método é um conjunto de passos (um algoritmo ou orientação) usado para executar uma tarefa. Os Métodos podem estar ligados aos Modelos, sendo que as etapas do Método podem utilizar partes do Modelo como uma entrada. Além disso, favorecem a transformação de sistemas, em busca de sua melhoria. Os Métodos são criações típicas das pesquisas fundamentadas em Design Science.
Instanciações	Uma instanciação é a concretização de um artefato em seu ambiente. Consiste em um conjunto coerente de regras que orientam a utilização dos artefatos (Constructos, Modelos e Métodos) em um determinado ambiente real.

Fonte: Adaptado de Lacerda *et al.* (2013).

2.7 Considerações sobre a revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica realizada revelou uma lacuna no conhecimento existente no campo de DfAM e metal MEX. Esta escassez de estudos é ainda mais evidente ao buscar trabalhos desenvolvidos em ambas as áreas.

Embora os fabricantes de filamentos com cargas metálicas tenham disponibilizado documentos para orientar os usuários, é sensato considerar que os conceitos de DfAM para MEX de polímeros apresentados na literatura podem ser úteis para metal MEX. Assim, as soluções desenvolvidas por meio da DSR não devem ser apenas respostas isoladas para um problema específico, mas sim aplicáveis a uma classe de problemas, sejam eles de natureza prática ou teórica.

O método detalhado no capítulo subsequente proporciona uma abordagem sistemática e abrangente para investigar e compreender os desafios e potenciais da aplicação da DfAM para metal MEX.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo inicia com a apresentação dos equipamentos, materiais e ferramentas utilizados nesta pesquisa. Na sequência, cada uma das cinco etapas do método DSR - empregado para desenvolver o artefato, que são as diretrizes de Design para Manufatura Aditiva para extrusão de material com carga de aço inoxidável 17-4PH – será apresentada em uma seção específica. As características deste método o tornam adequado para esta pesquisa. No fluxograma da Figura 15 as etapas do DSR construído nesta pesquisa estão esquematizadas.

3.1 Equipamentos, materiais e ferramentas

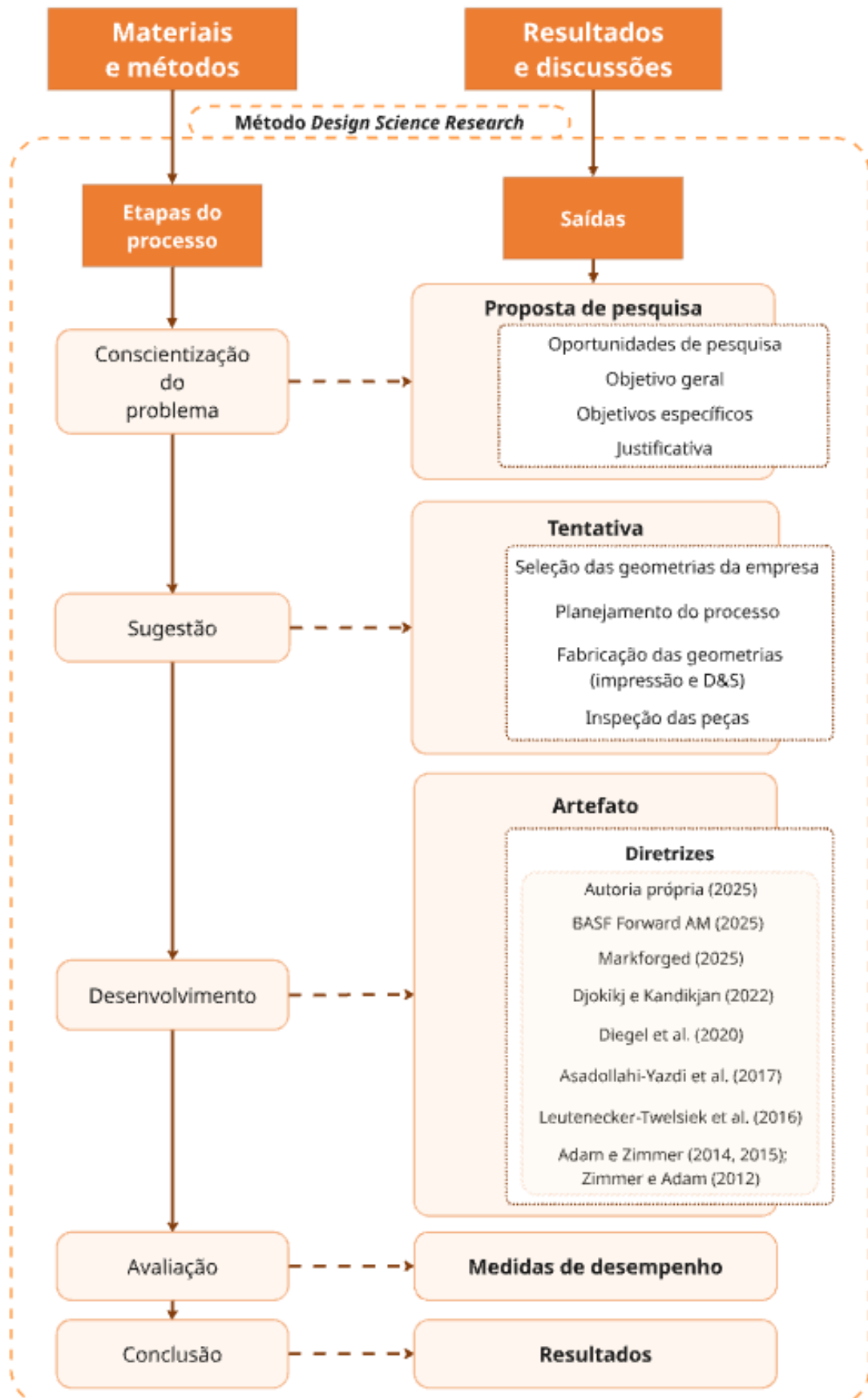
O Quadro 13 apresenta as matérias-primas, os insumos, os equipamentos e os programas de computador utilizados para a viabilidade do trabalho.

A impressora 3D, os filamentos e os insumos para estudo foram escolhidos a partir de uma análise das necessidades do projeto, alinhada com a disponibilidade comercial. A escolha levou em conta a existência de suporte autorizado do revendedor da impressora e a disponibilidade de documentação técnica dos materiais.

A UltiMaker S3 é uma impressora de bancada de dupla extrusão com volume de construção de 230 x 190 x 200 mm (XYZ). Com configuração cinemática de Core XY, o cabeçote é movimentado ao longo dos eixos X e Y e a plataforma de construção é movimentada ao longo do eixo Z para ajustar a altura da camada de impressão.

Além disso, o fabricante desse equipamento disponibiliza núcleos de impressão (denominados *print cores* em inglês) específicos para utilização de filamentos com carga metálica e filamentos de interface de suporte para metal MEX. Devido à sua estrutura simplificada, como mostrado na Figura 16, a substituição desses consumíveis é facilitada permitindo versatilidade no uso de filamentos compósitos e poliméricos sem a utilização de ferramentas.

Figura 15. Fluxograma do trabalho de acordo com a abordagem metodológica do DSR



Fonte: Autoria própria (2025).

Quadro 13. Materiais e programas de computador utilizados

Etapa		Descrição	Especificações	Tipo	Fornecimento
Manufatura	Impressão	Impressora para MEX	UltiMaker S3	Equipamento	UTFPR
		Núcleo de impressão para material com carga metálica	Print Core UltiMaker CC 0.4	Consumível	UTFPR
		Núcleo de impressão para material de interface com o suporte	Print Core UltiMaker DD 0.4	Consumível	UTFPR
		Filamento com carga metálica	BASF Ultrafuse® 17-4PH	Consumível	UTFPR
		Filamento interface com o suporte	BASF Ultrafuse® Support Layer	Consumível	UTFPR
		Filamento para limpeza dos núcleos	Braskem PP	Consumível	UTFPR
		Adesivo	Adesivo Magigoo Pro Metal	Consumível	UTFPR
		Planejamento de processo	UltiMaker Cura 5.3.0	Programa	Gratuito
		Computador com câmera	Notebook Acer Aspire 5	Equipamento	Aquisição própria
		Programa para acesso remoto	Anydesk	Programa	Gratuitos
		Smartphone com Anydesk para monitoramento	Samsung A52s 5G	Equipamento	Aquisição própria
	Debinding	<i>Debinding</i> catalítico	Sigilo industrial	Serviço	Parceria Up3D
	Sinterização	Sinterização	Sigilo industrial	Serviço	Parceria Up3D
Análise	Modelos	Programa para modelagem 3D	SOLIDWORKS	Programa	UTFPR
	Matéria-prima	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	Hitachi TM3000	Equipamento	Bosch
Dissertação e apresentação		Microsoft Word	Microsoft Office 365	Programa	Aquisição própria
		Microsoft Power Point	Microsoft Office 365	Programa	Aquisição própria
		Microsoft Excel	Microsoft Office 365	Programa	Aquisição própria
		Microsoft Visio	Microsoft Office 365	Programa	Aquisição própria

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 16. Exemplo de núcleo de impressão da UltiMaker.



Fonte: UltiMaker Store (2025).

O Quadro 14 apresenta a relação dos tipos de núcleos de impressão e os materiais compatíveis.

Quadro 14. Tipos de núcleos de impressão e materiais compatíveis

Núcleo de impressão (<i>print core</i>)	Materiais compatíveis
AA	Materiais de construção, como PLA, PETG, ABS e material de suporte Breakaway
BB	Material de suporte solúvel em água PVA
CC	Materiais compósitos, como Ultimaker PET CF e BASF Ultrafuse
DD	Material de suporte para peças com carga metálica chamado Support Layer Material

Fonte: Autoria própria (2025).

O sistema da impressora indica inconsistências com relação a utilização de materiais compatíveis com os núcleos de impressão em uso, evitando que os filamentos com carga metálica e cerâmica diminuam a vida útil de núcleos de impressão tipo AA e BB, para polímeros mais comuns e para PVA, respectivamente.

De acordo com o fabricante, os núcleos de impressão tipo CC e DD, com ponta de rubi, foram desenvolvidos justamente para suportar o uso de materiais abrasivos. Apesar da UltiMaker ter lançado uma melhoria nesses núcleos de impressão (UltiMaker, 2021) - trocando para bico de aço endurecido revestido por nitreto de titânio para aumentar a confiabilidade e bloco de aquecimento de alumínio para aumentar a condutividade -, os insumos utilizados no estudo foram os da versão anterior – com ponta de rubi e bloco de aquecimento de latão.

Uma recomendação do fabricante, confirmada pelo representante, é fazer a limpeza dos núcleos de impressão antes de todas as impressões. Para isso, informou-se que podem ser utilizados os materiais UltiMaker *Cleaning Filament*, polipropileno (PP) e poliácido láctico (PLA), nessa ordem de preferência para os núcleos de impressão CC e DD. Por ser um material que pode ser utilizado tanto para limpeza dos núcleos quanto para impressão de peças, foi adquirido o PP.

Além disso, é recomendado utilizar o adesivo Magigoo Pro Metal, desenvolvido especificamente para garantir a adesão de materiais com carga metálica na plataforma de construção. Uma vez que esses materiais possuem características de polímeros termoplásticos e estão expostos ao resfriamento térmico diferencial durante a MEX, as peças são suscetíveis a empenamento.

O adesivo também é indicado para a remoção das peças da plataforma sem causar deformações por manuseio inadequado, visto que é possível remover a peça

de forma facilitada por imersão em água, contribuindo para a integridade da geometria até depois da sinterização.

As subseções a seguir apresentam mais detalhes sobre a matéria-prima utilizada.

3.1.1 Filamento BASF Ultrafuse® 17-4PH

Com relação ao material, apesar das diretrizes propostas serem genéricas, podendo ser utilizadas tanto para o BASF Ultrafuse® 17-4PH quanto para o 316L, a escolha do 17-4PH deu-se principalmente por conta da limitação dos processos de D&S dos fornecedores aos quais se tem acesso no Brasil. Os equipamentos das empresas podem ser utilizados para o processamento das peças verde e marrom normalmente, já que uma das empresas é especializada em MIM e outra utiliza equipamentos da Raise3D.

No entanto, foi levantada a informação de que o material BASF Ultrafuse® 316L raramente é processado por falta de utilização, enquanto o BASF Ultrafuse® 17-4PH é processado com maior frequência, apesar de variável. Dessa forma, para tentar mitigar os riscos de atraso no cronograma, decidiu-se por estudar o 17-4PH para aproveitar os lotes de processamento desse material.

De acordo com Costa *et al.* (2008), esse material é um aço inoxidável martensítico da família denominada endurecíveis por precipitação (PH - *Precipitation Hardening*) e combina boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão em temperaturas de até aproximadamente 700°C, além de também possuir uma resistência moderada à corrosão em atmosferas de névoa salina. O 17-4PH (ASTM A564 TYPE 630) apresenta algumas propriedades, como resistividade elétrica, expansão térmica e condutividade térmica semelhantes às dos aços austeníticos e duplex. Ademais, sua resistência mecânica, após tratamento térmico de envelhecimento, é superior à dos aços austeníticos, como AISI 304 e 316.

Como já mencionado, para viabilizar a extrusão entre 230°C e 250°C de um material metálico com ponto de fusão de aproximadamente 1400°C, é necessário criar um filamento compósito de metal-polímero, envolvendo pó metálico de 17-4PH em uma matriz polimérica. O polióxido de metileno (cujá sigla é POM e é conhecido também como poliacetal) é um polímero comumente utilizado para esse fim (BASF FORWARD AM, 2022b).

O foco desse estudo é nas características das peças fabricadas e a utilização de diretrizes de projeto para manufatura aditiva. Portanto, a análise das propriedades dos materiais utilizados não foi realizada porque são materiais comerciais e o fabricante disponibiliza a ficha técnica, apresentada na íntegra em formato adaptado no ANEXO A. Além disso, outros autores, como Zhang *et al.* (2024) e pesquisadores do NUFER da UTFPR já fizeram essas análises.

3.1.2 Filamento BASF Ultrafuse® Support Layer

Como é recomendado utilizar os filamentos com carga metálica em conjunto com o BASF Ultrafuse® Support Layer para minimizar pós-processamento das peças metálicas, esse material também foi utilizado. Descrito como um filamento compósito baseado em POM na ficha técnica disponibilizada pelo fabricante, que está no ANEXO B foi desenvolvido justamente para criar uma barreira entre a peça e o suporte durante a sinterização e facilitar a separação do suporte metálico da peça metálica (BASF FORWARD AM, 2022c).

3.2 Etapa 1 do DSR: Conscientização do problema

A etapa de Conscientização do Problema e sua respectiva saída, a Proposta de Pesquisa, foram tratados no primeiro capítulo. Ao apresentar uma proposta de diretrizes para o projeto de peças metálicas nesse processo, pretende-se oferecer um referencial para profissionais que desejam adotar a tecnologia, reduzindo incertezas e riscos financeiros. Esse conhecimento pode beneficiar setores que utilizam materiais metálicos e necessitam de fabricação eficiente para componentes complexos em pequenas quantidades, como peças personalizadas, variantes de componentes e reposição de itens descontinuados.

3.3 Etapa 2 do DSR: Sugestão

Esta etapa do DSR envolve a execução de tentativas que guiam a elaboração do artefato. Dessa forma, optou-se por trabalhar com geometrias disponibilizadas pela empresa parceira para iniciar o estudo das diretrizes já publicadas em literatura por pesquisadores e fabricantes da tecnologia.

As geometrias selecionadas não representam a diversidade de desafios do DfAM para metal MEX, com paredes finas ou geometrias vazadas complexas, mas seguiu-se com essas geometrias pela oportunidade de pesquisa oferecida pela empresa.

A seguir são apresentadas as fases percorridas para se obter tais geometrias, que envolvem: (1) a seleção de geometrias disponibilizadas pela empresa parceira, (2) o planejamento de processo, (3) a fabricação das geometrias e (4) a inspeção e a discussão das peças.

3.3.1 Seleção das geometrias da empresa parceira

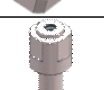
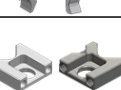
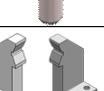

Com o objetivo de conhecer as pessoas responsáveis e compreender as aplicações das peças candidatas ao estudo, foi realizada uma visita à empresa parceira, que atua no ramo de produção de peças para o setor automotivo, em 12 de junho de 2023. Na visita, foi feita uma pré-seleção de componentes submetidos às mais diversas solicitações nas linhas de processos produtivos. As peças são dispositivos, gabaritos e acionadores utilizados para posicionar e fabricar componentes, o que resulta em um grupo de geometrias com grande variedade e baixo volume.

Esse cenário é um ambiente ideal para utilização da AM, que pode trazer benefícios para a empresa ao aumentar a independência da Engenharia de Manufatura em relação ao cronograma da Ferramentaria, que geralmente é concorrido. Ao todo, dez geometrias foram pré-selecionadas conforme ilustra o Quadro 15.

Em cumprimento com o “objetivo específico b”, a escolha dessas peças considerou critérios de aplicabilidade e alinhamento com os objetivos propostos, observando acessibilidade ao material, complexidade de geometria, dimensões e condições de trabalho (como temperatura e pressão).

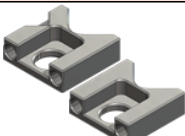
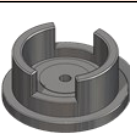

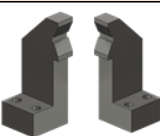
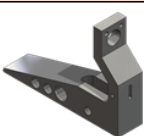
Os modelos tridimensionais das cinco peças selecionadas estão apresentados no Quadro 16, com códigos e descrições simplificados, de modo a preservar a confidencialidade da empresa e facilitar sua identificação ao longo do estudo. As peças foram agrupadas por similaridade geométrica em cinco categorias, denominadas pelas letras de A a E.

Quadro 15. Geometrias pré-selecionadas em conjunto com a empresa parceira

ID	Descrição	Material/ Tratamento térmico	Imagem referência	ID	Descrição	Material/ Tratamento térmico	Imagem referência
1	Gabarito perfil para polia	SAE M2 (dureza 61-63 HRC)		6	Dispositivo para montar eixo polia	Pinhão, ferramenta para polia e bucha de bronze	
2	Matriz para montar eixo no rolamento	SAE 4340 (dureza 50-52 HRC)		7	Matriz cilindro		
3	Indexador	Bronze		8	Garras direita e esquerda ø55 - ø60	SAE 1045	
4	Pino Alimentador	SAE 4340		9	Garras robô com e sem sensor para assentamento	SAE 1020 (cementado e temperado, camada 0.4-0.6mm, dureza 430-500 HV)	
5	Garras direita e esquerda	SAE 1020		10	Gatilho	SAE 4340 (dureza 46-48 HRC)	

Fonte: Autoria própria (2025).

Quadro 16. Peças selecionadas e novas denominações











Modelo	A	B	C	D	E
Descrição	Garra robô sensor e garra robô	Matriz base	Matriz cilindro	Garra direita e garra esquerda	Gatilho
Desenho referência					

Fonte: Autoria própria (2025).

As informações que contribuíram para a seleção das peças são apresentadas na quarta coluna do Quadro 17 e a quinta coluna indica respectivamente, com as cores verde e vermelha, quais peças foram selecionadas ou não para o estudo. A redução visou assegurar a viabilidade do estudo e otimizar o uso de recursos disponíveis.

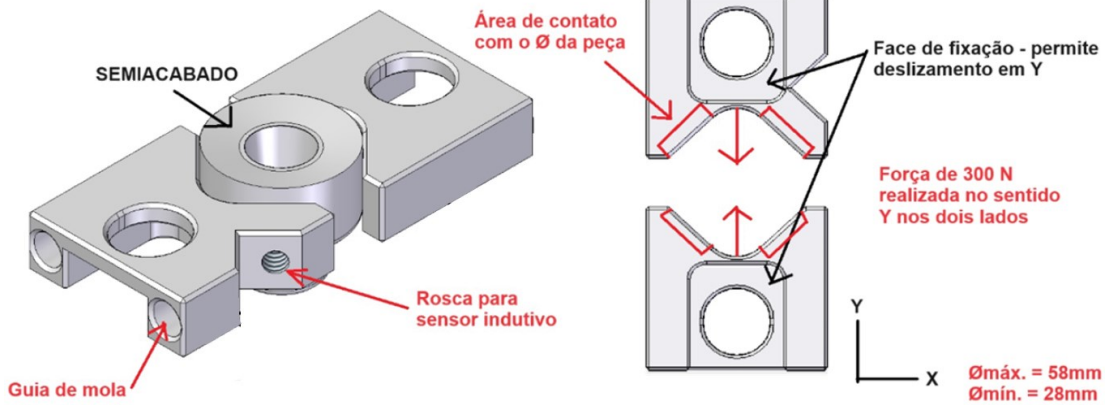
Após a seleção, foi solicitado à empresa parceira que compartilhasse informações sobre as condições de contorno de cada componente, como mostrado nas Figuras 17, 18 e 19.

Quadro 17. Seleção das geometrias a serem estudadas

ID	Descrição	Imagem	Informações	Selecionada ou não?
1	Gabarito perfil para polia		Desconsiderada devido à sua simplicidade de geometria, característica que limita o aproveitamento do potencial oferecido pela AM, que, como já mencionado, é um processo com capacidade de fabricar peças com geometrias complexas e, assim, peças de concepção simplificada não explorariam plenamente suas possibilidades tecnológicas.	Não selecionada
2	Matriz para montar eixo no rolamento		Selecionada devido ao material não ser tão crítico para a funcionalidade, à possibilidade de modificações, às dimensões médias e à simplicidade de solicitações, apesar da carga à qual é submetida ser alta.	Selecionada
3	Indexador		Desconsiderada devido à necessidade dessa peça ser de bronze, material que apresenta características diferentes do aço inoxidável 17-4PH.	Não selecionada
4	Pino Alimentador		Desconsiderada devido à geometria não se mostrar compatível com as características do processo de MEX, como, por exemplo, a ausência de superfícies retas para contato com a plataforma de construção e geometrias circulares que possivelmente seriam impressas como degraus de escada.	Não selecionada
5	Garras direita e esquerda		Selecionadas devido ao material não ser tão crítico para a funcionalidade, à possibilidade de modificações, às dimensões serem pequenas e à simplicidade das solicitações às quais são submetidas.	Selecionada
6	Dispositivo para montar eixo polia		Desconsiderada por apresentar geometrias detalhadas em dimensões muito pequenas, o que é incompatível com a precisão alcançada pelos processos de MEX disponíveis para o estudo, além da necessidade de uma bucha de bronze ser montada por interferência como parte do componente.	Não selecionada
7	Matriz cilindro		Selecionada devido às similaridades das condições de contorno com o Modelo 2 (matriz para montar eixo no rolamento) com as dimensões como principais diferenças.	Selecionada
8	Garras direita e esquerda ø55 - ø60		Desconsideradas por serem peças de grandes dimensões, inviáveis de serem impressas na plataforma de construção da impressora disponível para a pesquisa. Ademais, essas peças são utilizadas em uma aplicação bastante severa, com solicitações mecânicas, temperatura alta e em contato com substâncias químicas.	Não selecionada
9	Garras robô com e sem sensor para assentamento		Selecionadas devido às possibilidades de modificações, às dimensões e à simplicidade das solicitações às quais são submetidas. Apesar de haver especificação de tratamento térmico, considerou-se que as peças em aço 17-4PH poderiam cumprir a função das peças originais já que não seria tão crítico para a funcionalidade.	Selecionada
10	Gatilho		Selecionada devido ao material não ser tão crítico para a funcionalidade, à possibilidade de modificações, às dimensões médias e à simplicidade de solicitações. Considerada a peça de geometria mais complexa dentre as escolhidas.	Selecionada

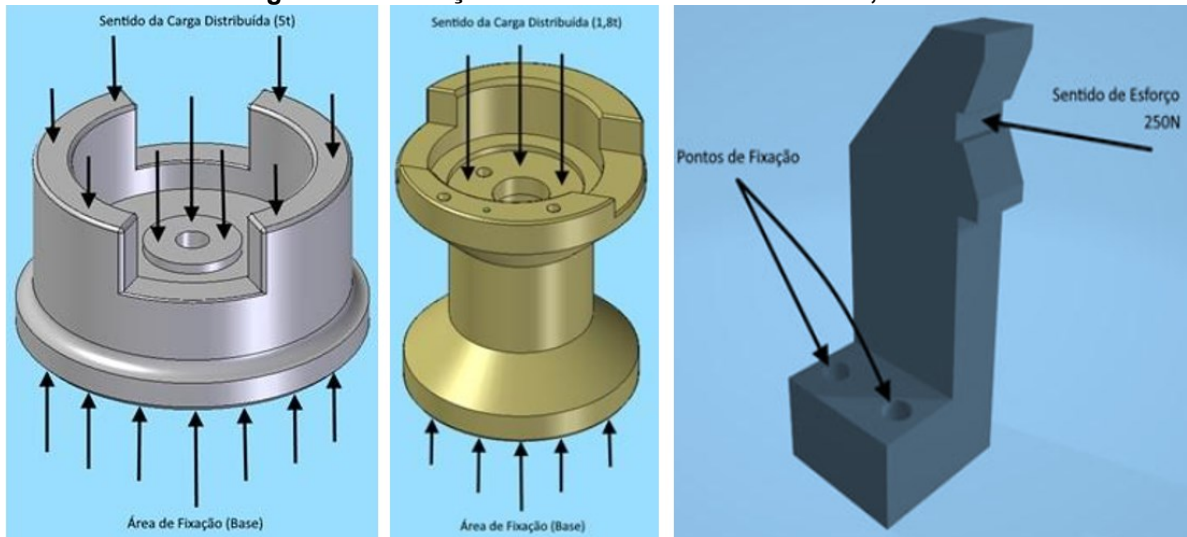
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 17. Condições de contorno do Modelo A



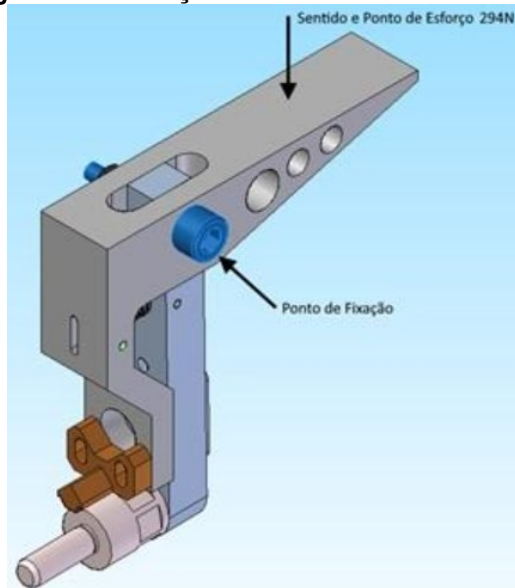
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 18. Condições de contorno dos Modelos B, C e D



Fonte: Autoria própria (2025).

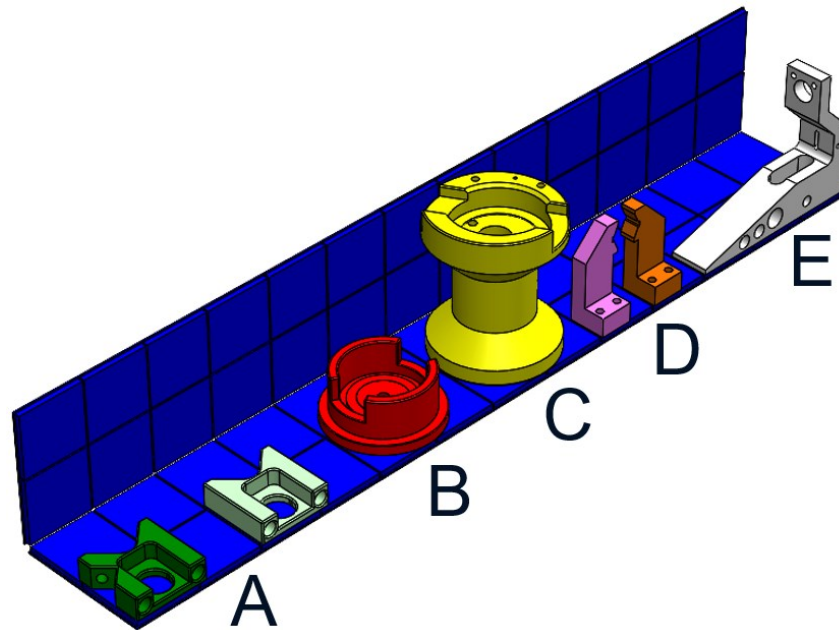
Figura 19. Condições de contorno do Modelo E



Fonte: Autoria própria (2025).

As geometrias foram recebidas em formato STL e remodeladas no programa SolidWorks, uma vez que é essencial ter os modelos 3D acessíveis e parametrizados para possíveis modificações ao longo do projeto. A Figura 20 mostra os modelos 3D das peças escolhidas lado a lado em um fundo composto por quadrados de 50 x 50 mm com a finalidade de mostrar a proporção entre as geometrias.

Figura 20. Modelos selecionados lado a lado para visualização de proporção



Fonte: Autoria própria (2023).

As peças selecionadas foram impressas em PLA e ABS em diferentes cores, conforme mostrado na Figura 21, para melhorar a percepção das geometrias e facilitar o processo de geração de ideias durante o desenvolvimento.

Figura 21. Peças selecionadas impressas em polímero



Fonte: Autoria própria (2023).

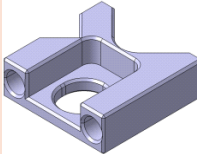
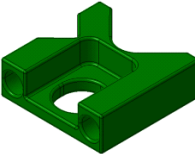
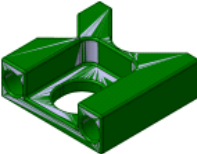
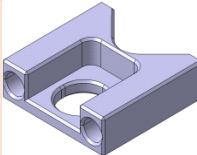
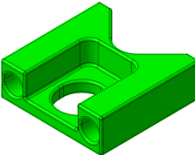
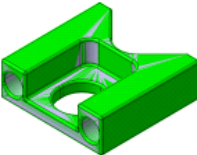
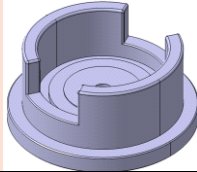
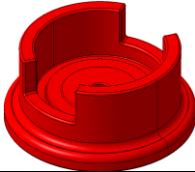
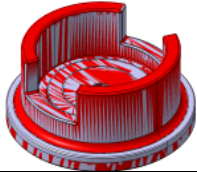
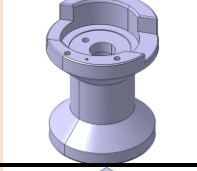
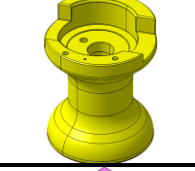
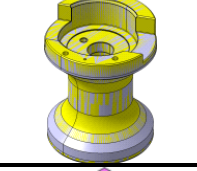
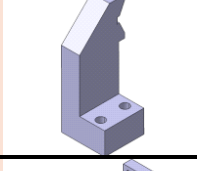
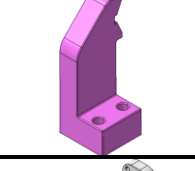
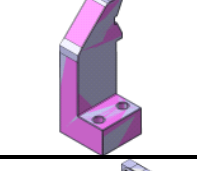
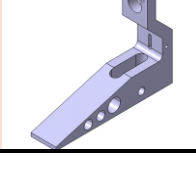
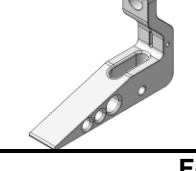

Após a impressão, diversos arredondamentos foram adicionados nas geometrias originais com a finalidade de evitar possíveis acúmulos de tensão no processo de impressão metal MEX.

O Quadro 18 compara os modelos originais com as geometrias com arredondamentos e apresenta na última coluna uma descrição detalhada das modificações.

Evitou-se fazer modificações significativas nas peças, mesmo tendo-se em mente que algumas regiões poderiam colapsar ou trincar durante a fabricação com material metálico. Modificações mais expressivas conduzidas com base em DfAM serão alinhadas em conjunto com a empresa parceira e aplicadas a partir do segundo lote.

Nesse momento, a recomendação do fabricante do material de adaptar estruturas circulares para a morfologia similar ao formato de gota não foi atendida para evitar que mais uma variável fosse incluída no estudo antes mesmo dela apresentar algum resultado positivo.

Quadro 18. Modelos originais e modificações para primeiro lote do estudo

	Geometria original	Geometria com arredondamentos	Sobreposição de geometrias	Modificações
<p>Garra Robô Sensor Modelo A1</p>   				<p>Os chanfros e cantos vivos dos Modelos A foram substituídos por raios de 1 mm.</p>
<p>Garra Robô Modelo A2</p>   				
<p>Matriz Base Modelo B</p>   				<p>Os raios de 1 mm e 0,5 mm no topo do Modelo B foram mantidos. Foram adicionados raios de 0,5 mm nos cantos vivos da região central da peça e raios de 3 mm na base da peça.</p>
<p>Matriz Cilindro Modelo C</p>   				<p>Foram adicionados raios de 20 mm nos três cantos vivos do corpo do Modelo C. No canto vivo entre o topo e o corpo da peça foi adicionado um raio de 5 mm. Nos outros cantos vivos da peça, tanto no topo quanto na base, em furos e ressaltos menores, foram adicionados raios de 0,5 mm.</p>
<p>Garras Direita e Esquerda Modelos D1 e D2</p>   				<p>Os dois maiores arredondamentos acrescentados ao Modelo D foram de 10 mm e 5 mm. Os outros cantos vivos receberam raios de 0,5 mm.</p>
<p>Gatilho Modelo E</p>   				<p>O único raio do Modelo E original, que tinha 5 mm foi mantido. Os cantos vivos ao longo da geometria da peça receberam raios de 10 mm e os furos pequenos raios de 0,5 mm. A região frontal e as arestas dos furos maiores receberam raios de 2 mm.</p>

Fonte: Autoria própria (2025).

3.3.2 Planejamento do processo

O PPP utilizado para a manufatura das peças estudadas foi o UltiMaker Cura 5.3.0. Versões mais recentes como a 5.7.1 já estavam disponíveis, no entanto, alguns testes revelaram erros na seleção dos perfis pré-configurados e oferecidos no Marketplace para os materiais com carga metálica e de interface com o suporte da BASF Forward AM. Dentre os erros encontrados, apresentou-se a utilização de material de suporte em regiões da peça em que deveria ser utilizado o material com carga metálica e algumas peças foram impressas completamente com o material de suporte. Portanto, para evitar desperdício de recursos, de tempo e de material, optou-se pela utilização apenas da versão 5.3.0.

Os perfis pré-definidos são criados a partir da colaboração entre o fabricante da matéria-prima escolhida e a empresa desenvolvedora do PPP com o objetivo de diminuir a incidência de erros dos usuários em função da quantidade de variáveis e da complexidade do processo.

Nesse estudo, não foram empreendidos esforços relacionados à otimização de parâmetros de processo. Assim, foram utilizados os parâmetros recomendados pelo fabricante e pelo desenvolvedor do programa para o aço inoxidável 17-4PH prevenindo a introdução de variáveis extras nas análises das peças. O ANEXO C apresenta um documento da BASF Forward AM que confirma a disponibilização de um perfil de impressão compatível com a impressora UltiMaker S3.

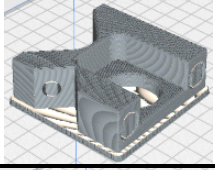
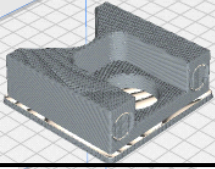
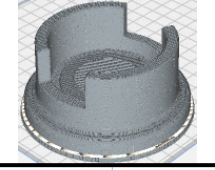

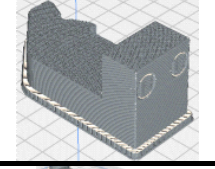
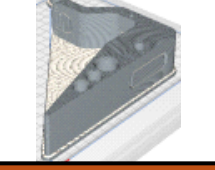
O perfil utilizado foi exportado e os principais parâmetros estão apresentados no ANEXO D. Algumas características dignas de nota são a baixa velocidade de impressão, de 30 mm/s, e o fator de escala utilizado para compensação da contração do material. O fator de escala adotado pelo programa UltiMaker Cura 5.3.0 é de 120% em XY e 124% em Z. Esses valores divergem do fator recomendado pela diretriz fornecida pela própria BASF Forward AM, que é de 119% em XY e 122% em Z, com o objetivo de compensar a contração média de 16% em XY e 20% em Z após a sinterização das peças.

Além disso, o UltiMaker Cura 5.3.0 disponibiliza duas alternativas de preenchimento da peça: 60 e 100%. Dessa forma, para evitar desperdício de material, foram impressas inicialmente apenas peças com 60% de preenchimento. No entanto, após discussões com a Up3D, mais tarde optou-se por imprimir as peças com 100%

de preenchimento dos Modelos A e D, já que a Raise3D recomenda que as peças sejam sempre completamente preenchidas.

A Tabela 2 mostra as estimativas de tempo para impressão e massa de material indicadas pelo PPP. Para a impressão de quatro peças do Modelo A e do Modelo D, duas com preenchimento 60% e duas com 100%, e uma de cada um dos outros Modelos apenas com 60% de preenchimento – devido à quantidade expressiva de material necessária para imprimi-los com 100% (4,7 kg de material e 180 horas de impressão).

Tabela 2. Estimativas de tempo e massa por peça

Modelo	Preenchimento		60%	100%	Peças na mesa
	Estimativas				
Garra Robô Sensor Modelo A1	Massa [g]		242	320	
	Tempo [h]		7,8	10,4	
Garra Robô Modelo A2	Massa [g]		254	341	
	Tempo [h]		8	10,9	
Matriz Base Modelo B	Massa [g]		617	-	
	Tempo [h]		19,3	-	
Matriz Cilindro Modelo C	Massa [g]		1966	-	
	Tempo [h]		67,6	-	
Garras Direita e Esquerda Modelos D1 e D2	Massa [g] (cada peça)		202	281	
	Tempo [h] (cada peça)		6,5	9,1	
Gatilho Modelo E	Massa [g]		752	-	
	Tempo [h]		24,8	-	
Estimativa de massa total utilizada [g]					5458
Estimativa de tempo total de impressão [h]					180

Fonte: Autoria própria (2025).

O custo de impressão de cada peça foi calculado com base na estimativa de matéria-prima utilizada em cada uma. Considerando que o rolo de 3 kg de filamento BASF Ultrafuse® 17- 4PH custou R\$ 4.864,00, cada grama desse material custou R\$ 1,62. Já o rolo de filamento BASF Ultrafuse® Support Layer, que possui 300 g de material, custou R\$ 2.004,00, isto é, R\$ 6,68 por grama. Dessa forma, estima-se que o custo total de matéria-prima para impressão das amostras do estudo foi de R\$ 8.839,37, como mostrado na Tabela 3. Nesses cálculos não foram considerados os custos do filamento de polipropileno usado para limpeza dos núcleos de impressão a cada peça impressa, depreciação da impressora, depreciação dos núcleos de impressão e quantidade de adesivo Magigoo Metal consumido.

Tabela 3. Estimativas custo de matéria-prima por peça

Modelo e preenchimento	Qtde de 17-4PH [g]	Custo de 17-4PH [R\$]	Qtde de Support Layer [g]	Custo de Support Layer [R\$]	Custo total de matéria-prima da peça [R\$]
A1 60%	240,2	R\$ 389,12	2,5	R\$ 4,05	R\$ 393,17
A1 100%	317,8	R\$ 514,84	2,5	R\$ 4,05	R\$ 518,89
A2 60%	251,7	R\$ 407,75	2,5	R\$ 4,05	R\$ 411,80
A2 100%	339,2	R\$ 549,50	2,5	R\$ 4,05	R\$ 553,55
B 60%	614	R\$ 994,68	3	R\$ 4,86	R\$ 999,54
C 60%	1962,7	R\$ 3.179,57	3,5	R\$ 5,67	R\$ 3.185,24
D1 e D2 60%	399,5	R\$ 647,19	3	R\$ 4,86	R\$ 652,05
D1 e D2 100%	557,4	R\$ 902,99	3	R\$ 4,86	R\$ 907,85
E 60%	745,5	R\$ 1.207,71	7,5	R\$ 12,15	R\$ 1.219,86
Total	5428	R\$ 8.793,36	30	R\$ 48,60	R\$ 8.841,96

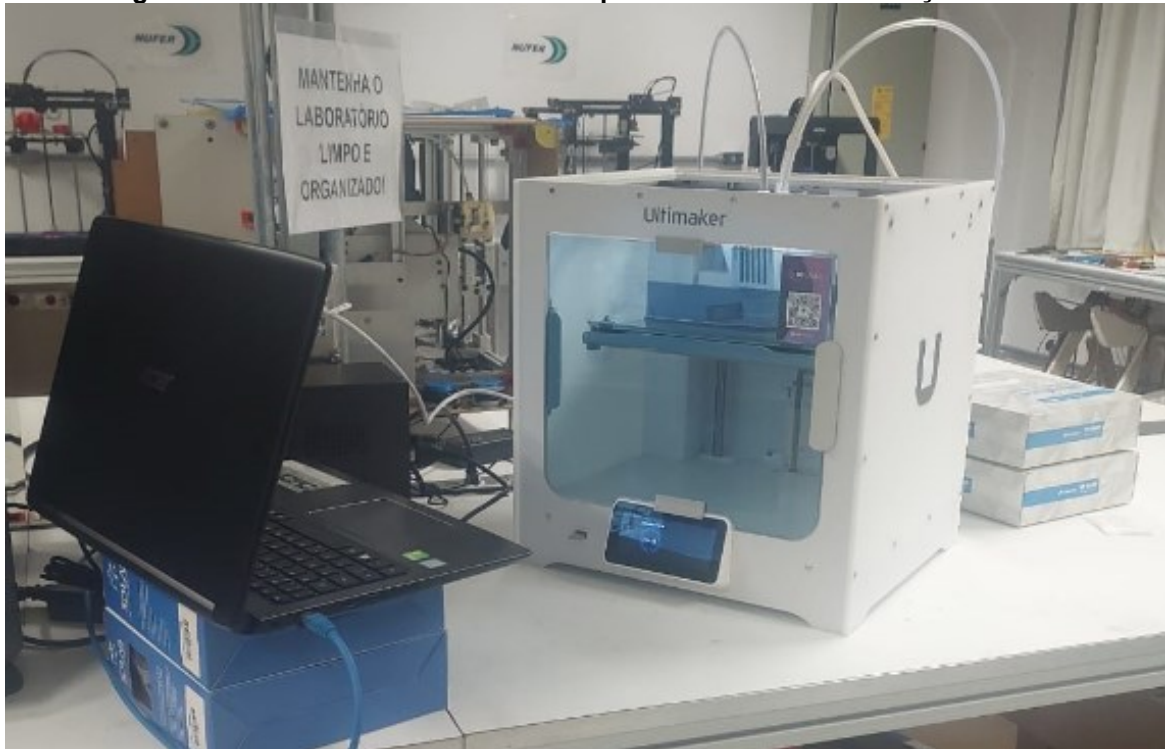
Fonte: Autoria própria (2025).

3.3.3 Fabricação das geometrias (impressão e D&S)

Devido às limitações da infraestrutura de rede sem fio da universidade, as primeiras impressões foram monitoradas sem a possibilidade de intervenção remota com a utilização dos itens mostrados pela Figura 22:

- um notebook com a câmera ligada e apontada para a impressora;
- o programa AnyDesk, de acesso remoto de computadores, para transmitir a imagem da câmera;
- um smartphone com o aplicativo AnyDesk instalado para visualização.

Figura 22. Monitoramento remoto sem possibilidade de intervenção remota



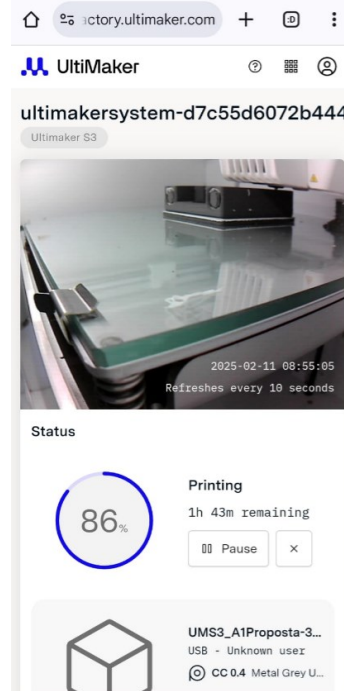
Fonte: Autoria própria (2023).

Depois das primeiras impressões, foi possível habilitar a conexão e a intervenção remota da UltiMaker com o uso de um cabo de rede. Isso permitiu o acesso ao UltiMaker Digital Factory pelo celular, como mostrado na Figura 23, ao seguir os passos indicados pela interface da impressora.

Após a impressão, antes mesmo de terem sido retiradas do vidro, foram registradas as características – como integridade das estruturas, qualidade da superfície e empenamento – das peças resultantes, uma vez que o resultado desse processo é determinante para o resultado dos processos de D&S. A retirada das peças da mesa foi realizada com auxílio de água, como recomendado pelo fabricante do

adesivo aplicado. A plataforma de vidro junto com as peças foi submersa em um recipiente cheio de água para que elas soltassem.

Figura 23. Monitoramento remoto com possibilidade de intervenção remota



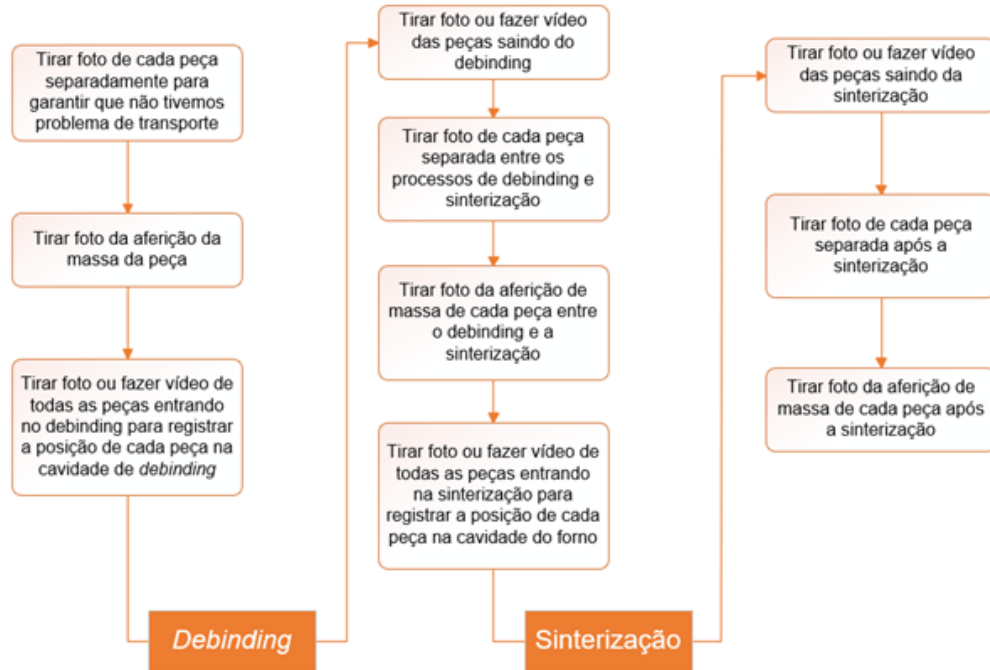
Fonte: Autoria própria (2025).

Com a retirada das peças do vidro, foram medidas as massas de cada peça separadamente, sem as torres de sacrifício. A massa da peça é uma informação importante para a realização do cálculo da quantidade de insumos a serem utilizados nos processos de D&S. Após a impressão das peças, realizou-se o processo de D&S, responsável pela transição das peças de material compósito para peças de material metálico.

Esse procedimento foi realizado pela Up3D, empresa terceirizada com equipamentos específicos para D&S de AM. Por se tratar de um serviço exclusivo na região, não foi possível coletar nenhuma especificação dos processos realizados. Para o *debinding* catalítico foi utilizado o forno D200-E da Raise3D e, para a sinterização, o forno S200-C do mesmo fabricante. Não foi possível acompanhar presencialmente os processos na Up3D e a empresa não atendeu à solicitação de medição das massas das peças em estado marrom. Ela também não repassou as informações de custo do serviço de D&S para cada peça visto que o processo foi realizado com lotes de diferentes peças por etapa. O fluxograma mostrado na Figura

24 apresenta a sequência de atividades solicitadas para a empresa parceira registrar o processo.

Figura 24. Fluxograma das atividades realizadas pela empresa parceira



Fonte: Autoria própria (2025).

3.3.4. Inspeção das peças

Por não haver informações específicas na literatura sobre DfAM, metal MEX e seus resultados, essa etapa de inspeção foi crucial. Foram estabelecidas duas formas de análise das peças fabricadas após o processo de sinterização: inspeção visual das geometrias e acabamento e medição de massa.

Para a inspeção visual, foi empregado o conhecimento levantado por Loh et al. (2020) para identificar e registrar eventuais inconformidades. Em tempo, os defeitos das peças foram classificados de forma qualitativa em:

- Fissuras: estágio inicial de um dano estrutural, caracterizado por abertura muito pequena e superficial, geralmente não comprometendo a integridade estrutural de forma significativa;
- Trincas: estágio mais avançado que uma fissura, caracterizado por uma abertura mais profunda e visível, pode atravessar parte da espessura da peça comprometendo a resistência e a estabilidade estrutural;

- Rachaduras: estágio mais grave de dano estrutural, caracterizado por uma abertura grande e profunda, que geralmente percorre toda a espessura ou estrutura da peça, indica uma falha estrutural crítica, podendo resultar na separação ou quebra completa da peça.

Ademais, realizou-se uma investigação de causa e efeito das falhas observadas no estudo com base no Diagrama de Ishikawa. Para melhor aproveitamento do método, o diagrama foi adaptado com áreas de análise relacionadas à metal MEX para o levantamento das hipóteses das causas de cada um dos efeitos observados nas peças. As causas associadas às diretrizes propostas estão sinalizadas com o número da respectiva diretriz em parêntesis.

Para contribuir com a investigação das causas das falhas das peças, selecionou-se um grupo de pessoas familiarizadas com processos similares ao estudado – dentre elas, uma engenheira mecânica e um mestre em engenharia mecânica, ambos com prática eventual com a solução Metal X™ da Markforged, dois doutores em engenharia mecânica e um técnico de impressão 3D.

3.4 Etapa 3 do DSR: Desenvolvimento

A etapa de Desenvolvimento do Artefato consiste na análise das diretrizes disponíveis em literatura associada à inspeção das peças produzidas. Foram consideradas as diretrizes de DfAM disponíveis na literatura que se aplicam à MEX e as diretrizes publicadas por fabricantes de matérias-primas similares às de interesse. As referências consideradas nessa etapa são as já detalhadas na revisão bibliográfica:

- Djokikj e Kandikjan (2022);
- Diegel et al. (2020);
- Leutenecker-Twelsiek et al. (2016);
- Asadollahi-Yazdi et al. (2017);
- Adam e Zimmer (2014, 2015); Zimmer e Adam (2012);
- BASF Forward AM (2025);
- Markforged (2025).

Visando consolidar todas as diretrizes em um único material, unificar as semelhantes, descartar as não aplicáveis e criar uma nomenclatura para facilitar a

referência à cada diretriz, foi desenvolvido um compilado das diretrizes de DfAM de interesse para o metal MEX. As diretrizes e regras de DfAM disponíveis na literatura foram consolidadas e são apresentadas na sequência dessa seção. As diretrizes relacionadas às etapas de fabricação e D&S não são consideradas.

Após a análise detalhada das diretrizes de referência, foi proposto um compilado (artefato do método DSR) que é apresentado na seção referente à etapa 3 do DSR do capítulo quatro. Cada diretriz foi discutida em detalhes considerando as diretrizes de referência, as experiências adquiridas ao longo do estudo e os resultados obtidos, para que o objetivo geral deste trabalho seja cumprido com respaldo teórico fornecido pelas referências e respaldo empírico das tentativas realizadas por este estudo.

Para complementar as informações abordadas no texto de cada diretriz, foram criados quadros padronizados, como exemplificado pelo Quadro 19, com o número da diretriz, o respectivo título, uma descrição resumida das considerações e uma imagem para contribuir com o entendimento resumido da diretriz. Além disso, na seção de cada diretriz, descreve-se também a relação da diretriz com as percepções e resultados deste trabalho.

Quadro 19. Quadro padronizado para resumo das diretrizes.

Diretriz n° x	Título da diretriz
Descrição da diretriz	
Imagem	

Fonte: Autoria própria (2025).

3.5 Etapa 4 do DSR: Avaliação

Para avaliação do artefato desenvolvido foi criado um questionário online, pelo aplicativo Google Formulários, com seis perguntas, sendo uma discursiva e as outras de múltipla escolha. O link do questionário foi compartilhado com as mesmas cinco pessoas específicas que possuem conhecimento do processo de metal MEX e contribuíram com a investigação na etapa de inspeção das peças. As perguntas elaboradas, que englobam as diretrizes com o objetivo de captar a opinião de possíveis usuários das diretrizes propostas e se elas são úteis, são as seguintes:

1. As diretrizes propostas fornecem orientações claras sobre as considerações de DfAM por extrusão de material com carga metálica?
2. As diretrizes propostas abordam considerações de projeto de peças metálicas fabricadas por MEX?
3. As diretrizes propostas incluem sugestões úteis para otimizar o design de peças considerando as características do material metálico?
4. Você achou que as diretrizes propostas são facilmente aplicáveis ao processo de fabricação de peças metálicas por MEX?
5. Você encontrou algum aspecto da proposta de diretrizes que poderia ser melhorado ou que não foi abordado? Algo que poderia ter ficado mais claro?

Assim, considerando a teoria do DSR, essa forma de avaliação é aderente à forma descritiva com argumento informado como método proposto.

3.6 Etapa 5 do DSR: Conclusão

Para concluir as etapas do DSR, o questionário foi avaliado por meio dos gráficos criados automaticamente pela Google Formulários com as respostas obtidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta as discussões depois das saídas do DSR, isto é: as tentativas, o artefato (proposta de diretrizes), sua avaliação por meio de um questionário e os resultados.

4.1 Etapa 2: As tentativas

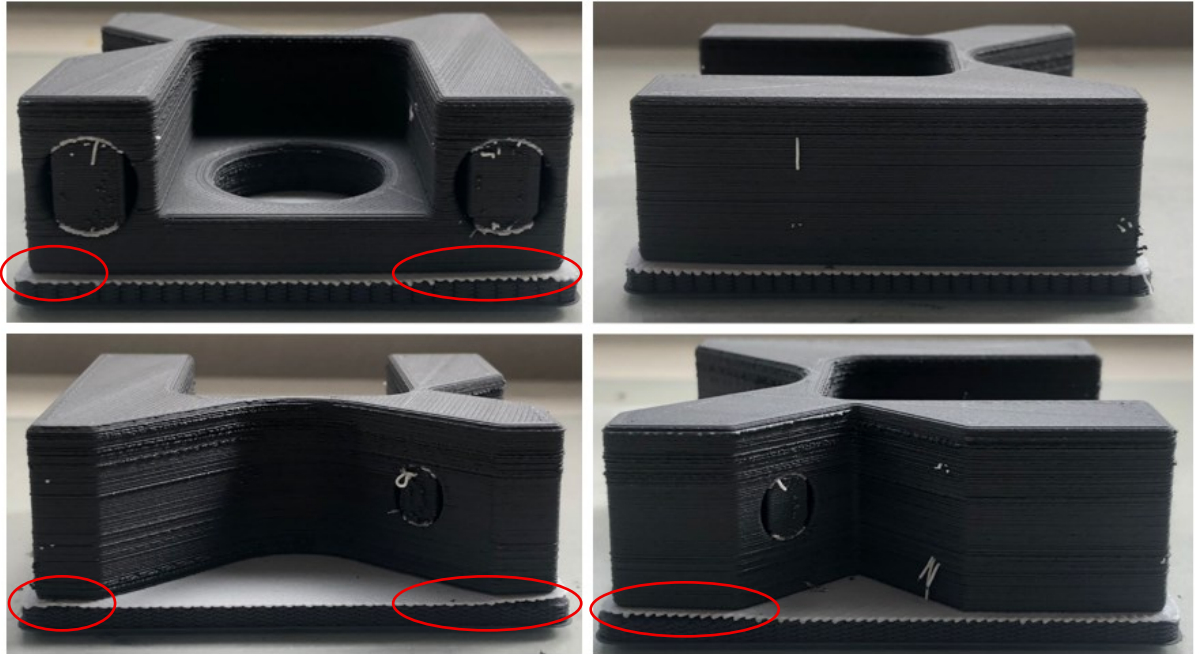
Em cumprimento com o “objetivo específico c” e como base para o “objetivo específico d”, esta seção apresenta a avaliação das peças metálicas por inspeção visual e realização da análise de causa e efeito acerca das falhas ocorridas.

As Figuras 25 a 30 mostram as peças logo após as impressões. As peças dos Modelos A e D impressas com 60 e 100% de preenchimento apresentaram resultados similares, por isso apenas as peças com preenchimento de 100% estão apresentadas.

É possível perceber que em todas as peças algumas regiões da camada de Support Layer empenaram com relação ao *raft*. A peça E apresentou empenamento até mesmo da camada de Support Layer e do suporte dentro do menor dos furos oblongos, no meio da peça, como pode ser visto na porção inferior direita da Figura 30.

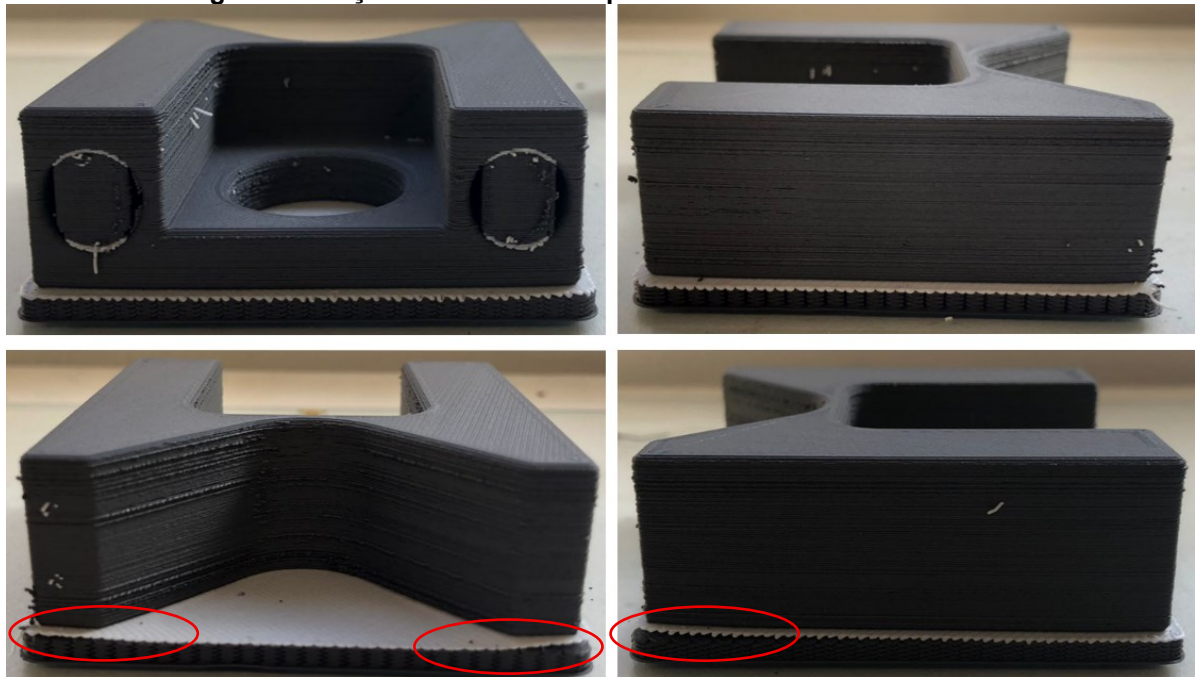
Além disso, mesmo utilizando um dos adesivos recomendados para o processo, Magigoo Pro Metal (comprado por R\$ 799,00 o tubo de 50 ml), todas as peças tiveram algumas superfícies do *raft* empenadas com relação ao vidro, isso com todas as peças com a primeira camada bem aderida à plataforma de construção. Discutindo com outros usuários do processo de metal MEX com a impressora UltiMaker, comentou-se sobre a possibilidade de utilizar outras colas, como a em bastão da marca Faber Castell.

Figura 25. Peça A1 com 100% de preenchimento em estado verde



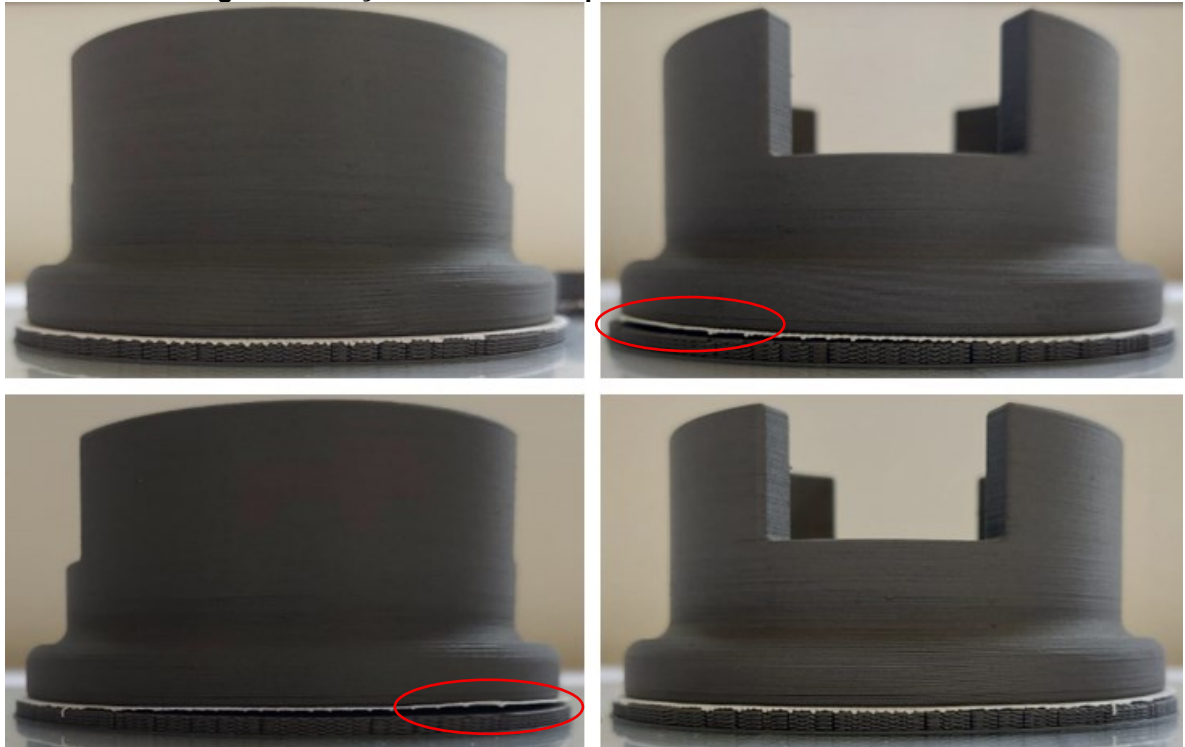
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 26. Peça A2 com 100% de preenchimento em estado verde



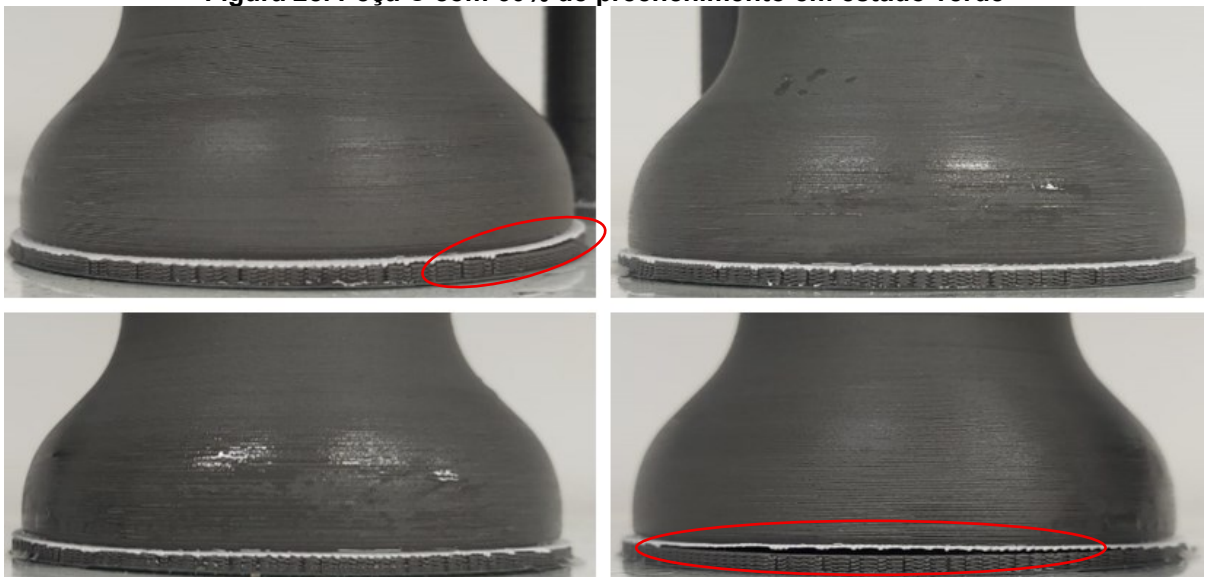
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 27. Peça B com 60% de preenchimento em estado verde



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 28. Peça C com 60% de preenchimento em estado verde



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 29. Peças D1 e D2 com 100% de preenchimento em estado verde



Fonte: Autoria própria (2025).




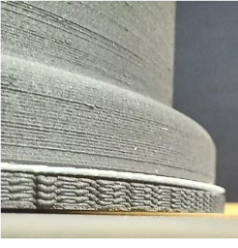
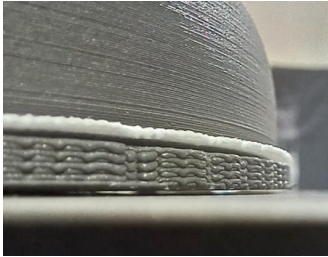
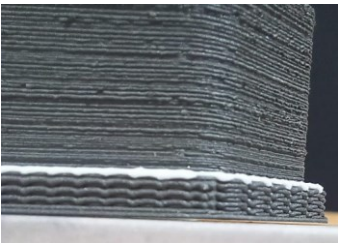
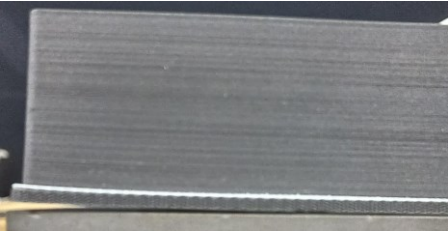

Figura 30. Peça E com 60% de preenchimento em estado verde



Fonte: Autoria própria (2025).

O Quadro 20 mostra alguns detalhes dos empenamentos das peças em estado verde.

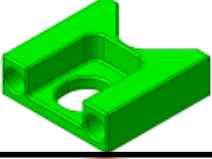




Quadro 20. Empenamento das peças em estado verde

Modelo	Detalhes das peças em estado verde	
Garra Robô Sensor e Garra Robô Modelos A1 e A2		
Matriz Base Modelo B		
Matriz Cilindro Modelo C		
Garras Direita e Esquerda Modelos D1 e D2		
Gatilho Modelo E		

Fonte: Autoria própria (2025).

A Tabela 4 mostra as massas de cada peça sem as torres de sacrifício em estado verde, totalizando 5,161 kg.

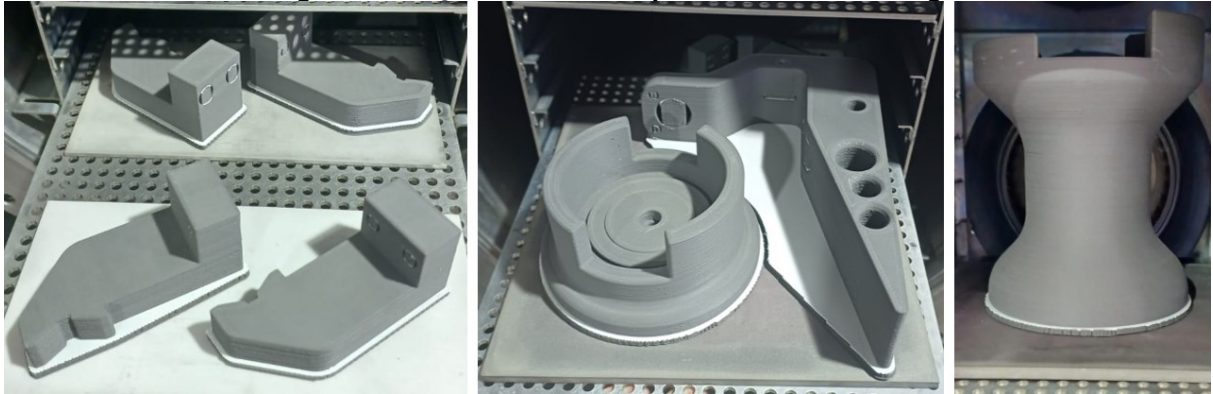
Tabela 4. Massa das peças impressas em estado verde

Preenchimento	60%	100%	Imagens
Massa [g]			
Garra Robô Sensor Modelo A1	230	284	
Garra Robô Modelo A2	244	300	
Matriz Base Modelo B	628	-	
Matriz Cilindro Modelo C	1873	-	
Garra Direita Modelo D1	191	245	
Garra Esquerda Modelo D2	191	245	
Gatilho Modelo E	730	-	
Total de massa das peças em estado verde [g]		5161	

Fonte: Autoria própria (2025).

Após o envio por correio para a Up3D, a empresa realizou os processos de D&S entre os meses de dezembro de 2024 e janeiro de 2025. A Figura 31 apresenta as peças posicionadas nas plataformas logo antes da etapa de *debinding*.

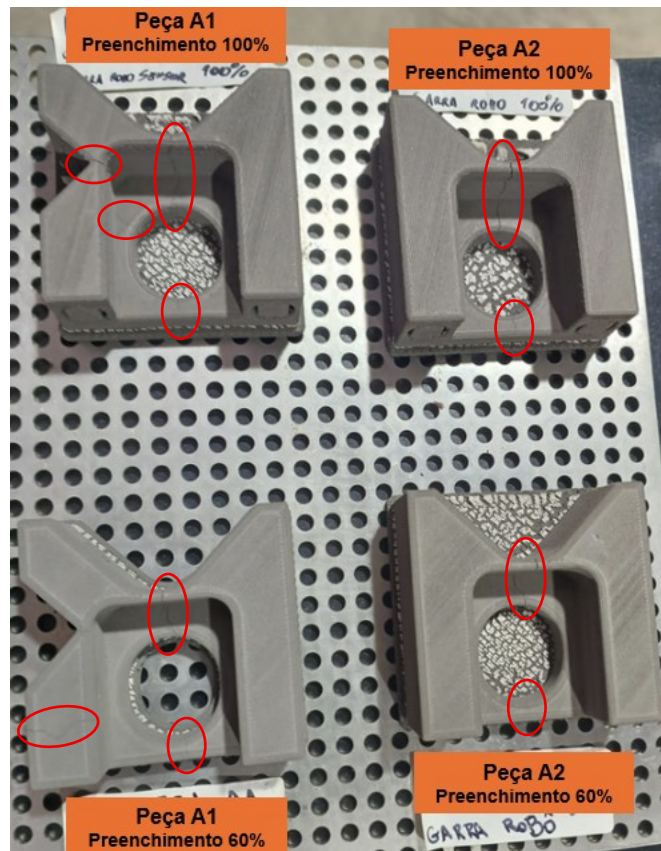
Figura 31. Peças entrando no processo de *debinding*



Fonte: Autoria própria (2025).

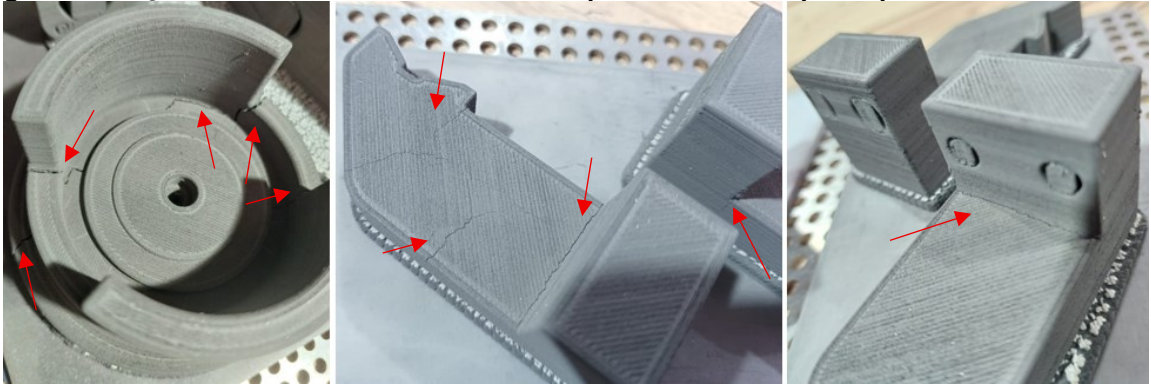
Durante o processo de *debinding*, todas as peças apresentaram fissuras, como mostrado pelas Figuras 32 a 35. A peça E apresentou, além de várias fissuras nas regiões mais estreitas, uma rachadura, mais larga e atravessando a peça, com deslocamento visível de parte da região dos furos pequenos.

Figura 32. Peças A1 e A2 com 60 e 100% de preenchimento após o processo de *debinding*



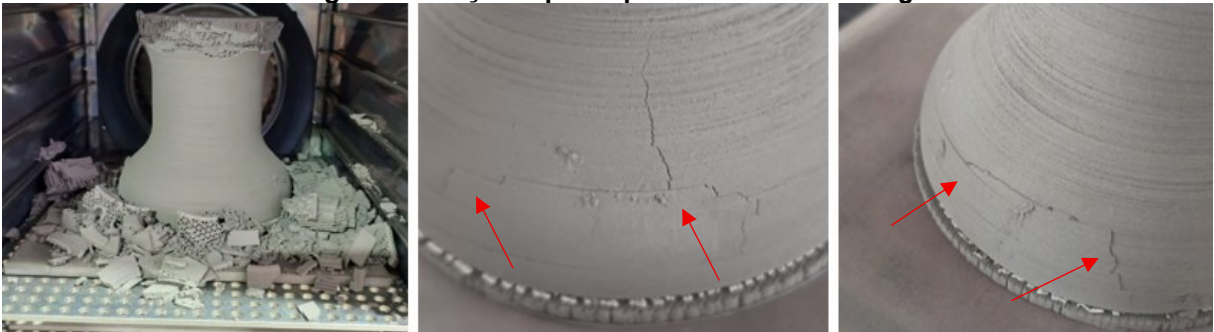
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 33. Peças B e D1 e D2 com 60 e 100% de preenchimento após o processo de *debinding*



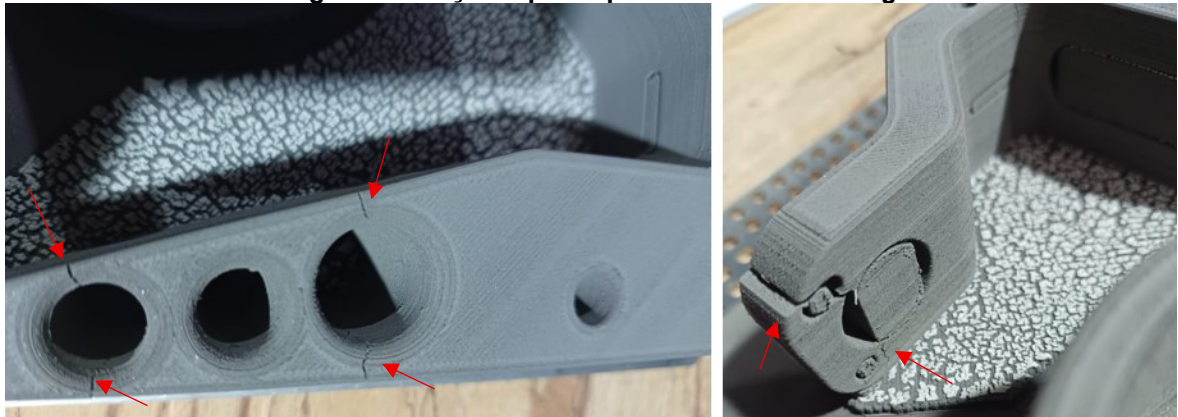
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 34. Peça C após o processo de *debinding*



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 35. Peça E após o processo de *debinding*

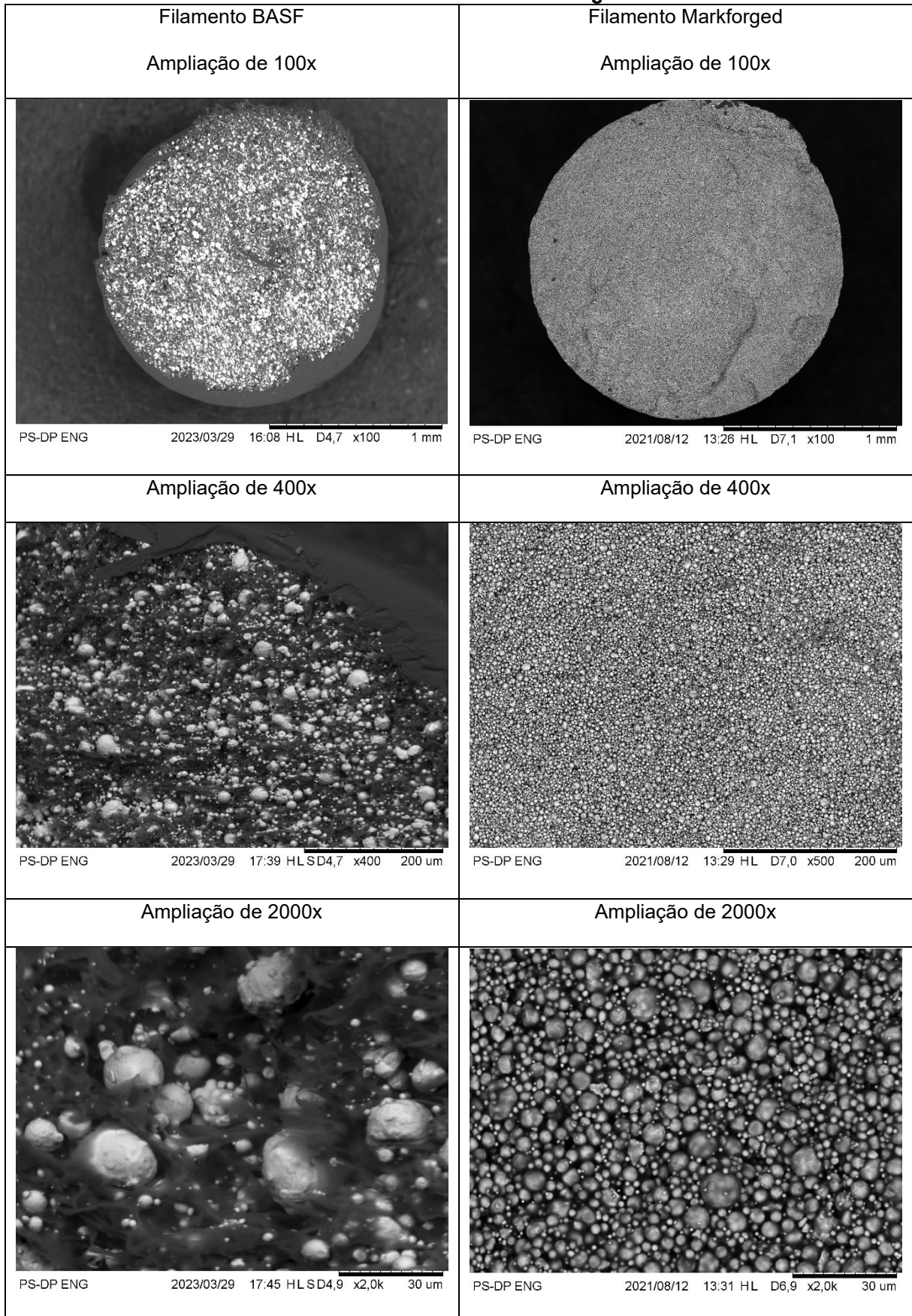


Fonte: Autoria própria (2025).

A massa das peças em estado marrom não foi medida em função do resultado do processo. As peças em estado marrom se mostraram mais friáveis, purulentas e de mais fácil desintegração, do que o imaginado pelas pessoas familiarizadas com o processo e as peças da Metal X™, solução do fabricante Markforged.

Uma possível justificativa para o ocorrido é a quantidade de carga metálica no material da Markforged ser maior do que a quantidade presente no filamento da BASF, como é possível observar nas imagens de MEV na Figura 36.

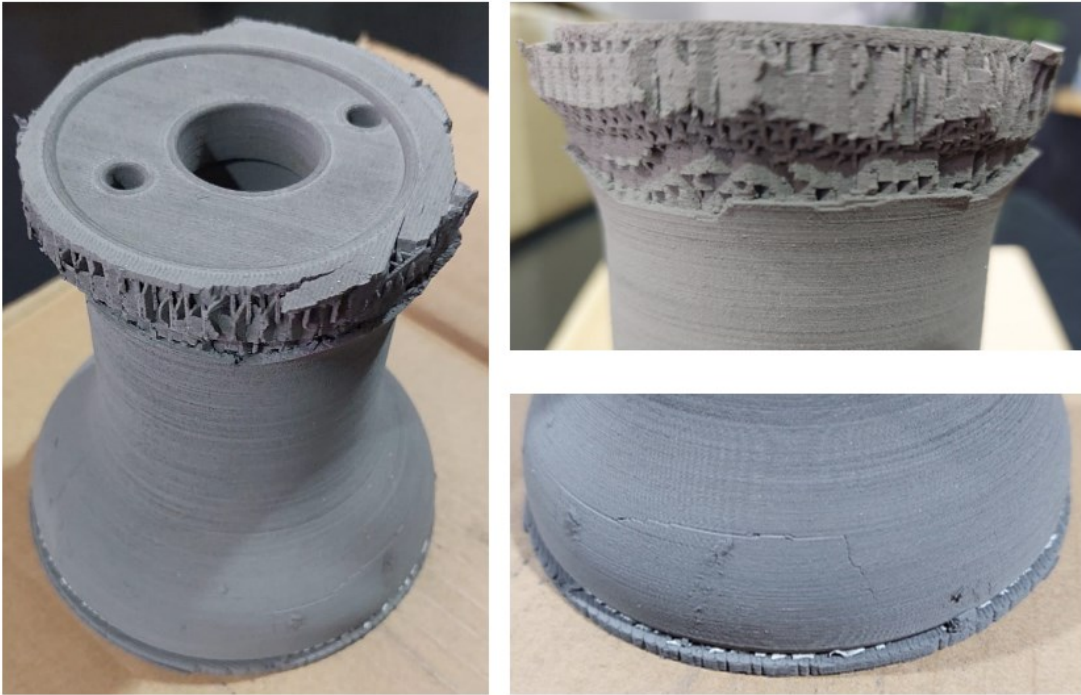
Figura 36. Imagens MEV em diferentes ampliações da seção transversal dos filamentos metálicos da BASF e da Markforged.



Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 37 apresenta imagens de diferentes regiões da peça C após o *debinding*, ou seja, em estado marrom, para exemplificar o descrito. As estruturas da peça nesse estado esfarelaram facilmente quando submetidas ao toque firme ou pressão.

Figura 37. Peça C com fácil desintegração após o *debinding*

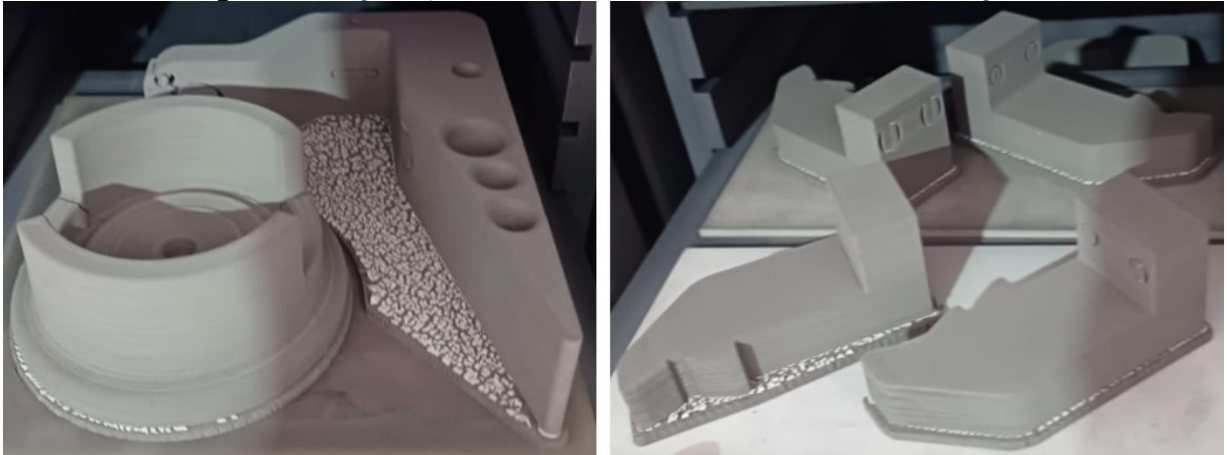


Fonte: A autoria própria (2025).

Especificamente para a peça C, a Up3D recomendou que não fosse realizada a sinterização, uma vez que a peça apresentava grandes fissuras em sua região inferior, podendo resultar em colapso e causar avarias ao forno – as partes da peça podem cair para fora da cerâmica e fundir sobre as superfícies internas e plataforma de grafite do forno de sinterização.

Com relação às demais peças, a Up3D optou por fazer a sinterização mesmo apresentando fissuras após o *debinding*. A Figura 38 mostra os resultados.

Figura 38. Peças B, E e D1 e D2 entrando no forno de sinterização



Fonte: Autoria própria (2025).

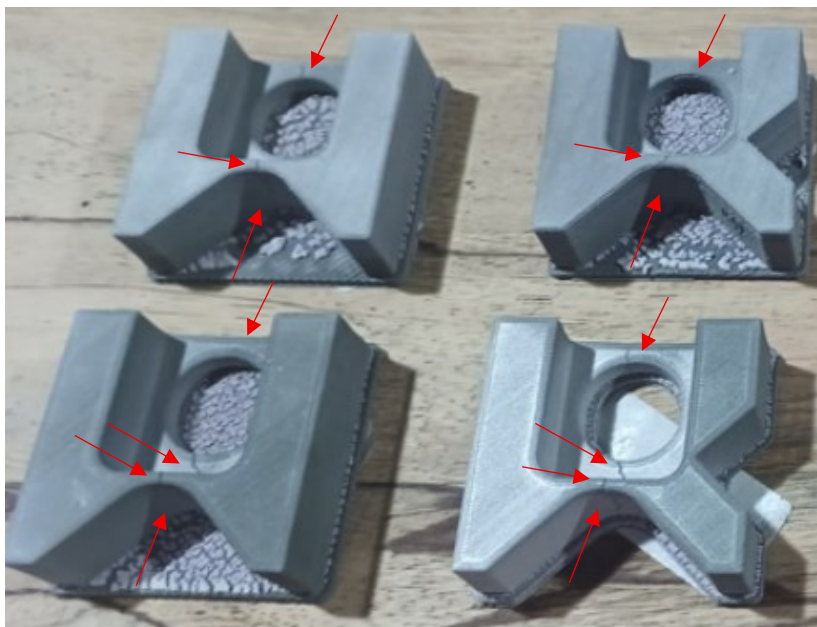
Como esperado, as trincas que surgiram durante o processo de *debinding* foram acentuadas no processo de sinterização, conforme mostram as Figuras 39 e 40.

Percebe-se a região do maior furo ortogonal à plataforma na Peça E que a fissura detectada no estado marrom após o *debinding* evoluiu tornando-se uma rachadura, visível de ambos os lados da peça. Após a sinterização, observou-se que as peças apresentaram colorações diferentes entre si. A empresa parceira confirmou que a coloração não deve afetar o comportamento estrutural dos componentes. A hipótese levantada para o surgimento dessa característica é a de que diferentes posições das peças no forno de sinterização marcam as peças de diferentes formas, com colorações mais escuras ou mais claras, com ou sem manchas irregulares.

Por exemplo, as peças B e E foram colocadas na prateleira mais inferior do forno com um certo espaço para a prateleira acima e parecem apresentar cores uniformes. Enquanto as peças D1 e D2, colocadas na prateleira acima das peças B e E, tinham uma prateleira imediatamente acima delas e ficaram com manchas. Além disso, as peças D1 e D2 com 60% de preenchimento foram posicionadas na região mais ao fundo do forno, enquanto as com 100% de preenchimento ficaram para frente, apresentando coloração mais clara, mas com manchas.

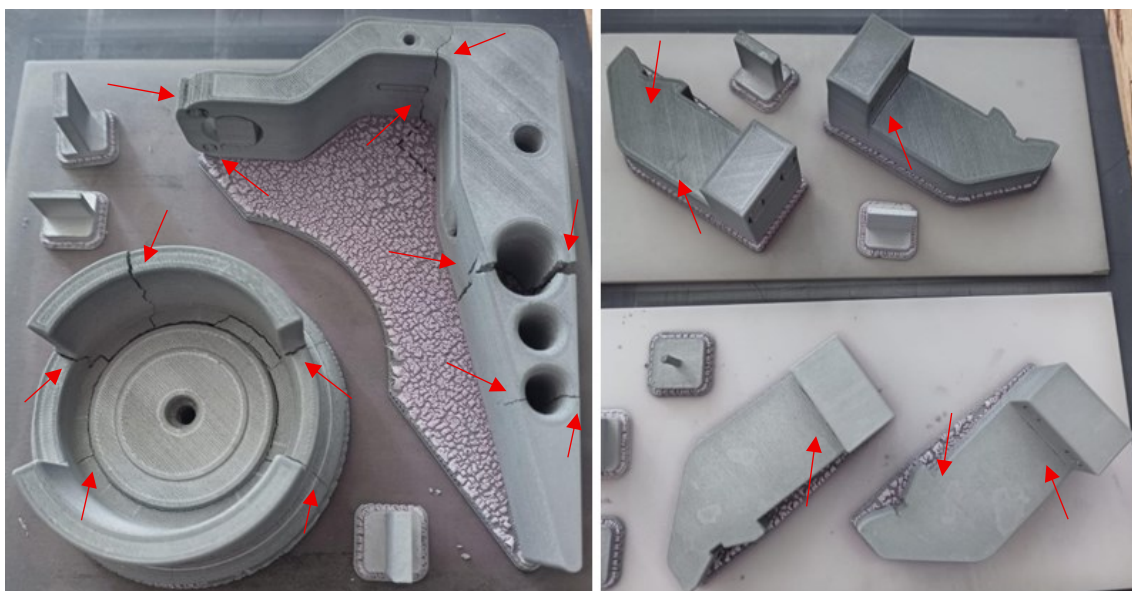
Após o transporte das peças da Up3D em Valinhos-SP para o NUFER em Curitiba-PR, as peças sinterizadas foram fotografadas. Identificadas com base no esquema da Figura 41, as Figuras 42 a 49 mostram as peças metálicas com mais detalhes em diferentes vistas.

Figura 39. Peças A1 e A2 logo após a sinterização



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 40. Peças B, E e D1 e D2 logo após a sinterização



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 41. Identificação das vistas das peças sinterizadas

Vista superior	Vista frontal	Vista lateral esquerda
Vista inferior	Vista posterior	Vista lateral direita

Fonte: Autoria própria (2025).

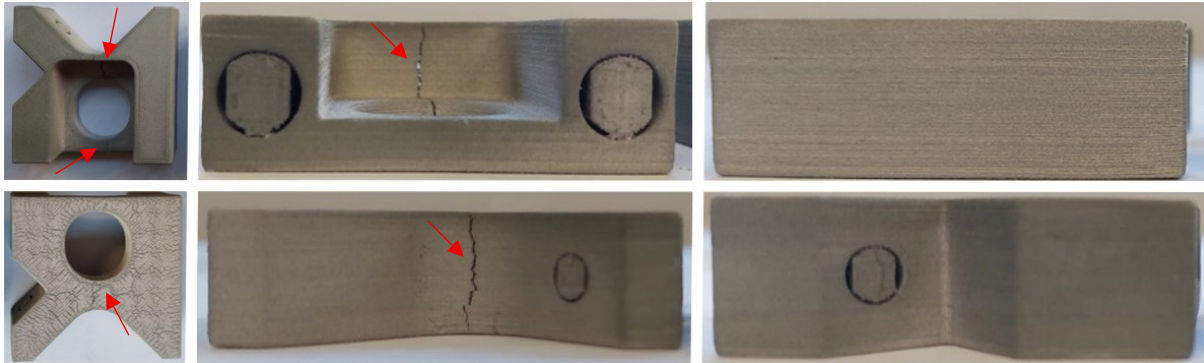
Durante o manuseio, a peça E colapsou em três partes. A região do maior furo após a sinterização apresentou rachadura em cima do *raft*, como mostra a Figura 40, mas a peça não resistiu ao manuseio e as estruturas se destacaram.

As observações realizadas sobre as peças revelaram diferentes comportamentos após os processos de D&S. As peças com preenchimento de 60 e 100% apresentaram variações em termos de fissuras, trincas, delaminação e qualidade da superfície, não sendo possível estabelecer relações claras ou padrões que possam indicar alguma influência do preenchimento sobre a integridade das peças. A quantidade de peças produzidas por geometria não é significativa para poder elaborar conclusões a partir das inspeções visuais. Não é possível afirmar se o acesso aos dados detalhados dos processos de *debinding* e sinterização contribuiria para a elaboração de conclusões.

Como apresentado nas Figuras 42 e 43, a peça A1 com preenchimento de 60% apresentou uma trinca maior e uma fissura pequena na vista posterior, enquanto a versão com 100% mostrou uma trinca que não propagou nessa mesma vista. As vistas laterais da versão 100% apresentam mais pontos e mais severidade de delaminação das camadas, além de pior qualidade da superfície, com mais rugosidade e camadas mais aparentes do que na peça com 60% de preenchimento.

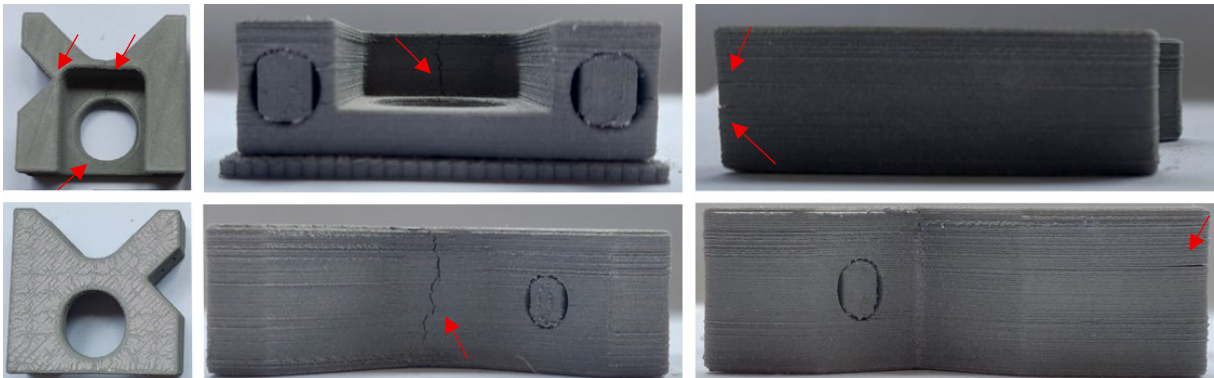
As peças A2 seguiram um comportamento semelhante, como mostram as Figuras 44 e 45. A versão de 60% apresentou duas trincas com propagação quase total pelo entorno da peça, uma na vista frontal e outra na vista posterior. Enquanto a peça de 100% mostrou uma única trinca mais severa que efetivamente propagou por toda a espessura da região mostrada em primeiro plano na vista frontal, além de maior delaminação e pior qualidade da superfície, como na peça A1 100% preenchida.

Figura 42. Peça metálica A1 com 60% de preenchimento



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 43. Peça metálica A1 com 100% de preenchimento

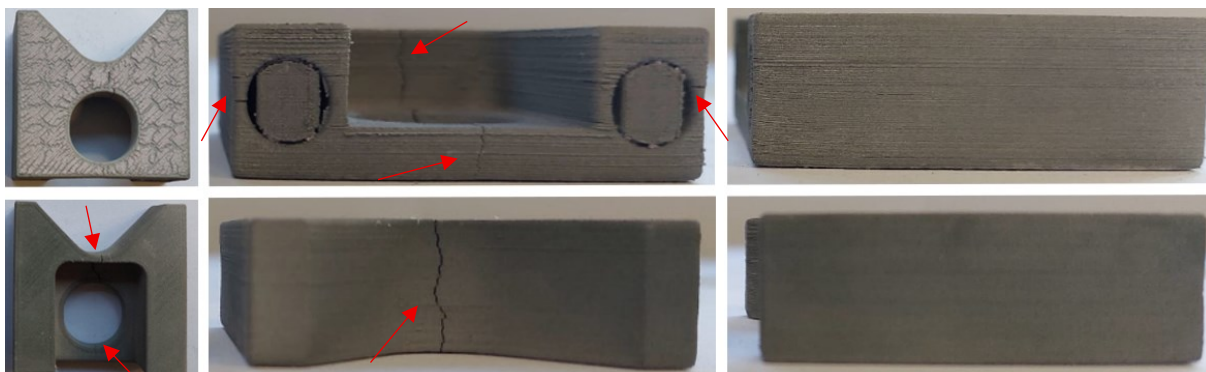


Fonte: Autoria própria (2025).

A peça B, fabricada unicamente com 60% de preenchimento e apresentada na Figura 46, apresentou um comportamento mais crítico, com rachaduras por toda a peça que iniciaram no *debinding* e escalaram para maior criticidade no processo de sinterização. Isso sugere uma falha estrutural severa se a peça fosse utilizada pela empresa parceira, já que devem ser aplicadas cinco toneladas de carga de trabalho distribuída em sua superfície superior.

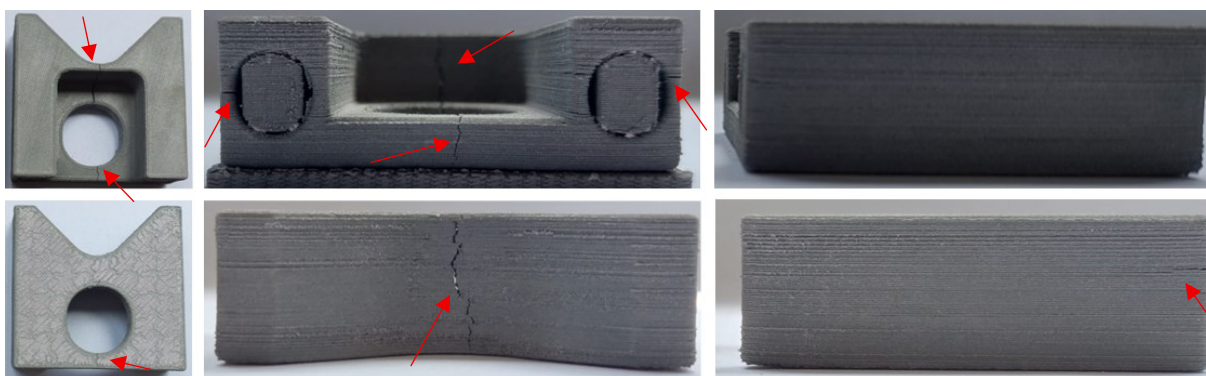
A peça C não foi sinterizada por ter colapsado durante o *debinding* e por isso não foi realizada uma análise detalhada na peça.

Figura 44. Peça metálica A2 com 60% de preenchimento



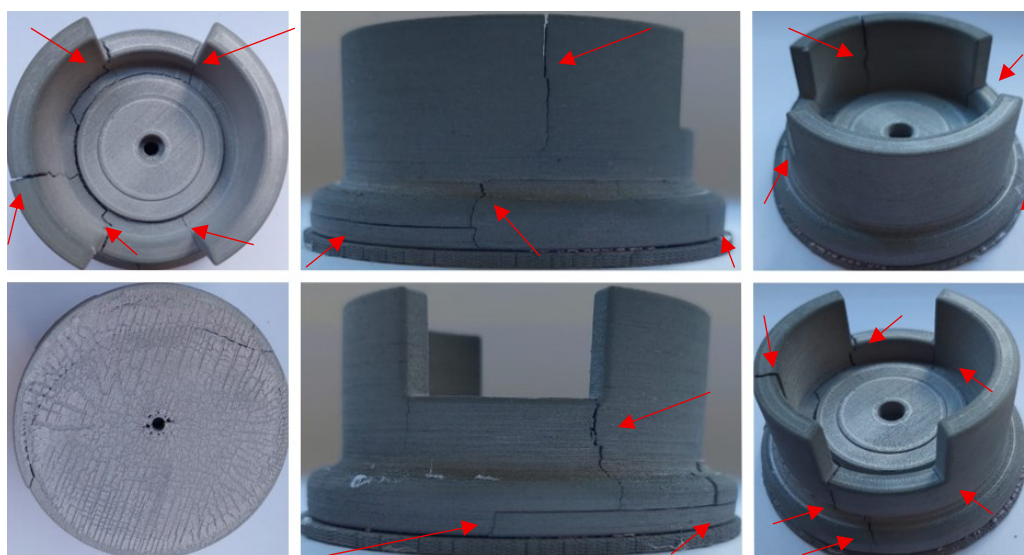
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 45. Peça metálica A2 com 100% de preenchimento



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 46. Peça metálica B com 60% de preenchimento



Fonte: Autoria própria (2025).

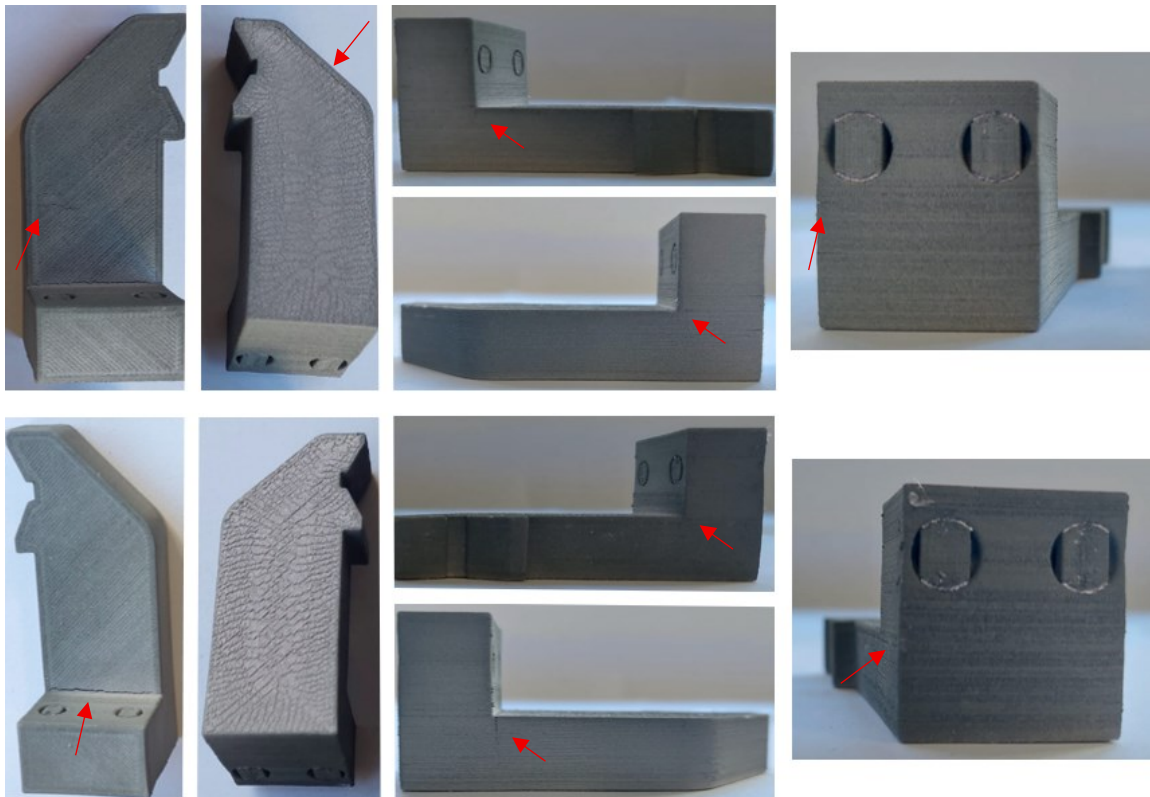
Com relação às peças D1 e D2 com 60 e 100% de preenchimento, mostradas respectivamente na parte de cima e de baixo das Figuras 47 e 48, todas apresentaram

trincas nos pontos de encontro das massas, mais bem expostas na vista superior das peças, mas mais severas nas peças com preenchimento de 60%.

As peças com 60% de preenchimento manifestaram irregularidades na aresta da base onde estão os furos, exibidas nas vistas laterais e posterior com aparência de pequenas ondulações. Essas peças também apresentaram porções do contorno na primeira camada com destacamento do preenchimento, mostradas nas vistas inferiores. Além disso, a peça D1 com 60% de preenchimento evidenciou uma fissura no meio da sua maior porção, também visível na vista superior da peça, como mostra a Figura 47. Esse ponto pode estar relacionado aos parâmetros de construção das peças utilizados pelo PPP, como por exemplo, a sequência de construção entre o preenchimento e o contorno das peças.

Nas versões com 100% de preenchimento, a qualidade das superfícies foi mais comprometida, com camadas mais evidentes e mais ocorrências de regiões com delaminação, como nas peças A1 e A2 com 100% de preenchimento.

Figura 47. Peças metálicas D1 e D2 com 60% de preenchimento



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 48. Peças metálicas D1 e D2 com 100% de preenchimento



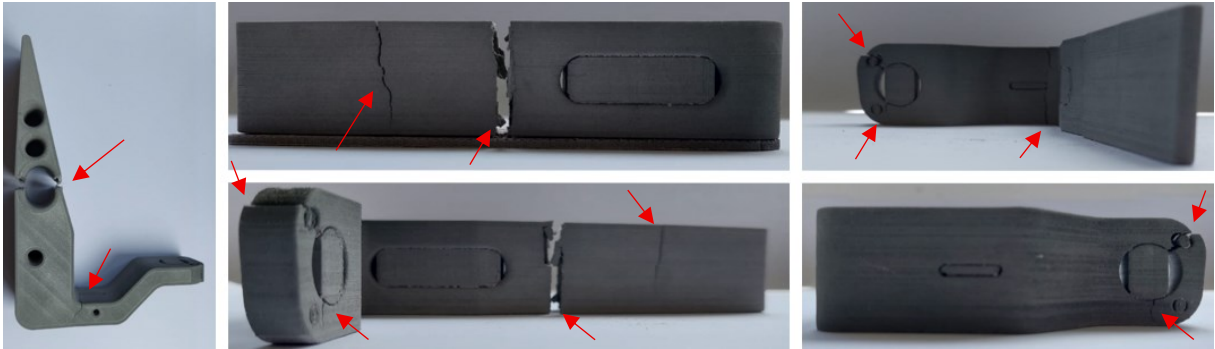
Fonte: Autoria própria (2025).

A peça E, impressa apenas com 60% de preenchimento e mostrada na Figura 49, apresentou fissuras, trincas e rachaduras por toda a peça, em regiões com paredes de espessura fina e em porções com transições abruptas de seção transversal e longitudinal, além do destacamento de segmentos da peça, resultando em três partes após o transporte.

Nenhuma estrutura de suporte apresentou indícios de trincas. Uma hipótese de explicação para tal resultado é a geometria dessas estruturas que foram impressas com padrão triangular e preenchimento de 50%. A simplicidade na geometria provavelmente contribuiu para uma melhor distribuição de tensões durante o processamento, reduzindo o risco de formação de fissuras.

Nenhuma das peças teve suas massas medidas ou dimensões analisadas após a sinterização em função das fissuras, trincas, rachaduras e rupturas poderem interferir nos resultados. As medições seriam conduzidas caso as peças tivessem resultado intactas. O Quadro 21 apresenta um compilado das informações levantadas sobre as peças metálicas em função de preenchimento, fissuras, trincas, rachaduras, delaminação e qualidade de superfície.

Figura 49. Peça metálica E com 60% de preenchimento



Fonte: Autoria própria (2025).

Quadro 21. Empenamento das peças em estado verde

Peça	Preenchimento	Fissuras, trincas e rachaduras	Delaminação	Qualidade da superfície	Observações gerais
A1	60%	Trinca maior e fissura pequena (vista posterior)	Menor delaminação (comparado à A1 100%)	Melhor, menos rugosa (comparado à A1 100%)	-
A1	100%	Trinca sem propagação (vista posterior)	Mais severa (comparado à A1 60%)	Pior, mais rugosidade e camadas mais aparentes (comparado à A1 60%)	-
A2	60%	Duas trincas com propagação quase total (vista frontal e posterior)	Menor delaminação (comparado à A2 100%)	Melhor, menos rugosa (comparado à A2 100%)	-
A2	100%	Trinca mais severa, com propagação quase total (vista frontal)	Mais severa (comparado à A2 60%)	Pior, mais rugosidade e camadas mais aparentes (comparado à A2 60%)	-
B	60%	Rachaduras por toda a peça	-	-	Comprometimento estrutural severo (carga distribuída de 5 t)
C	60%	-	-	-	Colapsou durante o <i>debinding</i> e não foi sinterizada
D1	60%	Fissura no meio da peça e trinca mais severa (no encontro de massas comparado à D1 100%)	Menor delaminação (comparado à D1 100%)	Melhor, menos rugosa (comparado à D1 100%)	Irregularidades na base e contorno na primeira camada destacado do preenchimento
D1	100%	Trinca menos severa (no encontro de massas comparado à D1 60%)	Mais severa (comparado à D1 60%)	Pior, mais rugosidade e camadas mais aparentes (comparado à D1 60%)	Irregularidades na base
D2	60%	Trinca mais severa (no encontro de massas comparado à D2 100%)	Menor delaminação (comparado à D2 100%)	Melhor, menos rugosa (comparado à D2 100%)	Irregularidades na base e contorno na primeira camada destacado do preenchimento
D2	100%	Trinca menos severa (no encontro de massas comparado à D2 60%)	Mais severa (comparado à D2 60%)	Pior, mais rugosidade e camadas mais aparentes (comparado à D2 60%)	Irregularidades na base
E	60%	Fissuras, trincas e rachaduras por toda a peça	-	-	Colapsou em três partes após o manuseio da peça metálica

Fonte: Autoria própria (2025).

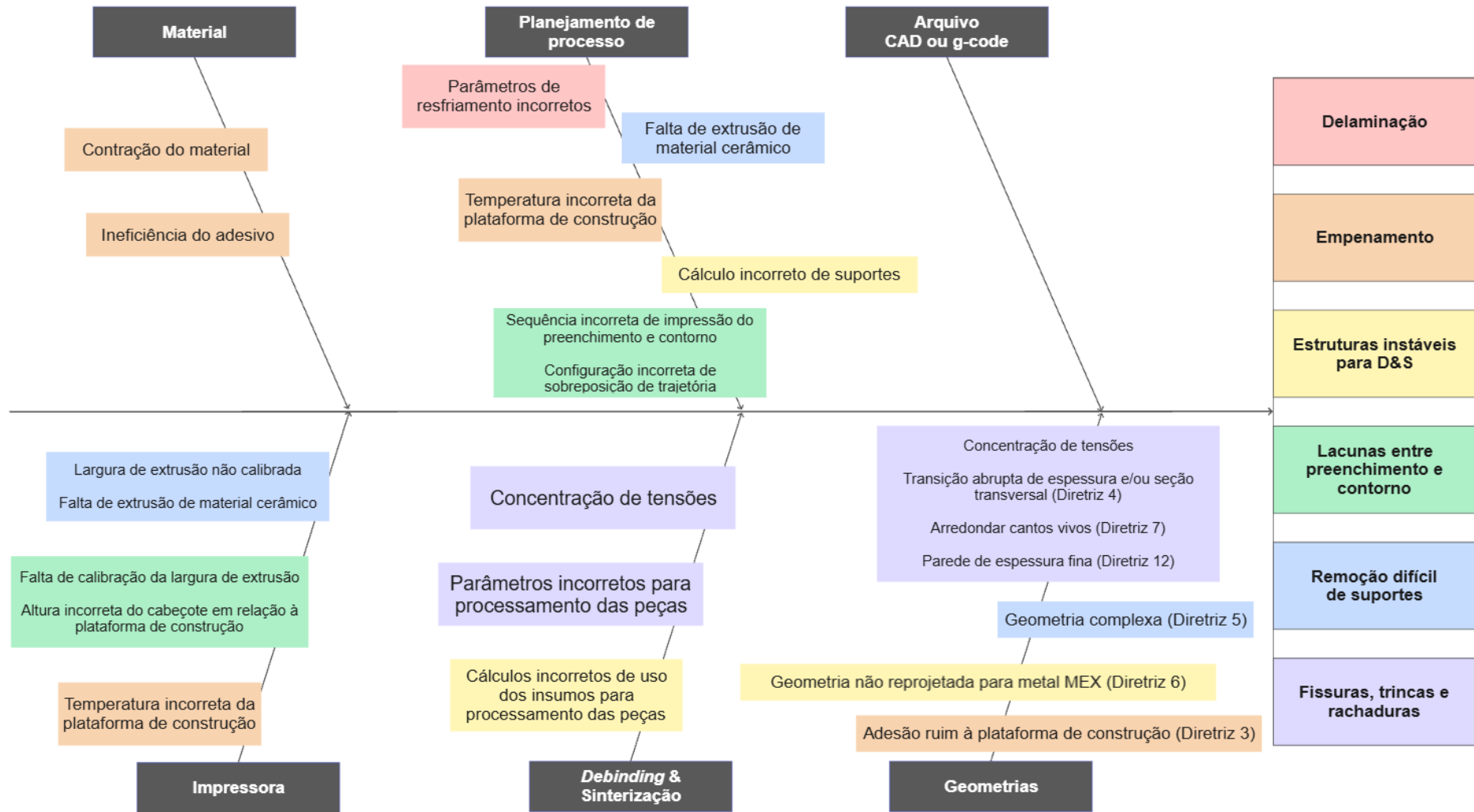
Na sequência, a Figura 50 apresenta a análise do Diagrama de Ishikawa utilizado para investigar a causa e o efeito das falhas observadas. A estrutura do diagrama oferece uma visão clara e estruturada dos fatores que podem impactar na qualidade de um produto. A investigação é feita por meio da divisão das causas em diferentes categorias, sendo elas:

- **Material:** Identifica falhas relacionadas ao tipo e ao comportamento do material utilizado na fabricação. A contração do material pode ser uma causa importante para problemas de aderência e de precisão nas peças, especialmente em materiais com alta variação térmica, como é o caso de materiais metálicos.
- **Planejamento de Processo:** Diretamente ligada à estratégia de fabricação e mostra a relevância do planejamento adequado para garantir a qualidade da peça. Parâmetros incorretos de resfriamento, sequência incorreta de impressão do preenchimento e contorno, ou cálculos incorretos de suportes podem levar a falhas estruturais e dificuldades no processo de manufatura.
- **Arquivo CAD ou G-code:** Causas que surgem da preparação e programação do arquivo digital para a impressão. Definições incorretas, como geometria complexa ou adição inadequada de suportes, podem comprometer a fabricação eficiente e sem defeitos das peças.
- **Impressora:** Trata de possíveis falhas no equipamento utilizado, como uma largura de extrusão não calibrada ou falta de calibração da largura de extrusão. Tais problemas podem afetar diretamente a precisão e a consistência das camadas impressas, impactando a qualidade da peça.
- **D&S:** Abrange etapas cruciais para garantir a integridade e a resistência do material metálico. Parâmetros incorretos, como temperatura e/ou tempo inadequado, podem comprometer a densidade e a resistência mecânica da peça, resultando em falhas estruturais. Além disso, cálculos imprecisos no uso de insumos para o processamento das peças podem afetar o resultado.
- **Geometrias:** Foca nas falhas que podem ocorrer devido ao design da peça e à sua complexidade. Geometrias muito complexas ou mal projetadas podem dificultar durante a impressão ou o D&S por meio da concentração de tensões internas e do surgimento de falhas na aderência entre as

camadas. Ajustes adequados nas geometrias, como a eliminação de transições abruptas de espessura, adaptação de formas circulares e a minimização de concentrações de massa de material, são fundamentais para garantir a viabilidade da impressão e a qualidade do produto.

Percebe-se que as causas levantadas nessa última categoria estão relacionadas às diretrizes propostas, reforçando que as causas potenciais dessas falhas poderiam ser mitigadas com a utilização dessas diretrizes, que são apresentadas na próxima seção.

Figura 50. Investigação de causa e efeito



Fonte: Autoria própria (2025).

4.2 Etapa 3: O artefato

Esta seção apresenta, em cumprimento com o “objetivo específico d”, a proposta de diretrizes de DfAM para peças fabricadas pelo processo de extrusão de material e filamento com carga metálica (DfAM metal MEX), isto é, o artefato desenvolvido.

A proposta de diretrizes foi organizada de acordo com a ordem cronológica de quando se trabalha em um projeto. Inicialmente considera-se o processo de fabricação a ser utilizado para produzir as peças, a viabilidade financeira e qual o cronograma a ser atendido. Após o esclarecimento desses pontos, é projetado o modelo 3D da peça a ser fabricada e o processo de fabricação é planejado.

O Quadro 22 mostra as referências que propuseram cada diretriz proposta, incluindo as de autoria própria ou de convergência das observações deste estudo com as publicações dos autores e fabricantes, isto é, foi verificado durante essa pesquisa. Os Quadros 22 a 37 apresentam os resumos de cada diretriz e imagens para exemplificar as explicações detalhadas.

Quadro 22. Referências de cada diretriz proposta

Diretrizes	Referências
Diretriz nº 1 – Selecionar o processo de fabricação adequado	Diegel <i>et al.</i> (2020); Autoria própria (2025).
Diretriz nº 2 – Avaliar a viabilidade para fazer <i>debinding</i> e sinterização	Autoria própria (2025).
Diretriz nº 3 – Definir a orientação da peça na plataforma de construção	BASF Forward AM (2025); Diegel <i>et al.</i> (2020); Leutenecker-Twelsiek <i>et al.</i> (2016); Adam e Zimmer (2014, 2015); Zimmer e Adam (2012); Autoria própria (2025).
Diretriz nº 4 – Evitar transições abruptas de espessura e seção transversal/longitudinal	Markforged (2025); Autoria própria (2025).
Diretriz nº 5 – Minimizar concentrações de massa de material e material de suporte	Diegel <i>et al.</i> (2020); Markforged (2025); Autoria própria (2025).
Diretriz nº 6 – Assegurar estabilidade estrutural das geometrias para <i>debinding</i>	Markforged (2025); Autoria própria (2025).
Diretriz nº 7 – Arredondar os cantos vivos	Diegel <i>et al.</i> (2020); BASF Forward AM (2025); Markforged (2025); Autoria própria (2025).
Diretriz nº 8 – Adaptar as geometrias circulares na horizontal	BASF Forward AM (2025); Markforged (2025).
Diretriz nº 9 – Considerar a correlação entre parâmetros de projeto	Diegel <i>et al.</i> (2020).
Diretriz nº 10 – Evitar estruturas que não atendam a relação máxima recomendada entre altura e largura	BASF Forward AM (2025).
Diretriz nº 11 – Evitar paredes sem reforço que não atendam a relação máxima recomendada entre altura e largura	BASF Forward AM (2025); Markforged (2025).
Diretriz nº 12 – Evitar estruturas com espessura menor que a recomendada	BASF Forward AM (2025); Diegel <i>et al.</i> (2020); Adam e Zimmer (2014, 2015); Zimmer e Adam (2012).
Diretriz nº 13 – Agregar funcionalidades relacionadas à aparência	Diegel <i>et al.</i> (2020).
Diretriz nº 14 – Definir o preenchimento da peça	BASF Forward AM (2025); Markforged (2025); Autoria própria (2025).
Diretriz nº 15 – Atentar à contração da peça após <i>debinding</i> e sinterização	BASF Forward AM (2025).
Diretriz nº 16 – Atentar às estruturas da peça ao aplicar fatores de escala	Autoria própria (2025).

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.1 Diretriz n° 1 – Selecionar o processo de fabricação adequado

O Quadro 23 apresenta a diretriz n° 1, proposta por Diegel *et al.* (2020), que avalia a necessidade ou não da utilização de uma tecnologia de AM. A análise se faz necessária visto que existem diversos processos de fabricação disponíveis para uso.

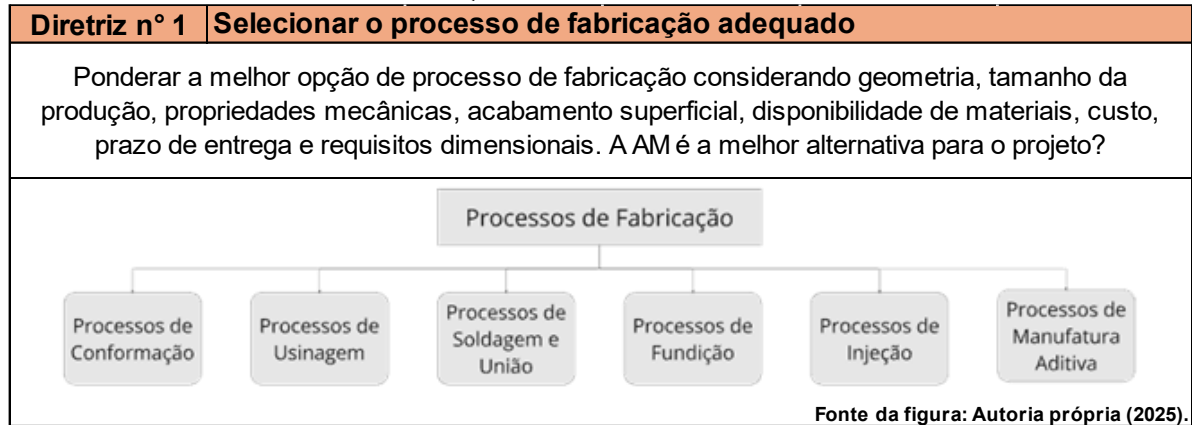
A AM é altamente versátil, permitindo a criação de geometrias complexas, como cavidades internas, paredes finas, estruturas leves e formas orgânicas, que seriam inviáveis ou economicamente desvantajosas com métodos tradicionais. No entanto, o uso da AM deve ser avaliado com base em fatores técnicos e econômicos para garantir que ela seja realmente a melhor alternativa para um determinado projeto. Antes de se optar pela adoção da AM, é essencial considerar os seguintes pontos:

- a) Geometria e complexidade – A AM é mais vantajosa para formas complexas; a fabricação de peças simples é mais eficiente com processo de usinagem ou fundição;
- b) Quantidade de peças – A AM é ideal para prototipagem e pequenos lotes; para produção em massa, a injeção e a fundição pode oferecer maior eficiência;
- c) Propriedades mecânicas e acabamento – A AM pode exigir tratamentos térmicos, usinagem ou polimento posteriores à fabricação para atingir os requisitos de resistência e acabamento;
- d) Materiais disponíveis – Nem todos os materiais usados em métodos convencionais estão disponíveis para AM, e os materiais específicos de AM costumam ter custo mais elevado;
- e) Custo e prazo de entrega – A AM pode envolver altos custos de materiais, equipamentos e pós-processamento, além de prazos de produção mais longos devido à disponibilidade dos equipamentos;
- f) Requisitos dimensionais e tolerâncias – Existem limitações de impressão de peças de dimensões grandes, a depender do volume de construção da impressora e do peso suportado pela plataforma de construção. A AM também é limitada para impressão de peças com dimensões muito pequenas, pois não atinge a mesma precisão que processos como usinagem CNC, podendo exigir etapas adicionais de usinagem após a fabricação.

Se qualquer um desses fatores indicar que a AM não é a melhor alternativa, é recomendável considerar processos convencionais ou uma combinação de AM com métodos convencionais para obter o melhor equilíbrio entre custo, prazo e desempenho. A decisão final deve se basear em uma análise técnica e econômica criteriosa. Se, após essa avaliação, a AM ainda se mostrar a melhor escolha, o projeto pode prosseguir.

A AM deve ser encarada como uma ferramenta poderosa, mas não como uma solução universal para todos os projetos. Ressalta-se, portanto, o questionamento: a AM é a melhor alternativa para o projeto?

Quadro 23. Diretriz n° 1



Fonte: Autoria própria (2025).

Essa diretriz não se enquadra no escopo deste trabalho. Conforme já mencionado, as geometrias estudadas foram cedidas pela empresa parceira e utilizadas pela oportunidade financeira da pesquisa.

De qualquer forma, no caso de selecionar o processo de fabricação adequado para as peças estudadas, o ideal seria utilizar usinagem, processo para o qual as peças foram projetadas. A AM seria uma alternativa de produção para o caso de o prazo de entrega da ferramentaria da empresa ser muito longo.

4.2.2 Diretriz n° 2 – Avaliar a viabilidade para fazer *debinding* e sinterização

O Quadro 24 apresenta a diretriz n° 2, de autoria própria, que está relacionada à viabilidade de se conduzir processos de D&S e foi construída como resultado das experiências adquiridas ao longo do estudo.

A utilização de metal MEX requer necessariamente a aplicação dos processos de D&S para transformar a peça verde em peça metálica. No entanto, esses

processos são financeiramente custosos devido à necessidade de equipamentos especializados, controle preciso de atmosfera e temperatura, além do conhecimento técnico do operador. Por isso, é essencial analisar se o valor agregado da peça final justifica o investimento em D&S.

O prazo de produção também é um fator crítico, já que o ciclo de D&S pode ser longo devido ao tempo de impressão e D&S. Ademais, a disponibilidade e melhor aproveitamento dos lotes nos equipamentos do fornecedor podem afetar a entrega da peça metálica. Atrasos na entrega podem comprometer o cronograma geral do projeto e gerar impactos financeiros e operacionais. A geometria da peça é igualmente determinante para o sucesso do processo. Geometrias complexas podem não resistir aos processos de D&S, levando a deformações ou colapsos. Nesse caso, pode ser necessário reprojeter a peça para garantir estabilidade estrutural, ajustando bases, reforços, espessuras e orientação de impressão.


A escolha do fornecedor é outro fator estratégico. Se o fornecedor tiver experiência com metal MEX, o processo tende a ser mais assertivo e controlado. No entanto, se o fornecedor for especializado em outros processos, como MIM, o risco de falha aumenta. Se o fornecedor estiver disposto a colaborar e adaptar o processo às particularidades da AM, é possível ajustar parâmetros e otimizar os resultados, desde que haja alinhamento técnico e operacional. A dimensão da peça também deve ser considerada, já que ela precisa caber nos fornos de debinding e sinterização com folga suficiente para garantir a circulação uniforme de ácido e calor, evitando trincas ou deformações.

Por fim, o risco de falha deve ser incorporado na análise. Se a peça apresentar fissuras, trincas ou outros defeitos após a sinterização, pode ser necessário refazer o ciclo, aumentando custos e prazos. Se esses riscos ou desafios tornarem o processo inviável, é recomendável retornar à diretriz nº 1 e avaliar se outros métodos de fabricação — como fundição, usinagem ou injeção — podem ser mais adequados para o projeto antes de seguir com o processo por AM. A decisão final deve considerar não apenas a viabilidade técnica, mas também o impacto financeiro e o alinhamento estratégico com os objetivos do projeto a depender da realidade da empresa ou instituição.

O estudo desenvolvido pelas tentativas dessa pesquisa não se caracterizaria como viável para uma empresa, por exemplo, em nenhum dos três âmbitos: (1) as geometrias impressas eram complexas e não foram adaptadas para metal MEX, (2) o

prazo de entrega das peças metálicas foi relativamente longo – aproximadamente dois meses entre contratação do serviço e entrega – e (3) todas as peças apresentaram fissuras, trincas ou rachaduras, o que é impraticável para um processo financeiramente custoso.

Quadro 24. Diretriz n° 2

Diretriz n° 2	Avaliar a viabilidade para fazer debinding e sinterização
<p>Avaliar a viabilidade técnica, econômica e temporal dos processos de D&S, considerando custo, prazo, geometria, dimensão da peça, disponibilidade de fornecedores e risco de falha para garantir que o processo seja adequado ao projeto.</p>	
 <p>Fonte da figura: Autoria própria (2025).</p>	

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.3 Diretriz n° 3 – Definir a orientação da peça na plataforma de construção

O Quadro 25 apresenta a diretriz n° 3, sugerida de maneiras diferentes por BASF Forward AM (2025), Diegel *et al.* (2020), e Adam e Zimmer (2014, 2015); Zimmer e Adam (2012). Ela está relacionada à orientação da peça na plataforma de construção.

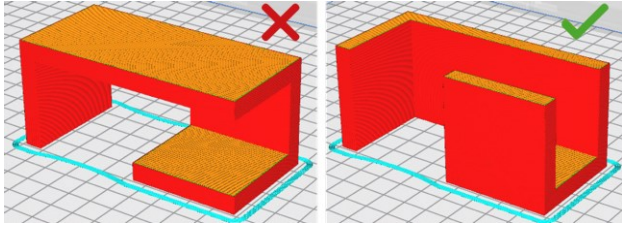
Sabe-se que a orientação de uma peça na plataforma de construção influencia diretamente a precisão, a resistência, o tempo de impressão e a estabilidade da peça durante os processos de D&S. O ideal é que as peças sejam posicionadas de maneira a maximizar a quantidade de superfície em contato com a plataforma de construção, garantindo uma boa adesão durante a impressão e maior estabilidade nas etapas subsequentes. A orientação inadequada pode resultar em falhas na adesão, causando descolamento da peça e perda de material, tempo e recursos. Mesmo com o uso de adesivos específicos, uma peça com pouca área de contato com a plataforma pode se soltar durante o processo, comprometendo o resultado final e exigindo um novo ciclo de planejamento e impressão.

Além da adesão, a orientação da peça afeta diretamente a qualidade final do componente em termos de resistência, propriedades do material, acabamento superficial e necessidade de suporte. Para obter maior resistência, é recomendável que as áreas que exigem mais robustez sejam posicionadas na direção horizontal, considerando a anisotropia dos materiais usados na impressão 3D. Além disso, minimizar a altura total da peça contribui para reduzir o tempo e o custo de impressão, otimizando o processo de fabricação. Outro ponto importante é a impressão de furos, que deve ser feita preferencialmente na direção vertical para garantir maior precisão dimensional e evitar o efeito de "degraus de escada" nas paredes internas.

A determinação da orientação de impressão deve ser definida logo nas primeiras etapas do processo de design, antes da conclusão do projeto final. Esse princípio de determinação antecipada da orientação permite que os projetistas aproveitem os benefícios exclusivos da AM, como maior liberdade de design e complexidade geométrica, para criar peças otimizadas desde o início do desenvolvimento. Esse processo envolve a análise de fatores como resistência mecânica, estabilidade dimensional, qualidade de superfície e facilidade de remoção de suportes. A definição da orientação de impressão em uma fase inicial permite reduzir distorções, melhorar o desempenho mecânico e minimizar retrabalhos durante o processo de D&S.

Portanto, a escolha da orientação de impressão não deve ser tratada como uma decisão isolada, mas como parte integrante da estratégia de design e fabricação. Um alinhamento inadequado pode resultar em falhas estruturais e perda de qualidade, enquanto uma orientação otimizada pode aumentar a resistência, a precisão e o desempenho funcional da peça final.

Quadro 25. Diretriz n° 3

Diretriz n° 3	Definir a orientação da peça na plataforma de construção
<p>Definir a orientação da peça na plataforma de construção já nas primeiras etapas do design é essencial para otimizar o desempenho final. Esse é um fator crítico que influencia a precisão, resistência, qualidade, adesão e estabilidade durante os processos de D&S.</p>	
 <p>Fonte da figura: BASF Forward AM (2025).</p>	

Fonte: Autoria própria (2025).

Essa diretriz é observada como um conhecimento já bastante difundido pelos usuários de AM por MEX. Conforme já mencionado, as geometrias estudadas foram cedidas pela empresa parceira e utilizadas por conta da oportunidade de financiamento da pesquisa, impossibilitando um reprojeto com alterações significativas de geometria.

Na etapa de sugestão do DSR, foram consideradas as melhores orientações de cada modelo para as tentativas realizadas com as peças da empresa parceira. Os modelos B e C não apresentam muitas alternativas para orientações diferentes das escolhidas, mas os modelos A, D e E poderiam ter sido impressos em outras orientações. Foram selecionadas as orientações que otimizariam a adesão da peça à plataforma de construção, evitariam o uso de suportes e possíveis colapsos durante o D&S por conta da ação da gravidade.

4.2.4 Diretriz n° 4 – Evitar transições abruptas de espessura e seção transversal/longitudinal

O Quadro 26 apresenta a diretriz n° 4, que aborda as transições abruptas tanto de espessura como de seção transversal ou longitudinal. Ela foi desenvolvida com base na experiência prática obtida durante este estudo com diversas geometrias que apresentaram esse tipo de característica e no item 15 das diretrizes da Markforged, que estuda a redução de concentrações de tensão otimizando a peça para sinterização.

A segunda parte do título dessa diretriz não foi mencionada de forma explícita nas referências consultadas, sendo, portanto, uma contribuição original resultante da análise e interpretação dos resultados obtidos ao longo deste projeto. A decisão de investigar esse aspecto específico foi motivada pelas dificuldades observadas nas peças que apresentavam variações bruscas na seção, o que levou à busca de literatura complementar para compreender os fenômenos envolvidos e suas implicações no desempenho das peças após os processos de D&S.

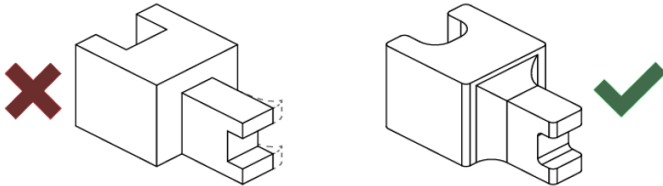
Inicialmente, considerou-se a possibilidade de formular a diretriz em termos de "mudanças abruptas de massa". No entanto, essa abordagem poderia gerar interpretações ambíguas, uma vez que o termo "massa" pode estar relacionado a diferentes aspectos estruturais e de material, dificultando a compreensão exata do

problema e das soluções propostas. A escolha por tratar especificamente de transições abruptas de seção transversal ou longitudinal permitiu abordar o problema de forma mais clara e direta, focando nos efeitos geométricos e térmicos associados a essas variações.

Há pontos de convergência entre essa diretriz e a diretriz "15. Otimização para sinterização - Reduzir concentrações de tensões", proposta pela Markforged. A diretriz do fabricante menciona a importância de reduzir concentrações de tensão ao projetar transições suaves, como o arredondamento de arestas e a introdução de mudanças graduais na espessura. Entretanto, essa orientação é mais geral e não aborda de forma explícita os efeitos específicos de transições abruptas de seção transversal ou longitudinal nos processos de D&S. Portanto, embora ambas as diretrizes compartilhem o princípio de minimizar tensões internas, a diretriz proposta neste trabalho é mais específica ao tratar de variações geométricas abruptas e seus efeitos sobre a estabilidade dimensional e a integridade mecânica das peças após o ciclo de D&S.

A norma ABNT NBR/ISO/ASTM 52910 (2021) também faz referência às consequências das mudanças abruptas de espessura em processos acionados termicamente, como PBF, DED e MEX. A norma ressalta que essas variações podem causar distorções ou problemas de exatidão, uma vez que as seções mais espessas tendem a reter calor, resultando em deformações similares às observadas em processos de moldagem por injeção e fundição. Esse comportamento é consistente com os resultados observados no presente estudo, nos quais peças com seções abruptamente espessas apresentaram deformações e fissuras após o ciclo de sinterização.

Quadro 26. Diretriz n° 4

Diretriz n° 4	Evitar transições abruptas de espessura e seção transversal/longitudinal
<p>Projetar peças com transições graduais de espessura e seção transversal ou longitudinal para reduzir tensões internas, minimizar deformações e otimizar a estabilidade e o desempenho das peças após os processos de D&S.</p>	
	
<p>Fonte da figura: Adaptado de Markforged (2025).</p>	

Fonte: Autoria própria (2025).

Outro fator relevante que reforça a importância dessa diretriz foi a decisão inicial de utilizar peças originais fornecidas por uma empresa parceira como ponto de partida para o estudo. Essa decisão estratégica foi motivada pela oportunidade financeira associada à parceria, além de permitir a obtenção de dados reais sobre o comportamento das peças durante os processos de D&S. As geometrias utilizadas apresentavam variações bruscas de seção, o que permitiu observar diretamente os efeitos dessas transições sobre o desempenho das peças nas tentativas realizadas na etapa de sugestão do DSR.

Adicionalmente, durante os testes, foi constatado que todas as peças apresentaram fissuras ou trincas após o *debinding* exatamente em regiões consideradas de mudança abrupta de seção transversal ou espessura. De qualquer forma, não havia uma diretriz previamente estabelecida para alertar o usuário sobre esse comportamento já na etapa de *debinding*. Essa observação reforça a importância de considerar as transições de seção desde as fases iniciais de projeto, adotando estratégias para suavizar essas variações geométricas e minimizar tensões internas durante os processos de D&S.

Dessa forma, a diretriz proposta enfatiza a necessidade de projetar peças com transições suaves de seção transversal e longitudinal para reduzir o acúmulo de tensões e o risco de falhas estruturais após o ciclo de D&S. A introdução de raios, chanfros ou transições graduais entre seções de diferentes espessuras é uma prática recomendada para promover uma distribuição mais uniforme das tensões térmicas e mecânicas, resultando em maior estabilidade dimensional e resistência mecânica da peça final. Essa abordagem permite não apenas minimizar o risco de fissuras e trincas, mas também otimizar o desempenho funcional da peça em sua aplicação final.

4.2.5 Diretriz n° 5 – Minimizar concentrações de massa de material e material de suporte

O Quadro 27 apresenta a diretriz n° 5, junção de diretrizes propostas por Diegel *et al.* (2020) e Markforged (2025), relacionada à minimização de concentrações de massa de material e material de suporte.

Grandes massas de material em peças de AM aumentam os custos de produção, geram tensões residuais e prolongam o tempo de impressão sem

necessariamente agregar valor de engenharia. Em AM, o uso eficiente de material é essencial para o sucesso do processo, pois o tempo de produção pode ser mais caro que o próprio material. Dessa forma, concentrar material de maneira desnecessária resulta em desperdício e aumento do tempo de fabricação.

Concentrações de material também influenciam negativamente o comportamento térmico da peça durante o D&S. Áreas com maior espessura tendem a reter mais calor, gerando gradientes internos de tensão que podem levar a deformações, fissuras ou falhas estruturais. Além disso, o resfriamento desigual dessas áreas pode comprometer a estabilidade dimensional e a precisão da peça após o ciclo térmico. Por isso, é recomendável distribuir o material de forma uniforme para evitar acúmulos de calor e tensões localizadas.

O uso de material de suporte também deve ser otimizado para garantir estabilidade durante a impressão sem gerar desperdício. Embora o suporte seja essencial para imprimir geometrias complexas, o excesso de material de suporte aumenta o tempo de produção, dificulta a remoção e pode danificar a peça durante o acabamento. A busca por um equilíbrio entre a quantidade de suporte e a integridade estrutural da peça é fundamental para garantir eficiência e reduzir custos.

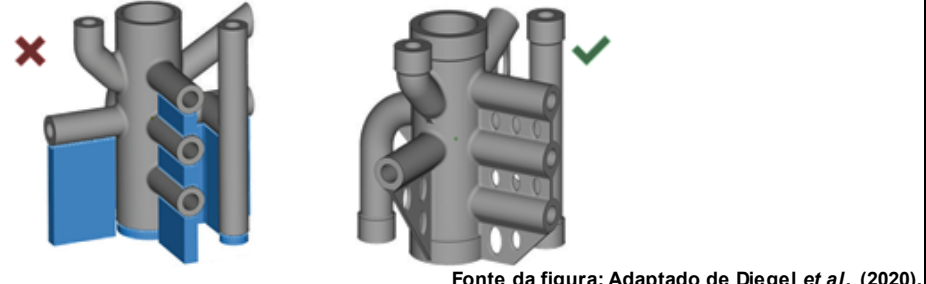
A otimização topológica pode ser uma estratégia que contribui para reduzir concentrações de material e de suporte. Essa técnica redistribui o material de maneira inteligente, removendo massa em áreas de baixa solicitação estrutural e concentrando o material apenas em regiões críticas para o desempenho mecânico. Programas e extensões específicos de CAD permitem realizar esse tipo de análise, auxiliando no projeto peças mais leves e resistentes sem comprometer a estabilidade e a funcionalidade. Assim, a diretriz enfatiza a importância de um projeto equilibrado, que minimize o excesso de material e de suporte para garantir alto desempenho com custos e tempos de produção otimizados.

Uma opção de design que vale considerar é a incorporação do suporte como parte permanente da peça, eliminando a necessidade de remoção após o processo. Nesse caso, a estrutura adicionada, que inicialmente serviria como suporte, torna-se parte integral da peça, o que pode reduzir a quantidade de material impresso, dependendo da geometria e dos alívios adotados, além de possivelmente aumentar a rigidez estrutural. Essa alternativa demonstra como a inclusão de elementos estruturais e a otimização de ângulos e diâmetros podem reduzir o uso de suporte e

os custos de pós-processamento, resultando em um produto final mais eficiente e econômico.

Não foi possível observar de forma satisfatória essa diretriz nas tentativas deste estudo, uma vez que foi realizada apenas a fase inicial, com a impressão e D&S das geometrias originais. Seria viável em uma segunda fase, partindo dos resultados das peças com as geometrias originais, fazer um estudo de minimização de massas e estruturas de suporte, bem com otimização topológica das geometrias.

Quadro 27. Diretriz n° 5

Diretriz n° 5	Minimizar concentrações de massa de material e materiais de suporte
Minimizar concentrações de massa de material e materiais de suporte por meio de distribuição uniforme, otimização topológica e possível incorporação do suporte como parte permanente da peça, visando reduzir tensões internas, custos e tempos de produção sem comprometer a estabilidade e o desempenho da peça.	
Exemplo de peça fabricada por fusão em leito de pó:	

Fonte da figura: Adaptado de Diegel *et al.* (2020).

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.6 Diretriz n° 6 – Assegurar estabilidade estrutural das geometrias para *debinding*

O Quadro 28 apresenta a diretriz n° 6, baseada em uma das diretrizes da Markforged (2025) e complementada pela experiência com D&S, relacionada à estabilidade das peças.

A estabilidade estrutural das peças é determinante para o sucesso do processo de metal MEX, especialmente durante os ciclos de D&S. No estado verde, a peça mantém sua integridade estrutural devido à presença do polímero, mas após o *debinding*, quando o polímero é removido, a peça em estado marrom torna-se extremamente friável (que se fragmenta facilmente). Esse comportamento torna a peça suscetível ao colapso sob o próprio peso devido à ação da aceleração da gravidade.

A Markforged (2025) menciona que, após o *debinding*, as peças em estado marrom devem ser tratadas como uma argila ou massa de modelar, considerando a maleabilidade desse estágio. No entanto, as peças da BASF apresentaram um

comportamento friável e purvulento, hipoteticamente devido à maior quantidade de polímero nos filamentos em comparação com os filamentos da Markforged e à diferença de processos de *debinding*, sendo por solvente o da Markforged e catalítico o recomendado pela BASF. Esse comportamento reforça a necessidade de um projeto estrutural robusto, capaz de resistir às tensões impostas pelos processos de D&S.

Para evitar falhas durante o D&S, é essencial que o projeto contemple a adição de suportes que assegurem a integridade estrutural durante e após o *debinding*. Minimizando superfícies planas voltadas para baixo e adicionando reforços em regiões críticas, é possível melhorar a estabilidade da peça. Geometrias finas ou complexas exigem atenção especial, e o projetista deve revisar manualmente o design da peça no programa CAD para inserir reforços adicionais, se necessário. Em alguns casos, incorporar o suporte como parte permanente da peça pode aumentar a estabilidade estrutural e reduzir o risco de falha, conforme discutido na Diretriz nº 5.

Se as peças não precisarem de suportes, é fundamental que sejam estruturalmente estáveis na orientação em que foram impressas. Evitar peso excessivo na parte superior, estruturas em balanço e geometrias muito altas e finas ajuda a reduzir o risco de colapso. A orientação adequada e o uso de nervuras e reforços melhoram a integridade estrutural da peça, enquanto o aumento da área de contato com a plataforma de construção reduz tensões e melhora a estabilidade.

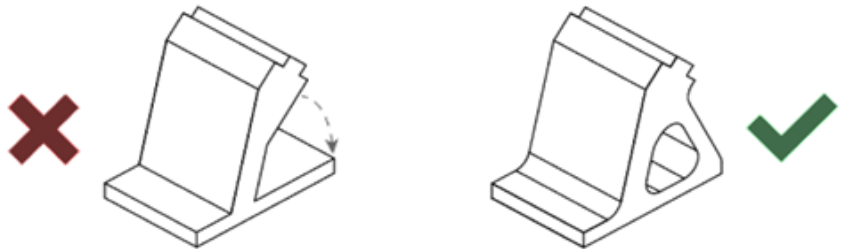
Pontos fracos, como saliências, porções em balanço, paredes finas e regiões sem suporte, devem ser reforçados ou eliminados para evitar deformação ou colapso. Para peças com centros de massa elevados ou geometrias complexas, o uso de suportes internos ou reforços temporários é altamente recomendável. A combinação de uma orientação de impressão adequada, reforços estruturais e design otimizado garante a estabilidade e o desempenho funcional da peça metálica.

Observou-se a importância dessa diretriz nas tentativas deste trabalho especificamente durante o processo de *debinding* da Peça C, que revelou instabilidade estrutural. O perfil do UltiMaker Cura, utilizado para o planejamento do processo de impressão, não considerou a necessidade de suporte para *debinding*, resultando no colapso de algumas estruturas. Esse resultado levou à especulação de que o perfil do programa de planejamento seja baseado apenas em requisitos geométricos para a impressão, sem levar em conta o comportamento da peça em estado marrom. Levanta-se a hipótese de que o perfil calcule as estruturas de suporte considerando apenas a geometria de impressão, sem preparo para as tensões

internas e a friabilidade resultante após a remoção dos aglutinantes, o que pode levar ao desmanche da peça.

Portanto, é importante destacar que, no processo de metal MEX, mesmo com o perfil desenvolvido em parceria entre UltiMaker e BASF, o fato de uma peça ser impressa sem suporte não assegura que ela resistirá sem danos aos processos de D&S. Assim, é recomendável avaliar a necessidade de suportes adicionais, considerando não apenas os requisitos geométricos de impressão, mas também o comportamento da peça e desafios técnicos durante os processos de D&S.

Quadro 28. Diretriz n° 6

Diretriz n° 6	Assegurar estabilidade estrutural das geometrias para <i>debinding</i>
<p>Assegurar a estabilidade estrutural das peças em estado marrom é fundamental para que elas resistam ao ciclo de <i>debinding</i>. Para isso, é importante considerar a adição de suportes para evitar colapsos provocados pela ação da gravidade sobre a peça friável e pelas tensões internas geradas durante a remoção dos aglutinantes.</p>	
 <p style="text-align: right; font-size: small;">Fonte da figura: Adaptado de Markforged (2025).</p>	

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.7 Diretriz n° 7 – Arredondar os cantos vivos

O Quadro 29 apresenta a diretriz n° 7, proposta por Diegel *et al.* (2020), pela BASF Forward AM (2025) e pela Markforged (2025), relacionada ao arredondamento dos cantos da peça.

As concentrações de tensões térmicas durante o D&S podem intensificar e exacerbar a delaminação das camadas ou o surgimento de rachaduras na peça verde. Esses problemas são mais comuns em regiões onde há entalhes, mudanças abruptas na seção transversal ou cantos vivos. Durante o ciclo térmico, essas regiões estão sujeitas a concentrações de tensões, o que pode levar a deformações ou falhas estruturais. A adição de raios em áreas críticas ajuda a distribuir essas tensões de maneira mais uniforme, reduzindo o risco de rachaduras e separações entre camadas que podem comprometer as propriedades mecânicas da peça após a sinterização.

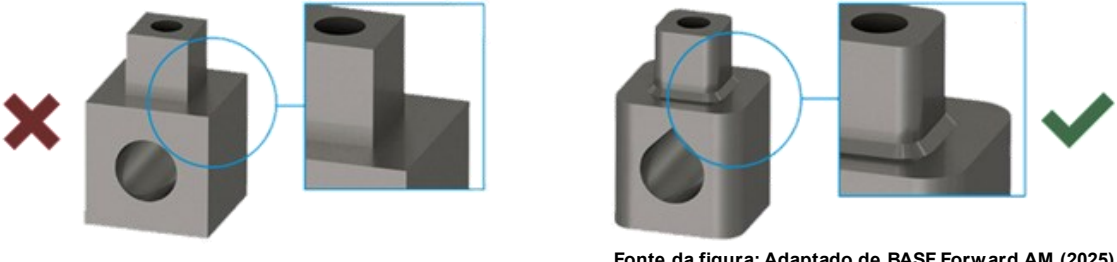
Arredondar os cantos vivos também pode otimizar o processo de fabricação. Cantos agudos exigem maior precisão na deposição de material e no pós-processamento, o que pode aumentar o tempo e o custo de produção. Além disso, regiões com cantos vivos são mais propensas a apresentar falhas durante o ciclo de D&S devido à dificuldade de preenchimento uniforme do material e ao acúmulo de tensões. Diegel *et al.* (2020) afirmam que uma boa prática é o raio ter aproximadamente um quarto da espessura da peça, o que proporciona um equilíbrio adequado entre resistência estrutural e facilidade de fabricação.

A ergonomia e o uso prático da peça também são beneficiados com o arredondamento dos cantos. Peças com cantos vivos podem ser desconfortáveis para segurar e utilizar, especialmente em componentes que requerem manuseio frequente ou que entram em contato direto com o usuário. A eliminação de cantos agudos torna a peça mais confortável ao toque e reduz o risco de acidentes ou desconforto durante o uso. Essa prática é especialmente útil em componentes de equipamentos industriais ou ferramentas manuais, onde o conforto e a segurança são fatores críticos.

Por fim, o arredondamento dos cantos pode facilitar o pós-processamento. Cantos vivos aumentam a complexidade de operações como polimento, usinagem de acabamento e tratamento térmico, além de dificultar a remoção de resíduos após o D&S. Superfícies arredondadas tornam o processo de pós-processamento mais eficiente, reduzindo o tempo e os custos envolvidos. Além disso, em peças com geometrias complexas, o arredondamento dos cantos pode reduzir a necessidade de suportes, melhorando o acabamento superficial e a integridade estrutural da peça final.

O tema dessa diretriz não foi analisado pelas tentativas desse estudo. Mesmo as peças com geometrias originais com alguns cantos vivos foram impressas com raios para evitar acúmulo de tensões nas arestas das peças. Uma vez que já é de conhecimento comum arredondar cantos vivos de peças metálicas para reduzir a concentração de tensões, não foi realizada nenhuma impressão de peças com cantos vivos com a finalidade de comparar os resultados.

Quadro 29. Diretriz n° 7

Diretriz n° 7	Arredondar os cantos vivos
<p>Arredondar os cantos vivos evita concentrações de tensões, reduz o risco de rachaduras e delaminação, facilita o preenchimento e o pós-processamento, melhora o conforto no manuseio e diminui a necessidade de reforços e suportes, podendo resultar em melhor acabamento e menor custo de produção.</p>	
 <p data-bbox="890 721 1396 739">Fonte da figura: Adaptado de BASF Forward AM (2025).</p>	

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.8 Diretriz n° 8 – Adaptar as geometrias circulares na horizontal

O Quadro 30 apresenta a diretriz n° 8, proposta pela BASF Forward AM (2025), relacionada às geometrias circulares na horizontal.

Geometrias circulares são mais bem fabricadas quando o eixo de rotação está alinhado com a direção de empilhamento das camadas de impressão, o que ajuda a evitar o fenômeno de ovalização. A altura da camada também influencia diretamente na precisão dimensional e na fidelidade da forma, sendo que camadas mais finas tendem a aumentar a definição dos contornos e da circularidade, mas aumentam o tempo de impressão.

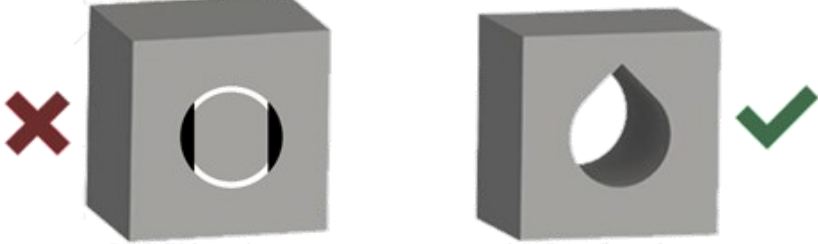
Para furos rosqueados, a BASF Forward AM (2025) recomenda retrabalhá-los após a impressão, independentemente da direção ou tamanho. O diâmetro do furo deve ser projetado de acordo com o diâmetro do furo base, permitindo que a rosca seja refeita posteriormente com um processo de usinagem ou rosqueamento. A impressão de roscas diretamente na peça é geralmente ineficiente, devido à baixa resolução das camadas e ao acúmulo de material nas bordas, o que pode comprometer o encaixe e a funcionalidade da rosca. O retrabalho dos furos após a impressão melhora o ajuste e a resistência da peça final, além de reduzir o risco de falhas funcionais.

Já a Markforged (2025), apresenta uma seção sobre pós-processamento de peças metálicas e recomenda que alguns furos roscados sejam impressos e outros rosqueados com macho a depender das dimensões e orientação da rosca (vertical, horizontal ou angulada).

Uma estratégia eficaz para melhorar a qualidade e estabilidade de estruturas circulares na horizontal é modificar sua geometria para uma morfologia semelhante à de uma gota nas situações em que o eixo do furo está perpendicular à direção de empilhamento da peça. Esse formato facilita a impressão sem a necessidade de suportes, já que a base em forma de gota oferece maior estabilidade estrutural e reduz o risco de deformação durante o ciclo de D&S. Diferentemente de furos ou pinos cilíndricos, a forma de gota cria um ponto de apoio natural que distribui melhor as tensões térmicas e mecânicas, além de melhorar o acabamento superficial e a precisão dimensional. Imprimir essas geometrias com o eixo de rotação alinhado à direção de empilhamento das camadas também ajuda a manter a circularidade e a estabilidade estrutural, especialmente em peças sujeitas a altas tensões durante o processo de fabricação.

Essa diretriz não foi avaliada nas tentativas deste estudo, uma vez que apenas as geometrias originais foram processadas e a inclusão desses elementos exigiria o controle de uma variável adicional antes da obtenção do sucesso do primeiro lote.

Quadro 30. Diretriz n° 8

Diretriz n° 8	Adaptar as geometrias circulares na horizontal
<p>Alinhar o eixo de rotação com a direção de impressão melhora a circularidade, enquanto adotar uma morfologia em forma de gota e retrabalhar furos rosqueados melhora o acabamento, reduz tensões e facilita o pós-processamento por evitar suportes.</p>	
	

Fonte da figura: Adaptado de BASF Forward AM (2025).

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.9 Diretriz n° 9 – Considerar a correlação entre parâmetros de projeto

O Quadro 31 apresenta a diretriz n° 9, proposta por Diegel *et al.* (2020), que aborda a correlação de parâmetros de projeto.

Existem poucas regras de design para AM que podem ser aplicadas universalmente a todas as geometrias, materiais, tecnologias e peças. Muitos parâmetros de design dependem de outros e das condições de impressão, o que torna difícil encontrar valores precisos que funcionem em todos os casos. No entanto, à

medida que um projetista desenvolve um entendimento mais profundo e acumula experiência sobre as complexidades dos processos de AM, ele se torna progressivamente mais capaz de projetar peças que serão impressas corretamente na primeira tentativa.

Um exemplo dessa variabilidade nas diretrizes de design é o tamanho mínimo de furos ou ranhuras em uma peça produzida por PBF de polímeros, que depende da espessura da peça. À medida que a peça aumenta em espessura, o pó não fundido em furos estreitos tende a se fundir parcialmente, tornando-se impossível de remover. Além disso, diferentes máquinas de PBF produzem peças de qualidades distintas, já que operam com diferentes temperaturas, espessuras de camada e parâmetros de varredura a laser. Portanto, o tamanho mínimo de furos ou ranhuras está diretamente relacionado à espessura da peça, à altura da camada, à orientação de impressão e às especificações da máquina utilizada.

O mesmo princípio se aplica às folgas entre peças móveis. Quanto maior a área de superfície das peças em contato próximo, maior deve ser o espaço entre elas para permitir movimento sem interferência. Isso ocorre porque áreas de superfície maiores retêm calor por mais tempo, causando a fusão do pó entre as peças móveis. A folga adequada para peças móveis depende, portanto, da área de contato, da orientação de impressão, das condições térmicas e da precisão da máquina utilizada.

Para processos de metal MEX, essa correlação de parâmetros pode ser ainda mais sensível devido à complexidade adicional dos processos de D&S. No metal MEX, a contração volumétrica da peça durante a sinterização pode alterar a precisão dimensional prevista, tornando essencial o ajuste dos parâmetros de design para compensar essa variação. Furos e ranhuras projetados próximos ao limite mínimo podem se deformar ou se fechar completamente após o ciclo térmico, exigindo um dimensionamento inicial maior para acomodar a contração. A orientação de impressão também é crítica, já que peças com centros de massa elevados ou estruturas em balanço estão mais sujeitas a deformações e colapsos. Em peças móveis de metal MEX, é recomendável aumentar ligeiramente as folgas para permitir a movimentação após a sinterização, considerando a contração volumétrica e o acúmulo de tensões térmicas.

Muitos dos valores apresentados nas diretrizes de design para processos específicos de AM devem ser usados apenas como referência geral, já que outros parâmetros de design podem afetar os números indicados. Quando houver dúvidas,

é sempre melhor imprimir uma peça de teste para verificar se os parâmetros escolhidos funcionarão corretamente no contexto específico da peça, considerando os efeitos do D&S e as características da máquina utilizada.

Essa diretriz não foi avaliada nas tentativas deste estudo, uma vez que há necessidade de extensa investigação de correlação entre parâmetros, tema que foge do escopo dessa pesquisa de DfAM metal MEX.

Quadro 31. Diretriz n° 9

Diretriz n° 9	Considerar a correlação entre parâmetros de projeto
<p>Considerar a correlação entre parâmetros de design e condições de impressão é essencial para garantir precisão dimensional, funcionalidade e estabilidade em processos de AM. Em metal MEX é importante considerar também as particularidades dos processos de D&S.</p>	
<p>Exemplo com polímeros: relação entre a dimensão do furo e a espessura do material.</p> <p>Os furos de menor dimensão são obstruídos em regiões de maior espessura das peças. Na imagem, os furos de 0,5 mm, 0,8 mm e 1 mm estão fechados na região da peça com espessura de 10 mm.</p>	 <p>Fonte da figura: Diegel et al. (2020).</p>

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.10 Diretriz n° 10 – Evitar estruturas que não atendam a relação máxima recomendada entre altura e largura

O Quadro 32 apresenta a diretriz n° 10, sugerida pela BASF Forward AM (2025), relacionada à prevenção do colapso ou distorção de estruturas da peça durante os processos de D&S.

Recomenda-se que, para prevenir colapso ou distorção da peça durante D&S, a relação entre altura e largura da peça deve ser menor que 3:1.

É possível que estruturas passem por deformações a altas temperaturas antes das partículas metálicas se unirem completamente, tendendo a colapsar ou ficar distorcidas caso essa não seja respeitada.

Essa diretriz não foi observada nas tentativas deste estudo, uma vez que apenas as geometrias originais foram avaliadas.

Quadro 32. Diretriz n° 10

Diretriz n° 10	Evitar estruturas que não atendam a relação máxima recomendada entre altura e largura
Evitar estruturas com relação entre altura e largura maior que 3:1.	
Fonte da figura: Adaptado de BASF Forward AM (2025).	

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.11 Diretriz n° 11 – Evitar paredes sem reforço que não atendam a relação máxima recomendada entre altura e largura

O Quadro 33 apresenta a diretriz n° 11, sugerida pela BASF Forward AM (2025) e pela Markforged (2025), relacionada à prevenção de rachaduras, colapso ou distorção de paredes sem reforço da peça durante os processos de D&S. Recomenda-se que, para prevenir rachaduras, colapso ou distorção da peça durante D&S, deve ser considerado manter a relação entre altura e largura das paredes sem suporte da peça menor que 6:1. Assim como nas situações da diretriz anterior, é possível que estruturas passem por deformações a altas temperaturas antes das partículas metálicas se unirem completamente, tendendo a rachar, colapsar ou ficar distorcidas caso a relação entre altura e largura da estrutura seja maior que 6:1.

Essa diretriz não foi observada nas tentativas deste estudo, uma vez que apenas as geometrias originais foram avaliadas.

Quadro 33. Diretriz n° 11

Diretriz n° 11	Evitar paredes sem reforço que não atendam a relação máxima recomendada entre altura e largura
Evitar paredes sem reforço com relação entre altura e largura maior que 6:1.	
Fonte da figura: Adaptado de BASF Forward AM (2025).	

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.12 Diretriz n° 12 – Evitar estruturas com espessura menor que a recomendada

O Quadro 34 apresenta a diretriz n° 12, sugerida de diferentes maneiras por BASF Forward AM (2025), Djokikj e Kandikjan (2022) e Adam e Zimmer (2014, 2015); Zimmer e Adam (2012). Ela está relacionada à orientação da peça na plataforma de construção. Recomenda-se pela BASF Forward AM (2025), fabricante do material utilizado na pesquisa, projetar peças com paredes maiores que 1 mm em estado verde, pois paredes finas com espessura inferior a 1 mm podem sofrer distorções nos processos de D&S. Por exemplo, as paredes finas vistas na imagem da esquerda do Quadro 34 foram impressas com contornos com uma largura de extrusão de 0,4 mm e apresentaram distorções significativas no processo de sinterização devido à espessura insuficiente. Além disso, é necessário um número limitado de contornos para uma boa adesão entre as seções das paredes e para minimizar falhas nas paredes durante a sinterização, como visto na imagem da direita do Quadro 34.

Essa diretriz não foi observada nas tentativas deste estudo, uma vez que apenas as geometrias originais foram avaliadas.

Quadro 34. Diretriz n° 12

Diretriz n° 12	Evitar estruturas com espessura menor que a recomendada	
<p>Projetar peças com paredes maiores que 1 mm em estado verde, pois paredes finas com espessura inferior a 1 mm podem sofrer grandes distorções nos processos de D&S. Ao planejar o processo, é necessário manter um número limitado de contornos para uma boa adesão entre as seções das paredes e para minimizar falhas nas paredes durante a sinterização.</p>		
<p>Cubo sem preenchimento sinterizado com distorções construído por paredes com largura de extrusão de 0,4 mm.</p>		 <p>Delaminação de parede após sinterização.</p>
<p>Fonte da figura: Adaptado de BASF Forward AM (2025).</p>		

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.13 Diretriz n° 13 – Agregar funcionalidades relacionadas à aparência


O Quadro 35 apresenta a diretriz n° 13, proposta por Diegel *et al.* (2020), relacionada à aparência das peças. A liberdade de design proporcionada pela AM possibilita a criação de formas complexas e personalizadas, permitindo que as peças possuam características estéticas únicas, sem que isso implique custos adicionais

significativos. De fato, a incorporação de detalhes cosméticos, como logotipos, números de peças e instruções, não acarreta custos elevados e, muitas vezes, pode ser integrada ao design das peças sem onerar o processo produtivo. A inclusão desses elementos contribui para a melhoria da montagem, facilita a identificação da marca do produto e otimiza o controle de inventário.

Embora o título da regra publicada por Diegel *et al.* (2020) seja “não custa mais caro fazer as coisas bonitas”, o custo adicional de agregar funcionalidades pode ser relativo. Ainda assim, a aplicação de tais práticas, mesmo que envolva um pequeno aumento nos custos, pode ser considerada vantajosa quando se leva em conta os benefícios de melhorar a organização e a eficiência do processo de montagem, reduzir o risco de confusão entre peças similares e facilitar a identificação de peças direita e esquerda em um processo com cadência sem margem para erros. Além disso, a implementação desses elementos estéticos e funcionais minimiza retrabalhos e eventuais erros de montagem, proporcionando maior confiabilidade ao processo. A agregação de funcionalidades que vão além da estética, no entanto, deve ser vista como uma estratégia para adicionar valor ao design, com a intenção de otimizar a função das peças no sistema como um todo.

Em experimentos realizados em paralelo com as tentativas desse estudo, esse recurso foi empregado para a identificação de peças de teste, mostradas na imagem do Quadro 35. Entretanto, não houve tentativa formal de avaliação dessa diretriz, uma vez que a inclusão desses elementos exigiria o controle de uma variável adicional antes da obtenção do sucesso do primeiro lote.

Quadro 35. Diretriz nº 13

Diretriz nº 13	Agregar funcionalidades relacionadas à aparência
<p>Incorporar elementos estéticos e funcionais às peças, aproveitando a liberdade de design da AM, otimiza a organização, a eficiência do processo de montagem e a identificação, sem custos elevados.</p>	
<div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: right; font-size: small;">Fonte da figura: Autoria própria (2025).</p>	

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.14 Diretriz n° 14 – Definir o preenchimento da peça

O Quadro 36 apresenta a diretriz n° 14, baseada em citações da BASF Forward AM (2025) e da Markforged (2025), relacionada ao preenchimento das peças. Não foram encontradas orientações claras de como o preenchimento deve ser avaliado ou considerado como uma diretriz para planejar o processo. Foram encontradas apenas duas citações, uma da BASF e outra da Markforged:

1. BASF Forward AM (2025): faz apenas declarações sobre preenchimentos de 60 e 100%;
2. Markforged (2025): faz declarações acerca de como o preenchimento impacta no tempo de D&S (mais especificamente na etapa de *debinding*) e acerca de peças construídas sem camadas de topo e base, para uso com estruturas treliçadas, por exemplo.

No conjunto de diretrizes da BASF Forward AM (2025) a empresa se atém a afirmar que peças com 100% de preenchimento tendem a apresentar menos problemas nas fases de D&S. Em complemento, ela apresenta um único teste prático com preenchimento de 60% em uma peça que não possui função estrutural. A falta de maiores informações impossibilita elaborar maiores conclusões sobre o impacto desta característica sobre os produtos. Não há também qualquer menção aos impactos que cada padrão de preenchimento pode gerar na peça. No PPP UltiMaker Cura, as duas configurações padrão de preenchimento são 60 e 100%, como mostrado nas imagens do Quadro 36, desenvolvidas em parceria entre a fabricante e a UltiMaker.

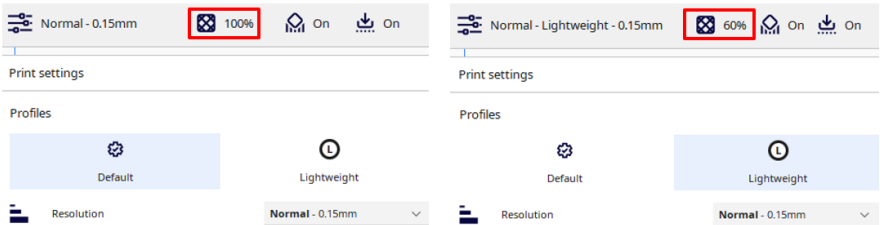
Já nas diretrizes da Markforged (2025), referentes ao sistema Metal X™, destaca-se o impacto do volume de preenchimento sobre o tempo de *debinding*. Como essa etapa do processo é realizada com solvente líquido, maiores volumes de material aumentam o tempo necessário para o processo remover o aglutinante das peças. Assim, as recomendações alertam o usuário a considerar este tempo no processo quando se trabalha com peças com 100% de preenchimento. No PPP, a empresa permite escolher os padrões de preenchimento giróide e triangular quando o usuário não opta por realizar uma impressão com 100% de preenchimento. Nessas duas opções, o usuário não pode escolher a porcentagem desejada, a característica é determinada automaticamente pelo PPP. Uma outra recomendação sobre preenchimento diz respeito à impressão de peças sem camadas de topo e base (com

preenchimento exposto). Nessas situações, a empresa menciona a importância do uso do recurso de *raft* para evitar descolamentos da mesa durante a impressão.

Diante do exposto, identificou-se uma ausência de recomendações ou exemplos sobre o impacto de diferentes níveis de preenchimento nas peças. Uma hipótese para essa lacuna é que essa característica está intrinsecamente relacionada à geometria da peça, o que torna difícil determinar um valor específico de preenchimento que seja eficaz para todos os casos de maneira uniforme.

Observa-se também que, além de superficiais, as menções não abordam de forma consistente o resultado estrutural das peças. A Markforged foca mais no impacto no processo, sem aprofundar os efeitos no resultado final, após o D&S. Dessa forma, recomenda-se que o usuário realize testes preliminares com uma geometria específica para identificar o valor de preenchimento que ofereça o melhor resultado em termos estruturais e de custo-benefício, considerando o tempo de produção e a quantidade de material utilizado. Como o processo é altamente dependente da geometria da peça, não é possível definir um valor universal que seja eficaz para todos os casos.

Quadro 36. Diretriz n° 14

Diretriz n° 14 Definir o preenchimento da peça com o auxílio de testes preliminares	
Definir o preenchimento da peça com o auxílio de testes preliminares a fim de identificar qual a melhor alternativa em termos de resultados estruturais e custo-benefício para a geometria a ser utilizada.	
Imagens do programa de planejamento de processo Ultimaker Cura 5.3.0.	
Fonte da figura: Autoria própria (2025).	

Fonte: Autoria própria (2025).

As tentativas realizadas por esse estudo não foram realizadas em quantidade significativa para estabelecer correlações sobre o assunto dessa diretriz. As observações das peças após os processos de D&S revelaram variações na integridade e qualidade da superfície, dependendo da porcentagem de preenchimento. As peças com 60% e 100% de preenchimento apresentaram fissuras, trincas e delaminação, mas não foi possível identificar um padrão claro que associasse diretamente o preenchimento à qualidade das peças.

A peça A1 com 60% de preenchimento teve uma trinca maior e uma fissura pequena na vista posterior, enquanto a versão de 100% apresentou trinca menos pronunciada, mas maior severidade de delaminação nas vistas laterais e pior qualidade da superfície. Comportamento semelhante foi observado nas peças A2, onde o preenchimento de 60% gerou trincas quase completas, enquanto o de 100% resultou em uma trinca mais severa e propagada, além de mais delaminação e rugosidade na superfície. A peça B, com 60% de preenchimento, apresentou rachaduras significativas já no *debinding*, sendo amplificadas na sinterização. A peça C não foi sinterizada por ter colapsado durante o *debinding*. Já as peças D1 e D2, com 60% e 100% de preenchimento, mostraram trincas nos pontos de encontro das massas e delaminação nas superfícies, sendo mais severas nas peças com 60%. A peça E, com 60% de preenchimento, teve fissuras e rachaduras por toda sua estrutura, especialmente nas paredes finas e nas transições abruptas. Enquanto as estruturas de suporte, com padrão triangular e 50% de preenchimento, não apresentaram trincas, provavelmente devido à sua geometria simplificada, que ajudou a distribuir as tensões de forma mais eficiente.

Ademais, a Up3D (empresa contratada para realizar o serviço de D&S), deixou claro que a Raise3D (fabricante do sistema MetalFuse) indica apenas que as peças sejam fabricadas com 100% de preenchimento, diferente dos perfis padronizados no PPP UltiMaker Cura em parceria com a BASF, fabricante do filamento.

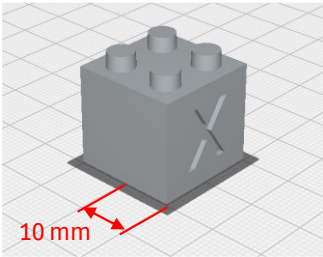
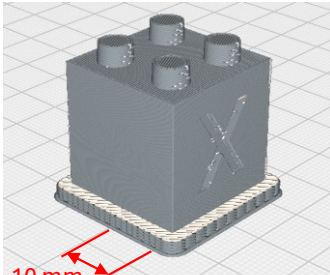
4.2.15 Diretriz n° 15 – Atentar à contração da peça após *debinding* e sinterização

O Quadro 37 apresenta a diretriz n° 15, sugerida pela BASF Forward AM (2025). Ela está relacionada à compensação da contração da peça impressa para obtenção das dimensões corretas após a sinterização. A contração da peça após o processo de *debinding* e sinterização ocorre devido à redução de volume do material polimérico durante a remoção do polímero e a transformação da carga metálica no material final. No caso do BASF Ultrafuse® 17-4PH, que é um filamento com matriz polimérica e carga de aço inoxidável, o processo de sinterização envolve a compactação das partículas metálicas, resultando em uma redução significativa de tamanho. Esse comportamento é esperado e precisa ser compensado para garantir que as dimensões finais da peça atendam às especificações de projeto.

O PPP, como o UltiMaker Cura, facilita essa compensação ao realizar automaticamente os ajustes nas dimensões da peça com base nas propriedades do material. No entanto, caso o programa utilizado não tenha essa função, a compensação pode ser feita pelo ajuste da escala da peça no programa CAD. As recomendações específicas para compensação do Ultrafuse® 17-4PH são 119% para os eixos X e Y e 122% para o eixo Z, conforme orientado pela BASF FORWARD AM (2022), levando em consideração a contração esperada durante o processo de D&S.

Embora seja possível realizar ajustes no programa CAD, esse processo é geralmente mais trabalhoso e pode ser propenso a erros, pois envolve alterações diretas nas dimensões do modelo 3D. Por isso, a compensação no PPP é a abordagem mais prática e recomendada, garantindo que a peça final atenda às especificações desejadas com maior precisão e eficiência. Além disso, ao utilizar o PPP, o projetista pode visualizar as compensações em tempo real, tornando o processo de ajuste mais transparente e controlado.

Quadro 37. Diretriz n° 15

Diretriz n° 15 Atentar à contração da peça após debinding e sinterização	
Compensar a contração da peça impressa para obter as dimensões corretas após a sinterização. Caso não seja possível utilizar o programa de planejamento de processo que faz a compensação automaticamente com base nas propriedades do material, o ajuste pode ser feito no programa CAD.	
 <p>Peça do CAD sem compensação (antes de solicitar o fatiamento ao programa)</p>	 <p>Peça com compensação realizada pelo programa de planejamento de processo</p>
<small>Fonte da figura: Autoria própria (2025).</small>	

Fonte: Autoria própria (2025).

Essa diretriz não foi observada nas tentativas desta pesquisa. Foi utilizada a compensação automática do programa UltiMaker Cura 5.3.0 para todas as peças da etapa de sugestão do DSR e não foram realizadas análises dimensionais das peças metálicas resultantes por conta das trincas, rachaduras e colapsos.

4.2.16 Diretriz n° 16 – Atentar às estruturas da peça ao aplicar fatores de escala

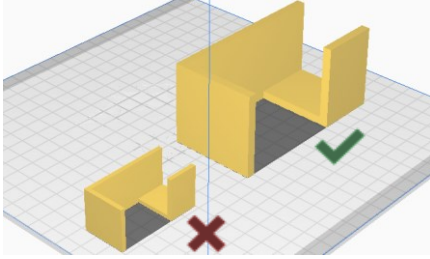
O Quadro 38 apresenta a diretriz n° 16, de autoria própria, que aborda o uso de fatores de escala. Esta diretriz é derivada da experiência prática com diversas geometrias e reflete a importância de uma análise cuidadosa ao aplicar fatores de escala durante o processo de planejamento AM. Embora a diretriz de contração seja frequentemente seguida, e muitas vezes o PPP realize esse processo automaticamente, é fundamental que o projetista verifique as geometrias da peça e, se necessário, faça ajustes no modelo ainda no CAD. Essa verificação preventiva ajuda a evitar problemas durante a impressão e garante que as peças atendam às especificações desejadas mitigando desperdícios.

Particularmente, ao aplicar escala em uma peça no programa de planejamento do processo, é crucial atentar-se às estruturas que podem sofrer alterações significativas. Paredes muito finas podem não ser corretamente preenchidas, resultando em falhas de impressão ou baixa resistência, enquanto estruturas com material excessivo podem ser otimizadas, aliviando a necessidade de material adicional e garantindo um melhor desempenho estrutural.

Além disso, é importante verificar se os fabricantes de impressoras 3D adotam ou têm diretrizes semelhantes, o que pode facilitar a padronização e aumentar a confiabilidade do processo. Como a escala de uma peça afeta diretamente sua qualidade e viabilidade de produção, essa diretriz visa promover uma abordagem mais criteriosa e eficiente no uso de fatores de escala.

Essa diretriz, embora não tenha sido formalmente observada nas tentativas, foi baseada, como já mencionado, em experiências anteriores com aplicação de escala no PPP sem atenção aos problemas que poderiam acarretar dessa ação. A aplicação desses ajustes diretamente no CAD pode prevenir falhas e garantir que as peças produzidas atendam às expectativas de resistência e funcionalidade sem comprometer o custo com desperdícios.

Quadro 38. Diretriz n° 16

Diretriz n° 16	Atentar às estruturas da peça ao aplicar fatores de escala
<p>Verificar as geometrias das peças e aplicar ajustes preferencialmente no CAD, embora seja possível usar o recurso de ajuste de escala do programa de planejamento de processo, a fim de evitar desperdícios e problemas que podem não ser percebidos nesse programa, garantindo melhor desempenho estrutural e eficiência no processo.</p>	
<p>Peça à esquerda reduzida com aplicação do recurso de escala do programa de planejamento de processo.</p> <p>Paredes ficaram muito finas e podem apresentar problemas durante a impressão.</p>	 <p>Fonte da figura: Autoria própria (2025).</p>

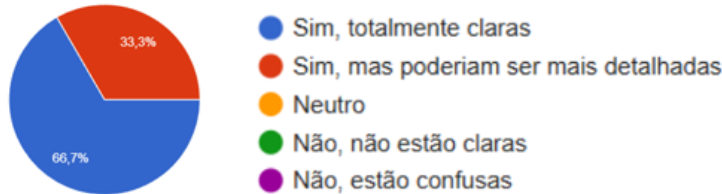
Fonte: Autoria própria (2025).

4.3 Etapa 4: As medidas de desempenho

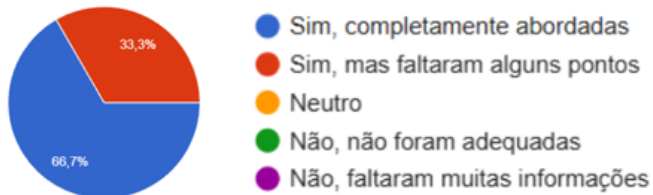
A Avaliação do artefato foi feita com base nas Medidas de Desempenho apresentadas na Figura 51. O questionário foi preenchido por cinco especialistas – as mesmas cinco pessoas específicas que possuem conhecimento do processo de metal MEX e contribuíram com a investigação na etapa de inspeção das peças – que compartilharam seus respectivos entendimentos para com as diretrizes propostas.

Figura 51. Opiniões sobre a proposta de diretrizes captadas pelo questionário

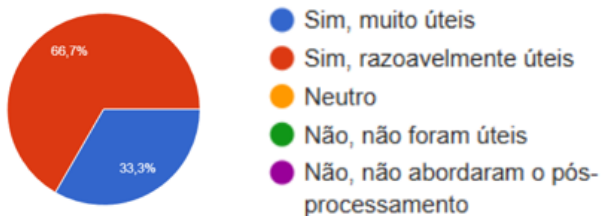
1. As diretrizes propostas fornecem orientações claras sobre as considerações de Design para Manufatura Aditiva por extrusão de material com carga metálica?



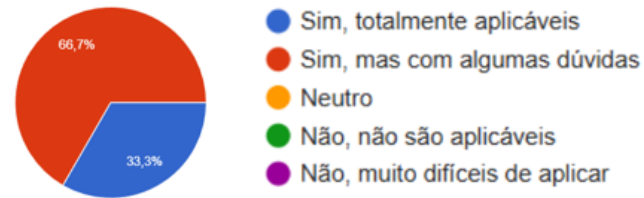
2. As diretrizes propostas abordam considerações de projeto de peças metálicas fabricadas por extrusão de material?



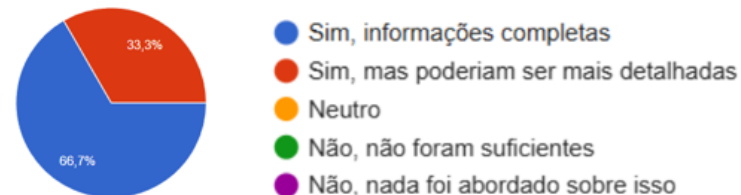
3. As diretrizes propostas incluem sugestões úteis para otimizar o design de peças considerando as características do material metálico?



4. Você achou que as diretrizes propostas são facilmente aplicáveis ao processo de fabricação de peças metálicas por extrusão de material?



5. As diretrizes propostas fornecem informações suficientes sobre o uso de estratégias para evitar falhas durante a impressão?



6. Você encontrou algum aspecto da proposta de diretrizes que poderia ser melhorado ou que não foi abordado? Algo que poderia ter ficado mais claro?

diretriz 8 - texto um pouco confuso - gota para evitar suporte

diretriz 9 - precisaria explicar ou exemplificar um pouco melhor

Diretriz 9 eu não entendi muito bem. Na diretriz 15 colocar a mesma escala nas imagens pra ficar claro que houve uma compensação de tamanho. Eu embrei que XX tinha comentado sobre ter uma recomendação que lembrasse a pessoa de ver qual o tamanho de forno disponível mas acho que não precisa colocar não

poderia conter uma diretriz recomendando que se verifique a disponibilidade de impressora FDM com as tecnologias/características necessárias para imprimir com o filamento com carga metálica. Eu posso passar pela diretriz 1 obrigado pela geometria da minha peça, por exemplo, e esbarrar no processo de manufatura antes de chegar na diretriz 2 que fala sobre o processo de D&S

Fonte: Autoria própria (2025).

4.4 Etapa 5: Os resultados

Como o objetivo da avaliação do artefato era captar a opinião de possíveis usuários das diretrizes propostas e comprovar se elas são úteis, pode-se afirmar que o objetivo dessa avaliação foi cumprido e foi revelada uma recepção majoritariamente positiva por parte dos especialistas, com indicações claras sobre pontos fortes e aspectos que ainda podem ser aprimorados.

A maioria dos avaliadores considerou que as diretrizes estão totalmente claras, enquanto os demais indicaram que, apesar de claras, poderiam ser mais detalhadas. Nenhum especialista classificou o conteúdo como confuso ou pouco claro, o que demonstra que as orientações estão bem estruturadas. Ainda assim, esse retorno sugere que há espaço para aprofundar certas recomendações, principalmente para torná-las ainda mais precisas e completas.

Com relação às considerações de projeto voltadas para peças metálicas fabricadas por extrusão de material, dois terços afirmaram que essas questões foram completamente abordadas, enquanto o restante indicou que faltaram alguns pontos. Isso revela que os fundamentos estão presentes, mas ajustes pontuais, especialmente relacionados a casos específicos ou detalhes técnicos, podem fortalecer ainda mais o material.

Quando questionados sobre as sugestões para otimização de design considerando as características dos materiais metálicos, 33% apontaram que as orientações são muito úteis e 67% as classificaram como razoavelmente úteis. A ausência de respostas negativas nesse item reforça a relevância das propostas, embora também indique que a inclusão de exemplos práticos mais específicos poderia ampliar a aplicabilidade percebida dessas sugestões.

O ponto de maior atenção apareceu na questão sobre a aplicabilidade prática das diretrizes: apenas um terço afirmou que são totalmente aplicáveis, enquanto o restante as considerou aplicáveis, mas com algumas dúvidas. Isso sugere que as recomendações ainda precisam ser mais bem conectadas à realidade dos processos de fabricação com MEX, contemplando limitações de equipamentos e etapas de D&S.

Sobre as estratégias para evitar falhas durante a impressão, a maioria dos especialistas afirmou que as informações estão completas, mas um terço indicou que poderiam ser mais detalhadas. Esse ponto foi reforçado pelos comentários qualitativos, que sugeriram maior clareza em diretrizes específicas (como a n° 8 e a

n° 9), a inclusão de exemplos visuais mais objetivos (como na diretriz n° 15), e recomendações práticas sobre compatibilidade de impressoras com metal MEX, disponibilidade de tecnologias e riscos operacionais.

Assim, os resultados indicam que as diretrizes têm boa base técnica, são claras e cobrem os principais pontos necessários ao projeto de peças metálicas por MEX. No entanto, ajustes em trechos específicos, maior detalhamento em orientações críticas e a conexão direta com situações práticas podem tornar o material mais completo, acessível e eficaz.

4.5 Discussões

O estudo sobre DfAM para metal MEX evidenciou diversos desafios e limitações associados à impressão de peças metálicas por MEX, especialmente durante as etapas de D&S. Os resultados obtidos destacaram que a integridade estrutural das peças foi comprometida em vários momentos, sendo as principais causas atribuídas às transições abruptas de seção transversal/longitudinal e empenamento. Durante a fase de impressão, as peças apresentaram empenamento mesmo com a utilização de adesivos específicos para o processo. Esse comportamento foi observado em todas as peças e poderia ser explicado pelo acúmulo de tensões internas, por temperatura incorreta da plataforma de construção ou mesmo pela simples falha na adesão da peça à plataforma de construção. Ressalta-se, no entanto, que em todas as impressões a primeira camada das peças foi corretamente depositada e pareceu estar bem aderida no início da impressão.

Durante o processo de *debinding*, as peças apresentaram falhas estruturais nessas regiões de mudanças abruptas de seção e em áreas com espessura reduzida. Na fase de sinterização, os problemas observados no *debinding* foram amplificados. A Peça E, por exemplo, apresentou uma rachadura completa em uma das regiões de furo ortogonal, evidenciando que o acúmulo de tensões em áreas com geometria concentrada foi um fator determinante para o colapso da peça. Apesar da recomendação da empresa especialista em D&S ser imprimir apenas peças com 100% de preenchimento, as peças com esse volume de preenchimento apresentaram pior acabamento das superfícies e maior severidade nas regiões de delaminação.

Outro ponto de discussão é a influência do perfil de planejamento de impressão na qualidade das peças. O perfil de impressão utilizado foi desenvolvido

pelo fabricante do material em parceria com o fabricante da impressora, mas ainda assim existem melhorias que podem ser implementadas, como estruturas de suporte calculadas especificamente para estabilidade durante e após os processos de D&S, não apenas para impressão e estabilidade da peça verde. Por conta dessa situação, uma das peças sofreu colapso completo durante o *debinding*.

Além disso, notou-se uma variação na coloração final das peças, o que provavelmente pode estar associado à posição das peças dentro do forno de sinterização. Isto pode ser um indício de que a distribuição de calor não é uniforme. De todo modo, não há como saber se essa observação possui conexão com os resultados das peças, uma vez que todas já estavam estruturalmente comprometidas após o *debinding*.

Um ponto crítico observado foi o efeito das transições abruptas de seção transversal e longitudinal na integridade das peças. As descontinuidades geométricas resultaram em concentrações de tensões que favoreceram a formação de trincas e fissuras, especialmente após os processos de D&S. A ausência de arredondamentos em regiões de transição e cantos vivos provavelmente aumentou o risco de falha, comprometendo a resistência estrutural das peças. A introdução de cantos ainda mais arredondados do que já estavam e a suavização das transições geométricas poderiam reduzir essas tensões localizadas, melhorando o resultado das peças.

Como comentado, apesar das tentativas não terem sido estatisticamente relevantes, o comportamento divergente entre peças com preenchimento de 60% e 100% sugere uma concessão entre resistência estrutural e qualidade superficial. Peças com preenchimento de 100% apresentam maior resistência após a sinterização – por conta de ter menos vazios do que as peças com 60% de preenchimento – mas com acabamento das superfícies inferior, com maior rugosidade e camadas mais aparentes. Por outro lado, peças com preenchimento de 60% tiveram melhor acabamento de superfície, mas apresentaram mais fissuras e trincas, comprometendo mais a resistência estrutural e integridade mecânica, além da resistência já ser menor por conta do menor volume de preenchimento.

O planejamento inicial da pesquisa consistia em imprimir e enviar para D&S um primeiro lote de peças com as geometrias selecionadas originais apenas acrescentando arredondamentos para evitar concentração de tensões nas regiões com cantos vivos das peças. Em um segundo momento, após as peças do primeiro lote passarem por D&S e pela inspeção, seria realizado um estudo com a empresa

parceira para definição de melhorias necessárias para garantir peças funcionais com maiores arredondamentos e evitando transições abruptas de seção transversal/longitudinal, caso o primeiro lote não desse certo. No entanto, não foi possível imprimir o segundo lote de peças com melhorias a tempo de apresentar nesse trabalho.

Os processos da UTFPR, de escolha de fornecedor de impressora, compra de insumos e materiais, escolha de fornecedor de serviços terceirizados e respectivos pagamentos se mostraram gargalos frente ao cronograma inicial. Além disso, não é viável financeiramente que a Up3D (ou qualquer empresa do ramo) faça lotes de D&S a qualquer momento, pois são processos muito caros e não vale a pena realizá-los com poucas peças nos equipamentos, o que também pode ser um obstáculo que dificulta a previsão de prazo, tornando o cronograma de uso dessa tecnologia incerto; o que pode inviabilizar possíveis projetos para empresas com prazos apertados.

Devido ao atraso para aquisição e recebimento do equipamento e dos insumos para fabricação das peças, não foi viável estudar, nem mesmo de forma preliminar, os projetos e reprojeto de todas as geometrias. Esse cenário revela a importância de um planejamento logístico robusto e alinhado com os ciclos de produção para garantir que o desenvolvimento de peças por metal MEX ocorra sem interrupções.

As diretrizes para DfAM para metal MEX propostas neste estudo foram fundamentadas nesses resultados e nas referências levantadas. A seleção do processo de fabricação deve ser avaliada com base na complexidade geométrica e nos requisitos estruturais da peça, uma vez que a AM é mais vantajosa para geometrias complexas e pequenos lotes.

A análise dos resultados demonstra que o sucesso de peças metálicas fabricadas por metal MEX depende de um planejamento preciso de diversas variáveis de projeto, incluindo reprojeto de geometrias, orientação de impressão, arredondamentos, transições suaves de seção e preenchimento. A implementação das diretrizes propostas pode reduzir o risco de falhas estruturais e melhorar a eficiência dos processos de D&S, resultando em peças metálicas com melhor desempenho funcional e maior confiabilidade, reduzindo desperdícios.

É importante destacar que os efeitos na integridade estrutural são altamente dependentes da geometria da peça. Assim, a adaptação contínua dos reprojeto e

impressão com base em testes iterativos e análises empíricas é essencial para garantir consistência e desempenho ideal nas peças fabricadas por metal MEX.

Não é possível avaliar se o custo total do lote de peças produzido é competitivo frente a métodos tradicionais de produção, uma vez que a empresa parceira não abriu o custo de usinagem interno.

A transferibilidade das diretrizes do 17-4PH para o 316L encontra respaldo na documentação técnica do fabricante, uma vez que todos os documentos publicados mencionam a solução de filamento com caga metálica, sem especificar a matéria-prima. No entanto, cientificamente, essa extrapolação permanece como uma sugestão de trabalhos futuros deste trabalho. Sendo os resultados aqui apresentados validados estritamente para o 17-4PH.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

O presente trabalho teve como principal objetivo desenvolver uma proposta de diretrizes de DfAM para Metal MEX, com foco específico no projeto de peças em aço inoxidável 17-4PH. O propósito foi proporcionar um referencial que auxilie na aplicação mais acessível e assertiva desse material, considerando as particularidades dos processos de impressão e de D&S.

Para o desenvolvimento dessa proposta de diretrizes, foi adotado o método do DSR para conduzir experimentos que envolvessem a impressão e processamento de peças metálicas, as quais serviram como um meio para observar e compreender melhor os efeitos do processo nas características finais das peças e, conseqüentemente, para embasar a formulação das diretrizes propostas com base nas referências mencionadas. Embora essas peças não sejam, por si só, o resultado esperado, essas tentativas forneceram informações valiosas que contribuiriam para a construção de um artefato em formato de conjunto inicial de recomendações para o DfAM aplicado à metal MEX.

Os resultados das tentativas realizadas revelaram que a ausência de adaptação da geometria e às características específicas do processo pode levar a deformações, perda de integridade estrutural e até colapso das peças. Essa observação foi particularmente evidente em relação às diretrizes 4, 5, 6 e 7, que se mostraram críticas para evitar essas falhas nesse conjunto limitado de tentativas. Embora não se possa afirmar que essas conclusões tenham validade estatística robusta, os resultados reforçam a necessidade de considerar essas diretrizes como parte do processo projetual para reduzir os riscos de falhas no processo de metal MEX.

É importante reconhecer que esta pesquisa apresenta limitações inerentes ao seu escopo. A proposta de diretrizes foi desenvolvida com base em um conjunto específico de materiais e equipamentos, o que restringe sua aplicabilidade direta a outros cenários de fabricação. O foco no aço inoxidável 17-4PH não abrange potenciais variações de comportamento em outros materiais metálicos e configurações de impressão. Essa decisão foi intencional e teve como objetivo principal viabilizar a construção de uma proposta inicial de diretrizes, priorizando o

estudo desse material específico com parâmetros já atestados pelos fabricantes do material e da impressora.

Além disso, a ausência de testes adicionais com variações amplas de geometrias e parâmetros de impressão foi uma limitação consciente desta pesquisa, uma vez que tal esforço demandaria tempo, recursos financeiros e infraestrutura técnica que extrapolam o escopo do trabalho. A realização de uma validação completa de cada diretriz individualmente exigiria um projeto de pesquisa ainda mais extenso, envolvendo a replicação sistemática de condições variadas, o que não era viável no contexto deste estudo.

Outro fator que limitou a execução de testes adicionais foi a disponibilidade restrita de empresas e equipamentos especializados para o processo de D&S desse material especificamente, bem como os altos custos associados a esses serviços. Essa limitação impactou diretamente a quantidade de geometrias que puderam ser avaliadas e, conseqüentemente, restringiu a possibilidade de explorar variações possíveis de geometrias e parâmetros.

Apesar dessas limitações, o trabalho representa um avanço técnico relevante para a área de DfAM para metal MEX ao oferecer uma proposta inicial de diretrizes que pode servir como referência para profissionais e empresas interessadas na exploração desse processo. A abordagem baseada na observação de falhas reais proporciona um nível de confiança na aplicação das diretrizes, mesmo sem validação completa. Essa perspectiva prática é especialmente relevante para empresas que buscam implementar processos de metal MEX de forma mais assertiva e econômica.

É essencial destacar que este trabalho não se propõe a esgotar o tema, mas sim a apresentar uma contribuição inicial que possa ser expandida e aprimorada em pesquisas futuras. As diretrizes propostas devem ser vistas como um ponto de partida. Elas poderão ser refinadas e validadas por meio de testes adicionais conduzidos em diferentes cenários industriais e acadêmicos.

Por fim, embora algumas variações inesperadas nos resultados possam parecer inconsistentes, elas refletem as incertezas típicas da AM com materiais metálicos. No mundo ideal da ciência, cada resultado deveria ter uma explicação clara e previsível, mas na prática, o comportamento dos materiais é frequentemente influenciado por variáveis complexas e difíceis de controlar. Essa imprevisibilidade reforça a importância de utilizar as diretrizes como um apoio para mitigar riscos e não como uma garantia absoluta de resultados bem-sucedidos.

Portanto, afirma-se que os objetivos geral e específicos propostos neste trabalho foram cumpridos, uma vez que o conjunto de diretrizes apresentado nesta pesquisa oferece uma base para orientar projetos de peças metálicas por metal MEX e representa um avanço relevante para profissionais da área, que podem utilizar essas recomendações como um ponto de partida para suas próprias adaptações e validações.

Para a iniciativa privada, uma recomendação é considerar as primeira e segunda diretrizes. Provavelmente, se houver viabilidade para utilização de metal MEX, o cenário ideal é contratar uma empresa especializada no processo de obtenção de peças metálicas por AM. Uma vez que o investimento na impressora, nos equipamentos e nos insumos, além do tempo investido em projetar ou reprojeter as geometrias, devem inviabilizar a obtenção de peças metálicas usando os funcionários e instalações da empresa.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Devido à ampla variedade de tópicos explorados durante o desenvolvimento deste trabalho, diversas oportunidades para estudos futuros foram identificadas. Elas são apresentadas a seguir.

- a) Verificar se as mesmas diretrizes podem ser aplicadas ao aço inoxidável 316L, apesar de ser um material ainda menos utilizado que o 17-4PH, incorrendo em possível indisponibilidade do serviço de D&S;
- b) Desenvolver um estudo com otimização topológica e reprojeto das peças com base nas diretrizes de DfAM propostas;
- c) Realizar análises de tomografia para identificar vazios após sinterização das peças;
- d) Usar geometrias circulares com formato de gota nos modelos estudados para evitar o uso de estruturas de suporte;
- e) Fazer análises estruturais e de fadiga. Importante observar que as análises são realizadas em modelos que simulam peças maciças. Considerando a morfologia do filamento extrudado, mesmo peças fabricadas com 100% de preenchimento possuem vazios, como mostrado por Brandt e Arce (2021). Para que as análises estruturais sejam confiáveis, os modelos precisam

considerar parâmetros compensatórios ou estar fiéis a essa estrutura interna com vazios;

- f) Executar um estudo comparativo relacionado à umidade. Deixar as peças em desumidificadores após a impressão e retirada do vidro com uso de lâmina de água em vez de realizar a imersão das peças em um recipiente;
- g) Testar as diretrizes específicas de Djokikj e Kandikjan (2022);
- h) Elaborar geometrias de teste para verificar as diretrizes, especialmente as de número 8, 9, 10, 11 e 12, e fabricá-las em quantidade suficiente para serem analisadas e apresentarem resultados validados estatisticamente;
- i) Verificar se o processo de *debinding* obteve bons resultados ao analisar peças de sacrifício, isto é, peças impressas com parâmetros similares aos das peças de interesse, mas que possam ser cortadas para avaliar se houve remoção correta do aglutinante antes de passar para o processo de sinterização;
- j) Realizar um estudo comparativo entre as matérias-primas da BASF e da Markforged – utilizada por Brandt e Arce (2021).

REFERÊNCIAS

- ABE, Y.; KUROSE, T.; SANTOS, M. V.; KANAYA, Y.; ISHIGAMI, A.; TANAKA, S.; ITO, H. Effect of layer directions on internal structures and tensile properties of 17-4ph stainless steel parts fabricated by fused deposition of metals. **Materials**, v. 14, n. 2, p. 243, 2021.
- ADAM, G. A. O.; ZIMMER, D. Design for Additive Manufacturing-Element transitions and aggregated structures. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 7, n. 1, p. 20–28, 2014.
- 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.
- ASADOLLAHI-YAZDI, E.; GARDAN, J.; LAFON, P. Integrated Design for Additive Manufacturing Based on Skin-Skeleton Approach. **Procedia CIRP**, v. 60, p. 217-222, 2017.
- ATATREH, S.; ALYAMMAHI, M. S.; VASILYAN, H.; ALKINDI, T.; SUSANTYOKO, R. A. Evaluation of the infill design on the tensile properties of metal parts produced by fused filament fabrication. **Results in Engineering**, v. 17, p. 100954, 2023.
- BANDYOPADHYAY, A.; DAS, K.; MARUSICH, J.; & ONAGORUWA, S. Application of fused deposition in controlled microstructure metal-ceramic composites. **Rapid Prototyping Journal**, v. 12, n. 3, p. 121-128, 2006.
- BASF FORWARD AM. **Ultrafuse® Support Layer User Guideline**. Disponível em: <www.forward-am.com>. Acesso em: 28 out. 2023.
- BASF FORWARD AM. **Technical Data Sheet Ultrafuse® 17-4 PH**. Disponível em: <www.forward-am.com>. Acesso em: 28 out. 2023.
- BASF FORWARD AM. **Technical Data Sheet Ultrafuse® Support Layer**. Disponível em: <www.forward-am.com>. Acesso em: 28 out. 2023.
- BASF FORWARD AM. **Ultrafuse® Metal Filaments User Guidelines for 3D Printing Metal Parts**. Disponível em: <www.forward-am.com>. Acesso em: 28 out. 2023.
- BAYAZIT, N. Investigating Design: A Review of Forty Years of Design Research. Massachusetts Institute of Technology. **Design Issues**, v. 20, n. 1, p. 16-29, 2004.
- BELTRÁN, N.; ÁLVAREZ, B. J.; BLANCO, D.; NORIEGA, Á.; FERNÁNDEZ, P. Estimation And Improvement of the Achievable Tolerance Interval in Material Extrusion Additive Manufacturing Through a Multi-State Machine Performance Perspective. **Applied Sciences**, v. 11, n. 12, p. 5325, 2021.
- BHATIA, A.; SEHGAL, A. K. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 81, p. 1060-1067, 2023.
- BOLJANOVIC, V. **Metal shaping processes: casting and molding, particulate processing, deformation processes, and metal removal**. Industrial Press Inc., 2009.
- BOSCHETTO, A.; BOTTINI, L. Accuracy prediction in fused deposition modeling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 73, p. 913-928, 2014.

BRANDT, L. DE O.; ARCE, R. P. **Estudo de viabilidade da manufatura aditiva por difusão atômica como meio de fabricação do pistão da válvula de um sistema de injeção a diesel**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

ÇAĞDAŞ, V.; STUBKJÆR, E. Design research for cadastral systems. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 35, n. 1, p. 77-87, 2011.

COSTA, I.; ROGERO, S. O.; SAIKI, M.; MARQUES, R. A.; ROGERO, J. R. Corrosion resistance and cytotoxicity study of 17-4PH steels produced by conventional metallurgy and powder injection molding. **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications Ltd, 2008. p.18-23.

DIEGEL, O.; NORDIN, A.; MOTTE, D. **Springer Series in Advanced Manufacturing A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing**. New York, NY, USA: Springer, 2020.

DJOKIKJ, J.; KANDIKJAN, T. DfAM: Development of design rules for FFF. **Procedia CIRP**, v. 112, p. 370-375, 2022.

DRESCH, A. **Design Science e Design Science Research como Artefatos Metodológicos para Engenharia de Produção**. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), 2013.

GEBISA, A. W.; LEMU, H. G. Design for manufacturing to design for Additive Manufacturing: Analysis of implications for design optimality and product sustainability. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 724–731, 2017.

GONZALEZ-GUTIERREZ, J.; STRINGARI, G. B.; EMRI, I. Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts. In: **Some Critical Issues for Injection Molding**, p. 65-88, 2012.

GREULICH, M.; GREUL, M.; PINTAT, T. Fast, functional prototypes via multiphase jet solidification. **Rapid Prototyping Journal**, v. 1, n. 1, p. 20–25, 1995.

HAMEL, J. M.; SALSBURY, C.; BOUCK, A. Characterizing the effects of additive manufacturing process settings on part performance using approximation-assisted multi-objective optimization. **Progress in Additive Manufacturing**, v. 3, n. 3, p. 123–143, 2018.

HEVNER, A. R.; MARCH, S. T.; PARK, J.; RAM, S. Design Science in Information Systems Research. **MIS Quarterly**, p. 75-105, 2004.

ITUARTE. The role of Additive Manufacturing in modern product development: a case study for consumer electronic industry. **Aalto University**. 2013.

LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção Design Science Research: a research method to production engineering. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, p. 741–761, 2013.

LEUTENECKER-TWELSIEK, B.; KLAHN, C.; MEBOLDT, M. Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 50, p. 408-413, 2016.

LOH, G. H.; PEI, E.; GONZALEZ-GUTIERREZ, J.; MONZÓN, M. AN overview of material extrusion troubleshooting. **Applied Sciences**, v. 10, n. 14, p. 4776, 2020.

LOPEZ TABORDA, L. L.; MAURY, H.; PACHECO, J. Design for additive manufacturing: a comprehensive review of the tendencies and limitations of methodologies. **Rapid Prototyping Journal**, v. 27, n. 5, p. 918-966, 2021.

MANSON, N. J. Is operations research really research? **ORiON**, v. 22, n. 2, p. 155–180, 2006.

MARKFORGED. **Design Guide for 3D Printing with Metals**. Disponível em: <<https://support.markforged.com/portal/s/article/Design-Guides-for-the-Metal-X-System-2>>. Acesso em: 14 mar. 2025.

MASOOD, S. H.; SONG, W. Q. Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling. **Materials and Design**, v. 25, n. 7, p. 587–594, 2004.

MIRELES, J.; ESPALIN, D.; ROBERSON, D.; ZINNIEL, B.; MEDINA, F.; WICKER, R. Fused Deposition Modeling of Metals. 2012.

RANEY, K.; LANI, E.; KALLA, D. K. Experimental characterization of the tensile strength of ABS parts manufactured by fused deposition modeling process. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 8, p. 7956-7961, 2017.

RASIYA, G.; SHUKLA, A.; SARAN, K. Additive Manufacturing-A Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 6896-6901, 2021.

REDWOOD, B.; SCHÖFFER, F.; GARRET, B. **3D Printing Handbook**. 3D HUBS, 2017, v. 1.

RODRIGUES, D. D. Design Science Research como caminho metodológico para disciplinas e projetos de Design da Informação. **InfoDesign - Revista Brasileira de Design da Informação**, v. 15, n. 1, p. 111–124, 2018.

SILVA, E. R. P. **Métodos para Revisão e Mapeamento Sistemático da Literatura (Methods for Systematic Literature Reviews and Systematic Mapping Studies)**. Trabalho de Conclusão de Curso — Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

SIMON, H. A. **The sciences of the artificial**. Third ed. The MIT Press, 1996. v. 1

SOLIS, D. M.; SILVA, A. V.; VOLPATO, N.; BERTI, L. F. Reaction-bonding of aluminum oxide processed by binder jetting. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 41, p. 267-272, 2019.

SU, A.; AL'AREF, S. J. History of 3D printing. In: **3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine**. Academic Press, 2018. p. 1-10.

SUWANPREECHA, C.; MANONUKUL, A. A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding. **Metals**, v. 12, n. 3, p. 429, 2022.

ULBRICH, C. B. L.; ULBRICH, F. **Manufatura Aditiva em Metal: Moldando o Futuro do Design e da Fabricação**, 1. ed. São Paulo: Perfil Editorial Ltda., 2024. v. 1.

UPADHYAYA. **Powder Metallurgy Technology**. Cambridge International Science Publishing, 2002.

VAISHNAVI, V.; KUECHLER, B.; PETTER, S. **Design Science Research In Information Systems**. Pertti Järvinen, p. 110.

- VAN AKEN, J. E. Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences: The Quest for Field-Tested and Grounded Technological Rules. **Journal of management studies**, v. 41, n. 2, p. 219-246, 2004.
- VANEKER, T. H. J. The Role of Design for Additive Manufacturing in the Successful Economical Introduction of AM. **Procedia CIRP**. v. 60, p. 181-186, 2017.
- VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2017.
- WIBERG, A.; PERSSON, J.; ÖLVANDER, J. Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software. **Rapid Prototyping Journal**, v. 25, n. 6, p. 1080-1094, 2019.
- WOHLERS, T.; GORNET, T. **History of Additive Manufacturing**. 2016.
- WU, G.; LANGRANA, N. A.; SADANJI, R.; DANFORTH, S. Solid freeform fabrication of metal components using fused deposition of metals. **Materials & Design**, v. 23, n. 1, p. 97-105, 2002.
- YAKOUT, M.; ELBESTAWI, M. A.; VELDHUIS, S. C. **A review of metal additive manufacturing technologies**. **Solid State Phenomena**. v. 278, p. 1-14, 2018.
- ZHANG, W.; LI, R.; PENG, Y.; XU, H. Fused deposition modeling (FDM) based additive manufacturing of 17-4PH stainless steel: static and fatigue mechanical performance. 2024. **Disponível em SSRN 4994805**.
- ZIMMER, D.; ADAM, G. Direct Manufacturing Design Rules Innovative developments in virtual and physical prototyping. **Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal**. CRC Press, 2012.

ANEXO A – FICHA TÉCNICA BASF ULTRAFUSE® 17-4PH



Technical Data Sheet

Ultrafuse® 17-4 PH

Date / Revised: 08.12.2022

Version No.: 2.1

General information

Components

17-4 PH stainless steel composite filament for Fused Filament Fabrication.

Product Description

Ultrafuse® 17-4 PH is a filament for the production of metal components in 17-4 stainless steel on standard Fused Filament Fabrication (FFF) printers. This stainless steel can be fully heat treated to high levels of strength and hardness. It is therefore ideal for Petrochemistry, Aerospace, the Automotive and the Medical Industry. Parts printed with our metal-polymer composite filament Ultrafuse® 17-4 PH obtain their final properties through a catalytic debinding and sintering process known from traditional Metal Injection Molding.

Delivery form and warehousing

Ultrafuse® 17-4 PH filament should be stored at 15 - 25°C in its originally sealed package in a clean and dry environment. If the recommended storage conditions are observed the products will have a minimum shelf life of 12 months.

Product safety

Recommended: Process materials in a well ventilated room, or use professional extraction systems. For further and more detailed information please consult the corresponding material safety data sheets.

For your information

Typical composition after sintering:

C %	Cr %	Ni %	Cu %	Nb %	Mn %	Si %	Fe %
≤ 0.07	15-17.5	3-5	3-5	0.15-0.45	≤ 1	≤ 1	Balance

Standards: DIN 1.4542, X 5 CrNiCuNb 17 4, AISI/UNS S17400 ; SAE J 467 (17-4PH)

Notice

The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application of our product, these data do not relieve processors from carrying out their own investigations and tests; neither do these data imply any guarantee of certain properties, nor the suitability of the product for a specific purpose. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights etc. given herein may change without prior information and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.

The safety data given in this publication is for information purposes only and does not constitute a legally binding Material Safety Data Sheet (MSDS). The relevant MSDS can be obtained upon request from your supplier or you may contact BASF 3D Printing Solutions GmbH directly at sales@basf-3dps.com.

Filament Properties		
Filament Diameter	1.75 mm	2.85 mm
Diameter Tolerance	±0.050 mm	±0.1 mm
Roundness	±0.050 mm	±0.05 mm
Available Spool size	3.0 kg	3.0 kg
Available colors	natural	

Spool Properties	
Available Spool size	3.0 kg
Outer diameter	200 mm
Inner diameter	50.5 mm
width	55 mm

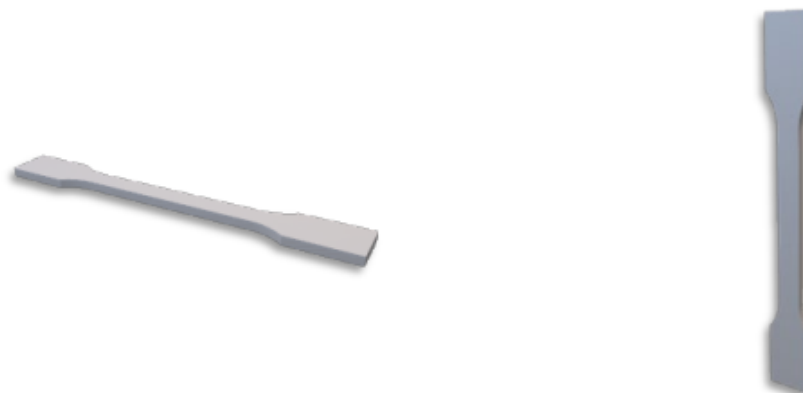
Recommended 3D-Print processing parameters	Used for test specimens
Printer	FFF printer
Nozzle Temperature	230 – 250 °C / 446 – 482 °F
Build Chamber Temperature	-
Bed Temperature	90 – 100 °C / 194 – 212 °F
Bed Material	Glass + approved glues* / polyimide tape (*Magigoo® suggested)
Nozzle Diameter	≥ 0.4 mm
Print Speed	15 - 50 mm/s
	Ultimaker S5
	245 °C
	-
	100 °C
	Glass + Magigoo®
	0.4 mm
	25 mm/s

Please check your print profile availability for an easy start at www.forward-am.com.

Further Recommendations	
Drying recommendations to ensure printability	Ultrafuse® 17-4 PH is in a printable condition, drying is not necessary
Support material compatibility	Ultrafuse® Support Layer

General Properties	Standard
Sintered Part Density Ultrafuse® 17-4 PH	7600 kg/m ³ / 474.5 lb/ft ³ ISO 3369
Sintered Part Density Catamold 17-4 PH	7650 kg/m ³ / 477.6 lb/ft ³ ISO 3369

Mechanical Properties | sintered



Print direction	Standard	XY Flat	ZX Upright
Tensile strength	ISO 6892-1		
Ultrafuse® 17-4 PH ¹		990 MPa / 143.6 ksi	1276 MPa / 185.1 ksi ³
Catamold 17-4PH (MIM)		1060 MPa / 153.7 ksi	
Young's Modulus	ISO 6892-1		
Ultrafuse® 17-4 PH ¹		191000 MPa / 27702 ksi	198000 MPa / 28718 ksi ³
Catamold 17-4PH (MIM)		-	
Elongation at Break	ISO 6892-1		
Ultrafuse® 17-4 PH ¹		4 %	6 % ³
Catamold 17-4PH (MIM)		3 %	
Yield Strength, R_{p0.2}	ISO 6892-1		
Ultrafuse® 17-4 PH ¹		756 MPa / 109.6 ksi	1109 MPa / 160.8 ksi ³
Catamold 17-4PH (MIM)		750 MPa / 108.8 ksi	
Vickers Hardness HV10	ISO 6507-1		
Ultrafuse® 17-4 PH ¹		291	400 ³
Catamold 17-4PH (MIM)		320	

Testing speed – 0,3 mm/min bis 2 % / 10 mm/min till end of the test

¹milled specimen, specimen shape Form E2x6x20 according to DIN 50125

³H900 heat treatment: annealing at 1030°C for 50 min – gas quenching (Nitrogen) - aging at 482°C for 1 hour – air cooled

ANEXO B – FICHA TÉCNICA BASF ULTRAFUSE® SUPPORT LAYER



Technical Data Sheet

Ultrafuse® Support Layer

Date / Revised: 19.10.2022

Version No.: 1.1

General information

Components

Polyoxmethylen based composite filament for Ultrafuse® Metal Fused Filament Fabrication.

Product Description

Ultrafuse® Support Layer filament developed to be used in combination with Ultrafuse® Metal Filaments. When printed between support and the object, it creates a barrier during sintering and facilitates the separation of support from the metal part. Ultrafuse® Support Layer is not developed to print stand-alone parts and should be printed as a layer attached to the support structures in dual extrusion prints.

Delivery form and warehousing

Ultrafuse® Support Layer filament should be stored at 15 - 25°C in its originally sealed package in a clean and dry environment. If the recommended storage conditions are observed the products will have a minimum shelf life of 12 months.

Product safety

A small amount of formaldehyde is formed during the printing of Ultrafuse® Support layer, therefore the filament should only be printed in a well ventilated room or with a professional extraction/filter system. Process within recommended range of temperature. For further and more detailed information please consult the corresponding material safety data sheets.

For your Information

This product is not intended for sale, distribution or use in the US and Canada and is not available to our customers in those countries.

Notice

While the descriptions, designs, data, and information contained herein are presented in good faith and believed to be accurate, it is provided for inspiration only. Because many factors may affect processing or application/use, we recommend that you perform independent tests to determine the suitability and proper use of a product for your particular purpose. NO WARRANTIES OF ANY KIND, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE MADE REGARDING PRODUCTS DESCRIBED HEREIN, OR THAT THIS CONTENT MAY BE USED WITHOUT INFRINGING THE INTELLECTUAL PROPERTY OF OTHERS. IN NO CASE SHALL DESCRIPTIONS, INFORMATION, DATA, OR DESIGNS DESCRIBED HEREIN BE CONSIDERED A PART OF OUR TERMS AND CONDITIONS OF SALE.

Filament Properties		
Filament Diameter	1.75 mm	2.85 mm
Diameter Tolerance	±0.050 mm	±0.1 mm
Roundness	±0.050 mm	±0.05 mm
Available Spool size	0.3 kg	0.3 kg
Available colors	natural	

Spool Properties	
Available Spool size	0.3 kg
Outer diameter	200 mm
Inner diameter	50.5 mm
width	55 mm

Recommended 3D-Print processing parameters	
Printer	FFF printer
Nozzle Temperature	245 – 260 °C / 473 – 500 °F
Build Chamber Temperature	Passively heated, closed chamber
Bed Temperature	-
Bed Material	-
Nozzle Diameter	≥ 0.4 mm
Print Speed	15 - 20 mm/s

Please check your print profile availability for an easy start at www.forward-am.com.

Further Recommendations	
Drying recommendations to ensure printability	Ultrafuse® Support Layer is in a printable condition, drying is not necessary

ANEXO C – PERFIS DE IMPRESSÃO PARA FILAMENTOS ULTRAFUSE®

Metal Line

Machine brand	Machine type	316L	17-4 PH	Support Layer
Bambu Lab	P1P	○	○	○
	P1S	○	○	○
	X1-Carbon	○	○	○
	X1E	○	○	○
BCN3D	Sigma R19	○	○	○
	Sigmax R19	✓	✓	✓
	Epsilon W27	✓	✓	✓
	Epsilon W50	✓	✓	✓
Intamsys	Funmat Pro 410	○	○	○
	Funmat Pro 610HT	○	○	○
Prusa	MK3	✓	✓	✗
	MK3s	✓	✓	✗
	MK4	○	○	✗
	XL	○	○	○
Raise3d	E2	✗	✗	✗
	E2 CF	✗	✗	✗
	Pro2	✓	✓	✓
	Pro3	✓	✓	✓
	Pro3 hyper speed	✗	✗	✗
	Forge1	✓	✓	✓
Ultimaker	2+ Connect	✗	✗	✗
	3	✓	✓	✓
	S3	✓	✓	✓
	S5	✓	✓	✓
	S7	✓	✓	✓
	Factor 4	○	✓	✓
Zortrax	M300 Dual	✓	✓	✓
	Endureal	✓	✓	✓

✓ Compatible (Available from Printer Manufacturer)

✓ Compatible (Available from Forward AM)

HS High Speed Print Profile Available

○ To be validated

✗ Not compatible

ANEXO D – PERFIL ULTIMAKER CURA METAL MEX UTILIZADO

Section	Key	Value
general	Quality	Normal
resolution	layer_height	0.15
resolution	line_width	0.4
shell	wall_thickness	0.8
shell	wall_line_count	4
shell	min_wall_line_width	0.32
shell	z_seam_type	sharpest_corner
top_bottom	top_thickness	0.9
top_bottom	top_layers	12
top_bottom	bottom_thickness	0.9
top_bottom	bottom_layers	12
top_bottom	top_bottom_pattern	lines
infill	infill_pattern	triangles
material	material_print_temperature	240
material	material_print_temperature_layer_0	240
material	material_initial_print_temperature	240
material	material_final_print_temperature	240
material	material_bed_temperature	70
material	material_bed_temperature_layer_0	100
material	material_shrinkage_percentage	100
material	material_shrinkage_percentage_xy	120
material	material_shrinkage_percentage_z	124
material	material_flow	100
material	material_standby_temperature	90
speed	speed_print	30
speed	speed_infill	30
speed	speed_wall	20
speed	speed_wall_0	25
speed	speed_wall_x	30
speed	speed_roofing	30
speed	speed_topbottom	30
speed	speed_support	35

Section	Key	Value
speed	speed_support_infill	35
speed	speed_support_interface	15
speed	speed_support_roof	15
speed	speed_support_bottom	15
speed	speed_prime_tower	25
speed	speed_travel	75
speed	speed_layer_0	20
speed	speed_print_layer_0	20
speed	speed_travel_layer_0	75
speed	speed_z_hop	25
speed	speed_slowdown_layers	1
speed	speed_equalize_flow_width_factor	100
speed	acceleration_enabled	True
speed	acceleration_travel_enabled	False
speed	acceleration_print	2000
speed	acceleration_infill	2000
speed	acceleration_wall	2000
speed	acceleration_roofing	2000
speed	acceleration_topbottom	2000
speed	acceleration_support	1143
speed	acceleration_support_infill	1143
speed	acceleration_support_interface	2000
speed	acceleration_support_roof	2000
speed	acceleration_support_bottom	2000
speed	acceleration_prime_tower	1143
speed	acceleration_layer_0	2000
speed	acceleration_print_layer_0	2000
travel	retraction_enable	True
travel	retract_at_layer_change	False
travel	retraction_amount	5
travel	retraction_speed	45
travel	retraction_retract_speed	45

Section	Key	Value
travel	retraction_prime_speed	45
cooling	cool_fan_enabled	False
cooling	cool_min_layer_time_fan_speed_max	25
cooling	cool_fan_full_at_height	0
cooling	cool_fan_full_layer	2
cooling	cool_min_layer_time	7
cooling	cool_min_speed	20
cooling	cool_lift_head	False
cooling	cool_min_temperature	240
dual	prime_tower_enable	True
dual	prime_tower_size	20
dual	prime_tower_min_volume	6
dual	prime_tower_position_x	203.2
dual	prime_tower_position_y	163.2
dual	prime_tower_wipe_enabled	True

Section	Key	Value
support	support_enable	True
support	support_structure	normal
support	support_type	everywhere
support	support_angle	45
support	support_pattern	triangles
support	support_wall_count	0
support	support_interface_wall_count	1
support	support_roof_wall_count	1
support	support_bottom_wall_count	1
support	support_infill_rate	50
support	support_line_distance	2.4
support	support_interface_enable	True
support	support_roof_enable	True
support	support_bottom_enable	True
support	support_interface_height	0.45
support	support_roof_height	0.45
support	support_bottom_height	0.45
support	support_interface_skip_height	0.15
support	support_interface_density	100