

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

Thiago Posser

**PRINCÍPIOS DE DESIGN PARA MANUFATURA ADITIVA APLICADOS EM
CILINDROS DE MOTORES DOIS TEMPOS PARA MÁQUINAS PORTÁTEIS**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2019

THIAGO POSSER

Princípios de design para manufatura aditiva aplicados em cilindros de motores dois tempos para máquinas portáteis

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design.

Orientador: Profa. Dra. Branca Freitas de Oliveira

Porto Alegre

2019

Catálogo da Publicação

Posser, Thiago

Princípios de design para manufatura aditiva aplicados em cilindros de motores dois tempos para máquinas portáteis / Thiago Posser. -- 2019.

76 f.

Orientadora: Branca Freitas de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Manufatura aditiva. 2. DfAM. 3. Otimização. 4. Design. 5. Impressão 3D. I. Freitas de Oliveira, Branca, orient.
II. Título.

Thiago Posser

**PRINCÍPIOS DE DESIGN PARA MANUFATURA ADITIVA APLICADOS EM CILINDROS
DE MOTORES DOIS TEMPOS PARA MÁQUINAS PORTÁTEIS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 11 de Setembro de 2019.

Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

Banca Examinadora:

Orientador: **Profa. Dra. Branca Freitas de Oliveira**

PGDesign - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Dra. Vanessa Fátima Pasa Dutra

PPGEC - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Examinador Externo

Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido

PGDesign - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Examinador Interno

Profa. Dra. Underléa Miotto Bruscato

PGDesign - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Examinador Interno

AGRADECIMENTOS

- ... aos familiares, em especial minha esposa Helen Nathalia Thompson.
- ... aos Professores do PGDesign UFRGS, com destaque para a minha orientadora
Branca Freitas de Oliveira.
- ... aos colegas da empresa onde atuei ao longo da elaboração deste trabalho.

- ... em memória de meu pai Amantino Posser.

RESUMO

POSSER T. **Princípios de design para manufatura aditiva aplicados em cilindros de motores dois tempos para máquinas portáteis**. 2019. 76 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

A manufatura aditiva compreende um conjunto de tecnologias caracterizadas pela grande liberdade de design quando comparadas às metodologias tradicionais de fabricação, possibilitando a criação de projetos otimizados, de baixo peso e formas complexas. Cilindros de motores dois tempos para máquinas portáteis são peças que requerem altos investimentos em ferramentais para fundição de alumínio, os quais restringem a liberdade de design do componente. O potencial oferecido pela manufatura aditiva em conjunto com a aplicação de princípios de design adequados, fica evidente com os resultados obtidos neste trabalho, onde 29% da massa de um cilindro foi reduzida por meio da retirada das restrições geométricas da fundição, que permitiram também, a eliminação de duas tampas montadas no cilindro e de seus oito parafusos de fixação. O modelo 3D adaptado para manufatura aditiva foi validado através de ciclos de simulações computacionais no software Ansys, com o emprego de otimização topológica no Generate e estruturas celulares no Creo Parametric. As tensões resultantes ficaram dentro de patamares adequados para a liga AlSi9Cu3 e similares às presentes na peça original fundida. A viabilidade da fabricação foi verificada através da definição da orientação de impressão do componente com a utilização do Simplify 3D, de forma a evitar suportes internos difíceis de serem removidos. Adicionalmente, as espessuras mínimas de paredes fabricáveis foram revisadas com o software 3DCaliper.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. DfAM. Otimização. Design. Impressão 3D.

ABSTRACT

POSSER T. **Princípios de design para manufatura aditiva aplicados em cilindros de motores dois tempos para máquinas portáteis.** 2019. 76 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

Additive manufacturing comprises a set of technologies featured by great design freedom compared to traditional manufacturing methodologies, enabling the creation of optimized, lightweight and complex designs. Two-stroke engine cylinders for portable machines are components that requires high investment in tools for aluminum casting, which restrict its design freedom. The potential offered by additive manufacturing in tandem with application of appropriate design principles is evidenced from the results obtained in this work, where 29% of the mass of a cylinder was reduced by removing the geometric constraints of the casting, which also allowed the elimination of two covers mounted on the cylinder and their eight fixation screws. The re-designed 3D model for additive manufacturing was validated through computer simulation cycles in the Ansys software, with the use of topological optimization in Generate and cellular structures in Creo Parametric. The resulting stresses were within the appropriate range for AlSi9Cu3 alloy and similar to those present in the original casting part. Manufacturing feasibility was verified by defining the printing component orientation using Simplify 3D to avoid hard-to-remove internal supports. Additionally, the minimum printable wall thicknesses were revised with the 3DCaliper software.

Palavras-chave: Additive manufacturing. DfAM. Optimization. Design. 3D printing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linha do tempo simplificada das tecnologias AM	16
Figura 2 - Suporte Airbus A350 original (topo) e produzido por AM	17
Figura 3 - Cilindro de roçadeira disponível no mercado	18
Figura 4 - Principais componentes de um sistema LOM	21
Figura 5 - Principais componentes de um sistema DED	22
Figura 6 - Principais componentes de um sistema FFF	23
Figura 7 - Principais componentes de um sistema SLA	25
Figura 8 - Principais componentes de um sistema SLS	26
Figura 9 - Principais componentes de um sistema SLM	28
Figura 10 - Principais componentes de um sistema de jateamento de aglutinante...31	
Figura 11 - Principais componentes de um sistema de jateamento de material.....32	
Figura 12 - Fluxo de processo para design orientado para baixo peso.....36	
Figura 13 - Exemplos de estruturas celulares fabricadas por AM em metal	40
Figura 14 - Exemplos de estruturas celulares biônicas, propriedades e aplicações .40	
Figura 15 - Fluxo definido para a adaptação de um cilindro fundido para AM	42
Figura 16 - Componentes em contato com o cilindro considerados para integração44	
Figura 17 - Potenciais significativos de redução de massa no cilindro.....45	
Figura 18 - Remoção (a, b) e adição de usinagens (c) no cilindro	46
Figura 19 - Configuração da simulação no Ansys	47
Figura 20 - Malha no cilindro original (a) e SLM (b)	48
Figura 21 - Dispositivo de fixação para usinagem dos cilindros.....50	
Figura 22 - Design space para otimização topológica	51
Figura 23 - Configuração da otimização topológica	52
Figura 24 - Malha gerada para validação dos reforços no topo do cilindro	53
Figura 25 - Cilindro original e seus componentes (a) e cilindro SLM (b)	56
Figura 26 - Sobreposição do cilindro fundido e SLM.....56	
Figura 27 - Tensões no modelo 3D original (a, d), AM_V1 (b, e) e AM_V2 (c, f)	59
Figura 28 - Deformação (300x) no flange do cárter do modelo 3D AM_V2.....59	
Figura 29 - Tensões no modelo 3D AM_V2 (a, d), AM_V3a (b, e) e AM_V3b (c, f) ..60	
Figura 30 - Tensões no modelo 3D original (a, c) e AM_V3b (b, d)	61
Figura 31 - Resultado da otimização topológica no Generate.....63	
Figura 32 - Geometria AM_V4 inicial (a), intermediária (b) e final (c).....63	

Figura 33 - Orientação do cilindro SLM (a) e corte nos dutos de transferência (b) ...	65
Figura 34 - Espessuras das paredes do modelo 3D do cilindro SLM.....	66

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 - Propriedades mecânicas resultantes de processos tradicionais e AM33
- Gráfico 2 - Tensão máxima no flange do cárter para cada variante de modelo 3D...61
- Gráfico 3 - Tensão máxima no topo do cilindro para cada variante de modelo 3D ...64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tamanhos das peças e tolerâncias gerais obtidas por AM.....	33
Tabela 2 - Comparativo de tolerâncias entre processos tradicionais e AM.....	34
Tabela 3 - Regras gerais de DfAM.....	37
Tabela 4 - Análise dos critérios de integração de peças do motor ao cilindro.....	44
Tabela 5 - Ciclos de otimização topológica.....	52
Tabela 6 - Massa do cilindro original fundido e alterado para SLM.....	56
Tabela 7 - Princípios de DfAM aplicados ao cilindro SLM.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABS - *acrylonitrile butadiene styrene* - acrilonitrila butadieno estireno
- AM - *additive manufacturing* - manufatura aditiva
- CAD - *computer aided design* - design assistido por computador
- CBAM - *composite-based additive manufacturing* - manufatura aditiva baseada em compósitos
- CFF - *continuous filament fabrication* - fabricação contínua por filamento
- CLIP - *continuous liquid interface production* - produção contínua com interface líquida
- DED - *direct energy deposition* - deposição com energia direcionada
- DfAM - *design for additive manufacturing* - design para manufatura aditiva
- DfMA - *design for manufacturing and assembly* - design para manufatura e montagem
- DLP - *digital light processing* - processamento digital por luz
- DMLM - *direct metal laser melting* - fundição direta de metal a laser
- DMLS - *direct metal laser sintering* - sinterização direta de metal a laser
- DMP - *direct metal printing* - impressão direta de metal
- EBM - *electron beam melting* - fusão por feixe de elétrons
- FDM - *fused deposition modeling* - modelagem por fusão e deposição
- FFF - *fused filament fabrication* - fabricação por filamento fundido
- HIP - *hot isostatic pressing* - prensagem isostática a quente
- HIPS - *high-impact polystyrene* - poliestireno de alto impacto
- HSS - *high speed sintering* - sinterização de alta velocidade
- LMD - *laser metal deposition* - deposição metálica a laser
- LOM - *laminated object manufacturing* - manufatura de objetos laminados
- MIM - *metal injection moulding* - moldagem por injeção de pós metálicos
- MJF - *multi jet fusion* - fusão multijato
- PA - *polyamide* - poliamida
- PBF - *powder bed fusion* - fusão de leito de pó
- PC - *polycarbonate* - policarbonato
- PEEK - *polyetheretherketone* - polieteretercetona
- PLA - *polylactic acid* - ácido polilático
- PVA - *polyvinyl alcohol* - acetato de polivinilo

SLA - *stereolithography* - estereolitografia

SLCOM - *selective lamination of composite object manufacturing* - laminação seletiva da manufatura de objetos compósitos

SLM - *selective laser melting* - fusão seletiva a laser

SLS - *selective laser sintering* - sinterização seletiva a laser

UAM - *ultrasonic additive manufacturing* - manufatura aditiva ultrassônica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo geral	18
1.1.2 Objetivos específicos	19
1.2 JUSTIFICATIVA	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA.....	20
2.1.1 Adição de lâminas	21
2.1.2 Deposição com energia direcionada	22
2.1.3 Extrusão de material	22
<i>2.1.3.1 Outros processos de extrusão de material</i>	<i>24</i>
2.1.4 Fotopolimerização em cuba	24
2.1.5 Fusão de leito de pó	25
<i>2.1.5.1 Outros processos de fusão de leito de pó</i>	<i>29</i>
2.1.6 Jateamento de aglutinante	30
<i>2.1.6.1 Outros processos de jateamento de aglutinante</i>	<i>31</i>
2.1.7 Jateamento de material	31
2.1.8 Dados comparativos entre processos	32
2.2 DESIGN PARA MANUFATURA ADITIVA (DFAM).....	34
2.2.1 Otimização topológica	38
<i>2.2.1.1 Elementos finitos</i>	<i>39</i>
2.2.2 Estruturas celulares	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 SELEÇÃO DO PROCESSO DE AM	43
3.2 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REDUÇÃO DE COMPONENTES.....	43
3.3 ALTERAÇÃO DO MODELO 3D DO CILINDRO PARA AM.....	45
3.4 SIMULAÇÃO ESTRUTURAL COMPARATIVA	46
3.5 CICLOS DE OTIMIZAÇÃO	48
3.5.1 Otimização topológica do cilindro	49
3.6 ANÁLISES PARA A IMPRESSÃO DO CILINDRO	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 DISCUSSÕES SOBRE A ESCOLHA DO PROCESSO DE AM	54

4.2 IMPACTOS DA ELIMINAÇÃO DAS RESTRIÇÕES DA FUNDIÇÃO	55
4.2.1 Resultados das simulações computacionais	57
4.3 ANÁLISES RELATIVAS AO PROCESSO PRODUTIVO DO CILINDRO	64
4.3.1 Fluxo de processo para fundição X SLM	66
4.4 APLICAÇÃO DOS PRINCÍPIOS DE DFAM	67
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXO A - RENDERIZAÇÃO DO CILINDRO SLM.....	75
ANEXO B - MOCKUP IMPRESSO EM POLÍMERO PELO PROCESSO FDM.....	76

1 INTRODUÇÃO

AM (*additive manufacturing* - manufatura aditiva), também conhecida como impressão 3D, surgiu comercialmente através de Charles Hull, fundador da empresa Americana 3D Systems, que lançou a primeira máquina de SLA (*stereolithography* - estereolitografia) em 1987: a SLA-1. De lá para cá, como informado por Wohlers (2014), diversas outras tecnologias emergiram, como a FDM (*fused deposition modeling* - modelagem por fusão e deposição), a mais popular e disponível inclusive para uso doméstico; a manufatura aditiva de metais, que envolve tecnologias mais caras e complexas; etc. Englobando diversos métodos, materiais e equipamentos, a AM possui o potencial de modificar profundamente os processos de logística e produção atualmente existentes (TUAN et al, 2018). Uma linha do tempo simplificada, que inclui alguns dos principais marcos da evolução da AM é exibida na Figura 1.

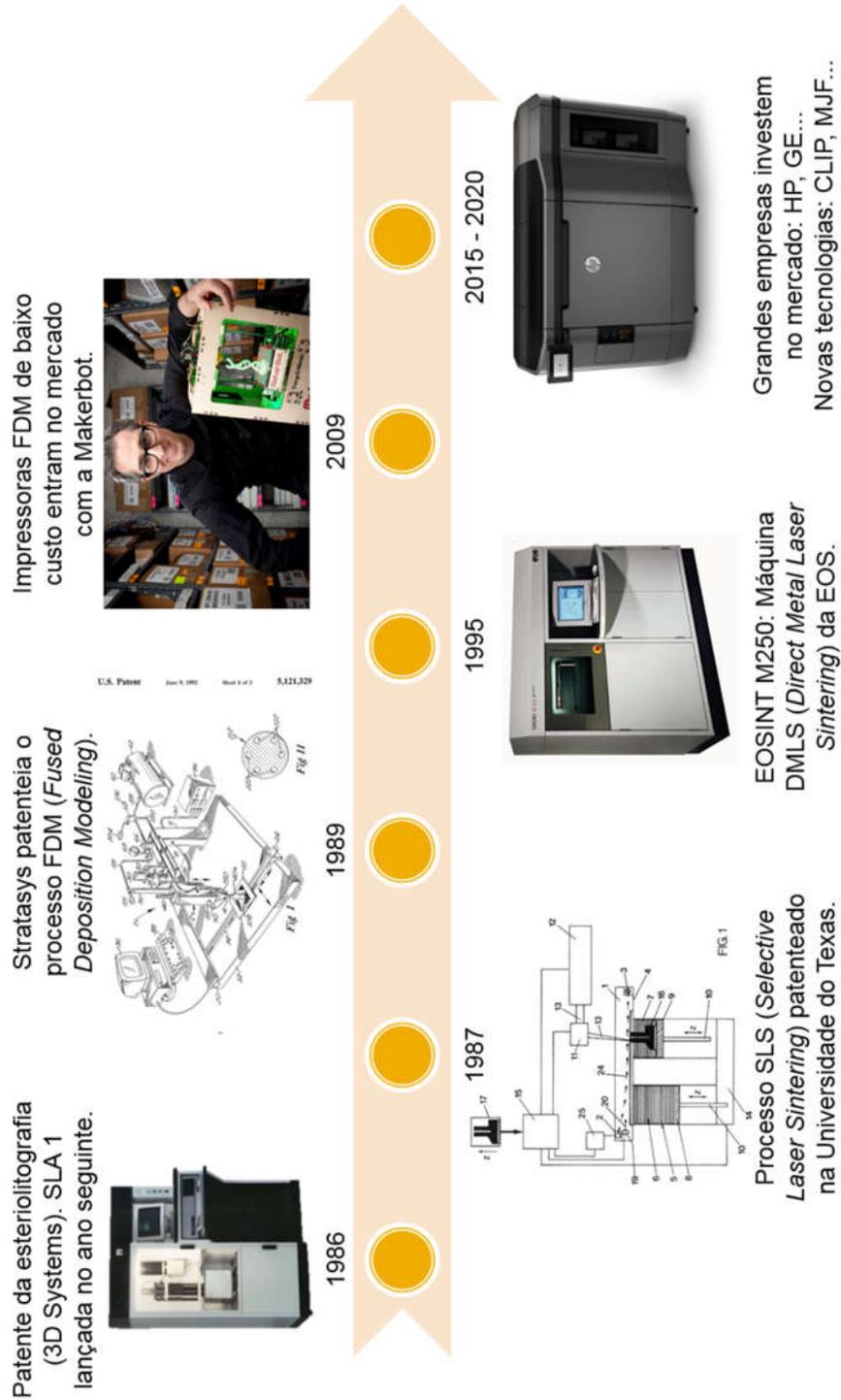
O mercado da AM cresce constantemente, como demonstram os registros de Wohlers (2018), tendo aumentado em média 25% ao ano entre 2013 e 2017. Mesmo assim, a impressão 3D representa menos de 0,1% do negócio global de manufatura, estimado em 12,7 trilhões de dólares. Contudo, Varotsis et al, (2019) lembra que os investimentos em AM seguem também em uma crescente, o que aliado ao potencial do mercado, mantém grande perspectiva de expansão ao setor, já que a convergência entre tecnologias mais avançadas, melhores materiais e digitalização do fluxo de trabalho deve acelerar a adoção da AM (QUINLAN et al, 2017).

Desta forma, por um período de tempo razoável, a AM não competirá diretamente com os métodos tradicionais e bem estabelecidos pelas modernas e automatizadas fábricas atuais. Na escala evolutiva, a impressão 3D já pode ser considerada vantajosa para determinados segmentos, como produtos customizados, de baixo volume de produção e altíssimo valor agregado. Por consequência, hoje é dominante no setor de prototipagem, onde os processos de fabricação tradicionais tornam-se demorados e caros (SRINIVASAN; BASSAN, 2012).

De fato, adaptações nas metodologias de planejamento de produção serão necessárias para as fábricas do futuro. Em um cenário onde as empresas possuirão diversas impressoras produzindo um grande volume de peças, um plano bem definido será fundamental para agrupar os diferentes componentes por critérios de similaridade (altura, área de seção, material, etc.), tornando possível a alocação

otimizada dos equipamentos de acordo com a capacidade das máquinas (velocidade, tempo de setup, volume de construção, etc.). Assim, Li et al (2017) afirma ser possível minimizar o custo médio de produção por quantidade de material consumido na AM.

Figura 1 - Linha do tempo simplificada das tecnologias AM



Fonte: Elaborado pelo autor.

A despeito de um cenário de aplicação para grande escala industrial ser ainda economicamente inviável, quando os volumes de produção são reduzidos, Atzeni e Salmi (2012) demonstram que a manufatura aditiva de metais pode ser favorável perante alguns processos tradicionais como a fundição de alumínio sob pressão, considerando o uso dos equipamentos e tecnologias já disponíveis. Para a fundição de alumínio, os altos investimentos em moldes e ferramentais geralmente não justificam a fabricação de poucos componentes, abrindo uma oportunidade para a utilização da AM.

Jared et al (2017) explica que uma característica marcante da AM é sua capacidade de gerar peças de alta complexidade geométrica (podendo diminuir o número de itens em uma montagem), baixo peso e alta resistência mecânica. Portanto, é natural a sua crescente utilização pela indústria aeroespacial, militar, automotiva e médica, citada por Tuan et al (2018), onde o desempenho é muitas vezes mandatório ao preço individual do componente. Emmelmann et al (2011) traz como exemplo a manufatura de componentes para aeronaves, onde a redução de peso é um fator determinante para a diminuição de custos ao longo da vida útil do avião, pois acarreta em menor consumo de combustível. A Figura 2 mostra a aplicação real de redução de massa em um componente da aeronave A350 da Airbus, onde é possível observar a diferença de complexidade geométrica entre a peça produzida por métodos tradicionais e por manufatura aditiva.

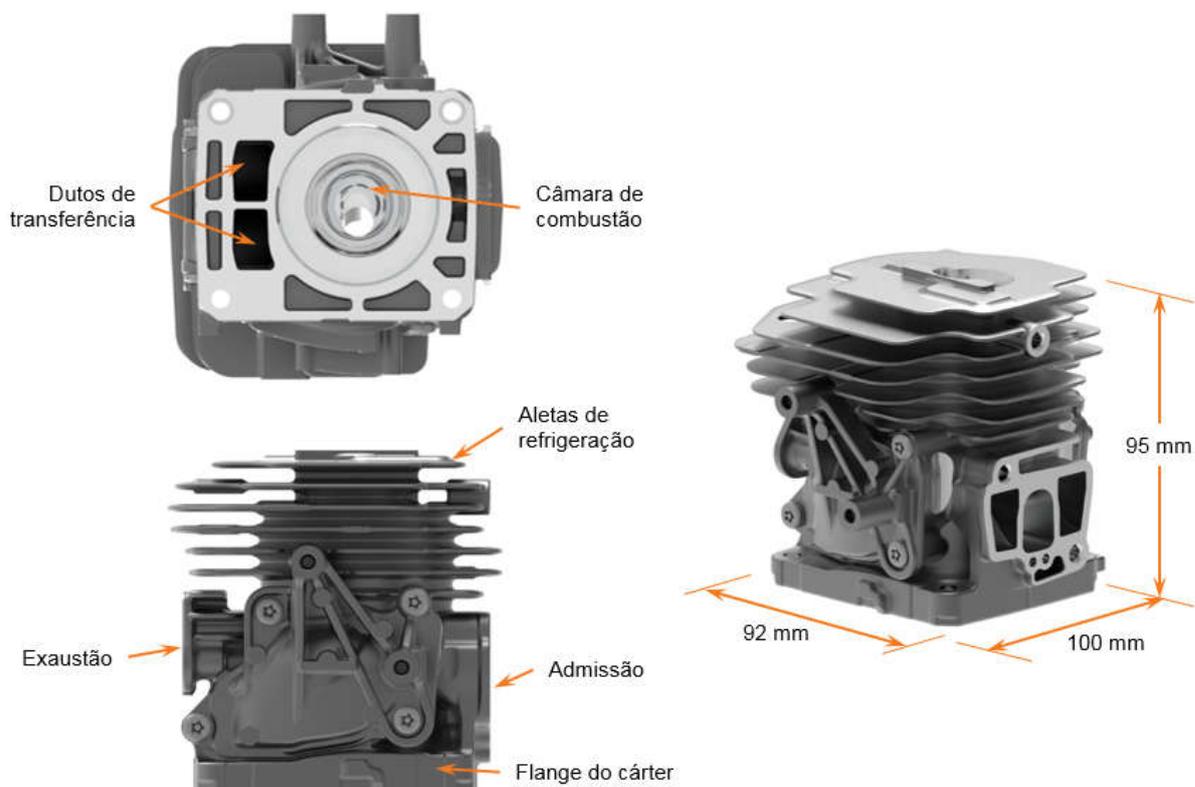
Figura 2 - Suporte Airbus A350 original (topo) e produzido por AM



Fonte: Kellner e Bovalino (2017).

Os cilindros de motores dois tempos para máquinas portáteis são usualmente fundidos em alumínio e possuem considerável complexidade geométrica. Como o usuário precisa suportar o peso do equipamento, o design do cilindro e demais componentes deve ser orientado para o mais leve possível, mantendo uma estrutura que atenda aos requisitos técnicos necessários e leve em conta as limitações dos processos de fabricação empregados. A Figura 3 apresenta o cilindro de roçadeira disponível no mercado e selecionado para este estudo com suas principais dimensões, além das nomenclaturas baseadas em Blair (1996).

Figura 3 - Cilindro de roçadeira disponível no mercado



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a adaptação de um cilindro de motor dois tempos para máquinas portáteis fabricado por fundição em alumínio para um

processo de manufatura aditiva adequado, utilizando princípios do DfAM (*design for additive manufacturing* - design para manufatura aditiva) pertinentes.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Seleção de um processo de manufatura aditiva tecnicamente viável para a produção de cilindros.
- Alteração do modelo 3D de um cilindro fundido para AM.
- Diminuição do número de componentes do motor.
- Redução de massa do cilindro.
- Comparação da resistência mecânica do modelo 3D original e alterado para AM através de simulação computacional.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante de um cenário global onde a perspectiva é de significativo aumento das restrições ambientais, como as regulamentadas pela Comissão Europeia, que tem como objetivo reduzir de forma incremental o nível de poluentes emitidos por máquinas portáteis e retirar do mercado motores altamente poluentes (EUROPEAN COMMISSION, 2019), a consequente diminuição da produção de equipamentos que utilizem motores à combustão é esperada. As máquinas à combustão desenvolvidas para este novo mercado serão parte de um nicho onde baterias e fontes alternativas de energia levarão algum tempo extra para serem consolidadas, como por exemplo, roçadeiras, motosserras e demais equipamentos voltados para uso intensivo e operados por profissionais.

Em paralelo à redução dos volumes de produção de motores à combustão, tecnologias de AM ficarão mais acessíveis com o passar do tempo, o que poderia viabilizar a aplicação na fabricação de cilindros otimizados que atendam as novas regulamentações ambientais. Com esta premissa em mente, o presente estudo propõe avaliar do ponto de vista técnico a utilização de conceitos de DfAM em cilindros para máquinas portáteis atualmente fundidos em alumínio, dentro do escopo delimitado pelos objetivos definidos na seção anterior.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA

A norma ISO 52900 define manufatura aditiva como processos de adição de materiais para formação de peças oriundas de modelos 3D. Esta formação é geralmente feita camada por camada, diferentemente das metodologias de fabricação subtrativas (fresamento, furação, torneamento, etc.) e formativas (injeção, forjamento, dobramento, etc.). As tecnologias de AM são categorizadas de acordo com o princípio de processamento das camadas conforme abaixo (ISO, 2015):

- Adição de lâminas: Lâminas recortadas de material são unidas (coladas) para formar um objeto.
- Deposição com energia direcionada: Energia térmica é usada para fundir materiais à medida que estes são depositados.
- Extrusão de material: Material é extrudado através de um bico ou orifício, sendo seletivamente depositado.
- Fotopolimerização em cuba: Polímero fotossensível líquido é curado seletivamente em uma cuba por polimerização ativada por luz.
- Fusão de leito de pó: Energia térmica funde áreas seletivas de um leito de pó.
- Jateamento de aglutinante: Um agente aglutinante líquido é seletivamente depositado para unir materiais em pó.
- Jateamento de material: Material é depositado em gotículas de forma seletiva.

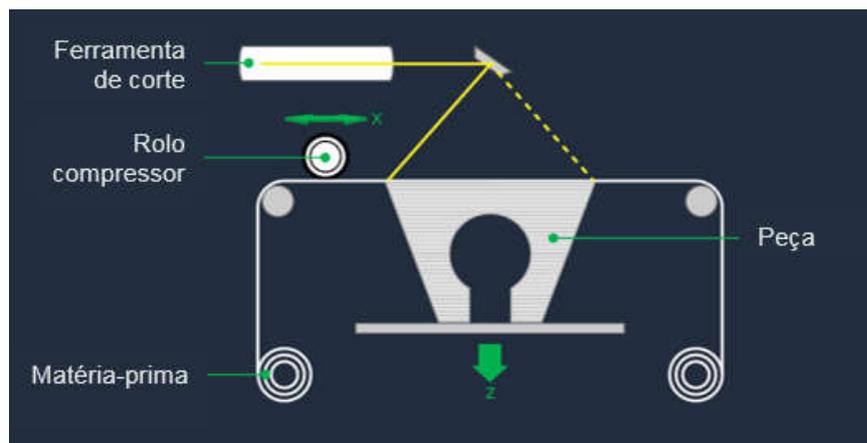
Redwood et al (2018) divide os processos de AM em cinco etapas, iniciando pela criação de um arquivo 3D, normalmente via CAD (*computer aided design* - design assistido por computador), ou engenharia reversa por digitalização 3D. Em seguida, o arquivo é convertido geralmente para o formato STL (criado em 1987 pela 3D Systems para AM), mas outros formatos também podem ser utilizados, como OBJ, 3DP e AMF, para o “fatiamento” em um software específico que gerará a programação da impressão das camadas em uma linguagem G-code (compilação de instruções numéricas comumente utilizada para processos tradicionais de fabricação automatizados) com os parâmetros necessários para leitura da máquina. Então, a impressão é realizada com as particularidades inerentes de cada tecnologia de AM. Após, as peças são removidas da impressora, o que pode ser uma etapa

simples ou complexa de acordo com o processo de AM. No final, os componentes passam por operações de pós-processamento, que podem variar para cada tecnologia ou com os requisitos da aplicação para qual a peça é destinada.

2.1.1 Adição de lâminas

MIT (2019) descreve o princípio dos processos de adição de lâminas como camadas de materiais consecutivamente unidas e cortadas para a geração de uma forma 3D, feita em equipamentos como o ilustrado na Figura 4. A técnica foi criada pela companhia americana Helisys em 1985 e patenteada como LOM (*laminated object manufacturing* - manufatura de objetos laminados), sendo utilizada principalmente para a confecção de peças em papel, compósitos e metais.

Figura 4 - Principais componentes de um sistema LOM



Fonte: Adaptado de MIT (2019).

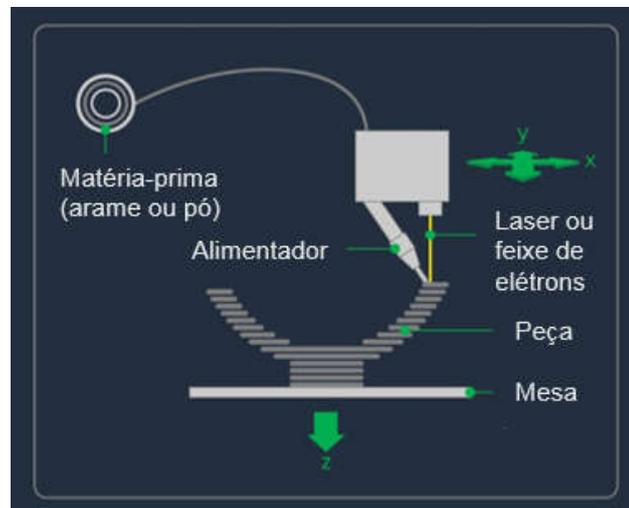
Variantes comerciais do LOM, como o SLCOM (*selective lamination of composite object manufacturing* - laminação seletiva da manufatura de objetos compósitos) e o CBAM (*composite-based additive manufacturing* - manufatura aditiva baseada em compósitos) trabalham com chapas de fibra de vidro e carbono, respectivamente, impregnadas com polímero, enquanto que máquinas UAM (*ultrasonic additive manufacturing* - manufatura aditiva ultrassônica) possuem um cabeçote especial para soldagem por ultrassom de diferentes materiais metálicos, em conjunto com uma ferramenta de corte CNC para ajuste do perfil das camadas via manufatura subtrativa. Uma vantagem importante do UAM é sua capacidade de integrar fios e fibra ótica entre as lâminas, que podem conectar aparelhos eletrônicos

de monitoramento diversos, como feito pela NASA na construção de um trocador de calor de alta-performance (MIT, 2019).

2.1.2 Deposição com energia direcionada

DED (*direct energy deposition* - deposição com energia direcionada) e sua variante LMD (*laser metal deposition* - deposição metálica a laser), são processos onde o fluxo de material em pó ou arame é direcionado e fundido através de laser ou feixe de elétrons, formando a peça camada por camada. Os materiais mais empregados são ligas de aço, titânio e alumínio, utilizados principalmente em procedimentos de manutenção de grandes peças, já que o sistema pode ser montado em uma estrutura CNC de 5 eixos ou até mesmo em um equipamento híbrido, com cabeçote para ferramentas de corte para usinagem e acabamentos finos (MOREAU, 2017). Geralmente, os sistemas DED são similares aos representados na Figura 5.

Figura 5 - Principais componentes de um sistema DED



Fonte: Adaptado de MIT (2019).

2.1.3 Extrusão de material

Bastante popular após o surgimento das impressoras de baixo custo a partir de 2009, os sistemas FFF (*fused filament fabrication* - fabricação por filamento fundido) ou FDM, como patenteado pela americana Stratasys em 1989, utilizam uma

ampla variedade de polímeros que vão desde *commodities* como o PLA (*polylactic acid* - ácido polilático) e o ABS (*acrylonitrile butadiene styrene* - acrilonitrila butadieno estireno), até materiais de engenharia como PC (*polycarbonate* - policarbonato), PA (*polyamide* - poliamida), PEEK (*polyetheretherketone* - polieteretercetona) e outros. As *commodities*, especialmente o PLA, são muito empregados em equipamentos de baixo custo com controle de temperatura precário, enquanto os polímeros de engenharia normalmente necessitam de máquinas de nível industrial. Existem também, impressoras especiais para fabricação de alimentos feitos de chocolate, massas, queijo, etc., além de grandes estruturas que imprimem concreto para a construção civil (VOLPATO, 2017). Usualmente, os sistema FFF para polímeros são semelhantes aos da Figura 6.

Figura 6 - Principais componentes de um sistema FFF



Fonte: Adaptado de MIT (2019).

Redwood et al (2018) esclarece que após a impressão de peças poliméricas, operações de pós-processamento podem ser necessárias ou opcionais, como a remoção dos suportes, lixamento para melhor acabamento da superfície e aplicação de revestimentos, como tintas e recobrimentos metálicos. O tipo de pós-processamento adotado é dependente do material da peça e sua aplicação. A remoção de suportes pode ser manual, quando impressos no mesmo material da peça, ou por solubilização em água/solvente, quando utilizados filamentos adequados, como PVA (*polyvinyl alcohol* - acetato de polivinilo) e HIPS (*high-impact polystyrene* - poliestireno de alto impacto). Suportes solúveis adicionam também uma maior liberdade de design para componentes impressos por FFF, já que

geometrias complexas podem ser geradas sem a preocupação de existir acesso para a remoção posterior dos suportes.

2.1.3.1 Outros processos de extrusão de material

CFF (*continuous filament fabrication* - fabricação contínua por filamento) é um processo para produção de peças compósitas onde camadas do polímero Onix (material baseado em PA) são intercaladas com fibras de vidro ou carbono. O posicionamento das fibras pode ser controlado via software para conceber ao componente às propriedades mecânicas adequadas à aplicação, que segundo Markforged (2019), substitui alguns metais com o benefício da redução de peso.

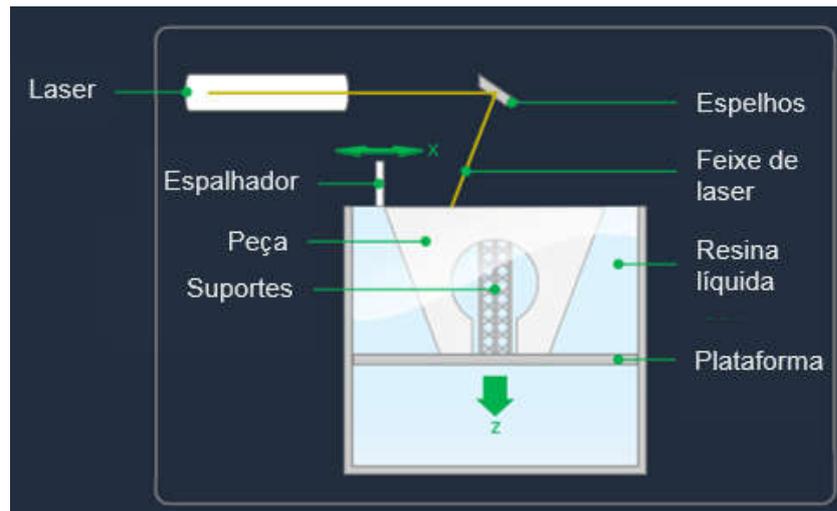
Para a fabricação de peças metálicas, as companhias Markforged e Desktop Metal desenvolveram recentemente soluções semelhantes, que utilizam a matéria-prima do processo MIM (*metal injection moulding* - moldagem por injeção de pós metálicos), porém em forma de filamento. Como no MIM, a peça precisa passar por uma etapa de *debinding*, onde a resina que une o pó metálico é eliminada e então seguir para o forno de sinterização, onde contrai em torno de 20% do seu volume inicial. Ao contrário de outros métodos de AM de metais, os equipamentos podem ser instalados em um ambiente de escritório e o pós-processamento é significativamente facilitado pela aplicação de uma camada cerâmica entre a peça e o suporte, que pode ser destacado manualmente sem a necessidade de usinagem, como afirmam Markforged (2019) e DM (2019).

2.1.4 Fotopolimerização em cuba

Sendo o primeiro processo comercial de impressão 3D, disponível no mercado em 1987 pela 3D Systems, o SLA atua através da cura seletiva de uma resina líquida por um feixe de laser UV camada por camada. De forma similar, sistemas DLP (*digital light processing* - processamento digital por luz) podem gerar intrincadas geometrias com a vantagem de serem normalmente mais rápidos, utilizando a projeção de imagens completas como mecanismo de cura da resina ao invés de varredura por laser (GIBSON et al, 2015). A Figura 7 demonstra as partes comuns para um sistema SLA.

Após a retirada da peça da impressora, Redwood et al (2018) diz ser necessária a remoção dos suportes, que são impressos no mesmo material do componente. O lixamento das superfícies é geralmente realizado apenas nas regiões onde suportes foram destacados, pois o acabamento nas demais áreas costuma ser bastante satisfatório.

Figura 7 - Principais componentes de um sistema SLA



Fonte: Adaptado de MIT (2019).

Um importante desenvolvimento recente para as tecnologias de fabricação por fotopolimerização em cuba foi a criação do processo CLIP (*continuous liquid interface production* - produção contínua com interface líquida), que une o conceito de projeção de imagens do DLP com a adição de um vidro permeável ao oxigênio. Assim, a fabricante afirma ser possível a fabricação de componentes feitos em resina com propriedades mecânicas superiores e isotrópicas, além de garantir o fluxo contínuo do processo, tornando-o diversas vezes mais rápido (CARBON, 2019).

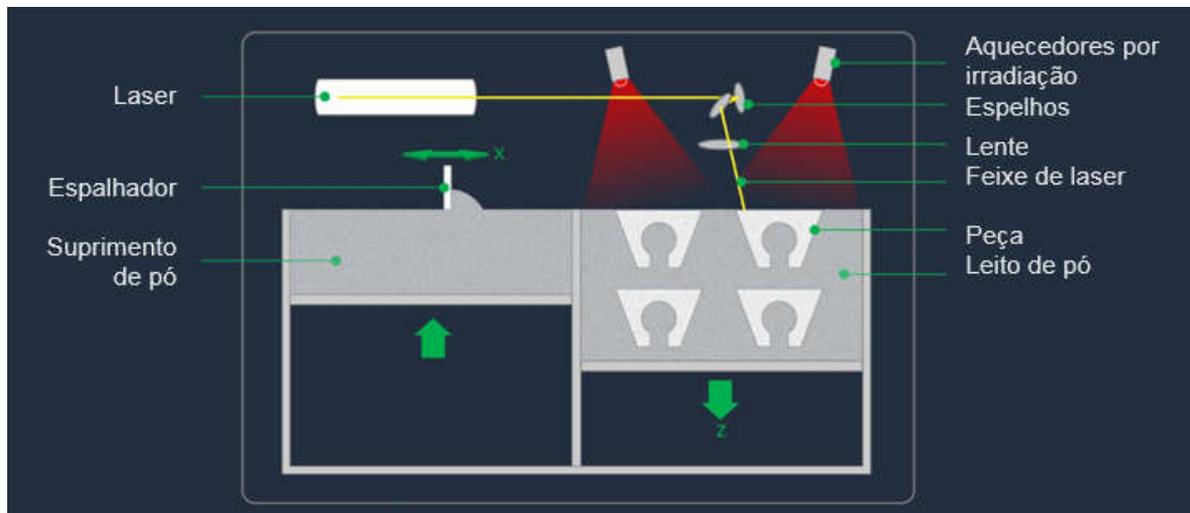
2.1.5 Fusão de leito de pó

Segundo Gibson et al (2015), todos os processos PBF (*powder bed fusion* - fusão de leito de pó) compartilham características básicas que incluem uma ou mais fontes de calor para fusão das partículas de pó, métodos para controlar localmente a fusão em cada camada e mecanismos para adição e nivelamento das camadas de

pó. Estas tecnologias são empregadas principalmente para polímeros e ligas metálicas de componentes de engenharia ou biocompatíveis (REDWOOD et al, 2018), mas também podem fabricar peças cerâmicas e joias feitas de metais preciosos (LOCKER, 2019).

Volpato (2017) esclarece que o primeiro processo de PBF foi patenteado em 1989 pela empresa 3D Systems, batizado de SLS (*selective laser sintering* - sinterização seletiva a laser) e aplicável para polímeros. Nele, uma camada de pó é espalhada sobre uma plataforma em uma câmara inertizada e pré-aquecida onde um feixe de laser funde seletivamente a geometria de interesse contida nesta camada. Após, a base desce e uma nova camada é espalhada sobre a anterior, repetindo o ciclo até que a peça esteja completa. A Figura 8 traz a nomenclatura dos principais componentes de uma máquina de SLS, mostrando o sentido de deslocamento no eixo z das plataformas do compartimento de suprimento de pó e da câmara de construção, além da movimentação no eixo x do espalhador durante o ciclo de impressão.

Figura 8 - Principais componentes de um sistema SLS



Fonte: Adaptado de MIT (2019)

Finalizada a impressão, todo o pó compactado é retirado da máquina em uma espécie de “bolo”, que é quebrado e pode ser reutilizado se misturado em proporção adequada com pó novo. Em seguida, as peças passam por escovação ou jato de ar comprimido para eliminação do pó remanescente, sendo posteriormente submetidas a um tratamento de superfície (opcional) como lixamento, pintura, etc. (MIT, 2019).

Conforme Ligon et al (2017), o SLS é capaz de gerar geometrias complexas e delicadas sem a necessidade de material de suporte, já que o próprio pó cumpre esta função. Por isso, diversas peças podem ser impressas ao mesmo tempo, desde que não ultrapassem o volume da câmara de construção da máquina. Peças móveis e ocas são também viáveis, contudo, furos de escape devem ser planejados para retirada do material não fundido. Os materiais comumente utilizados são as poliamidas como o Nylon 11 e 12, que em casos especiais, podem receber cargas de fibra de vidro, carbono ou alumínio (VOLPATO, 2017).

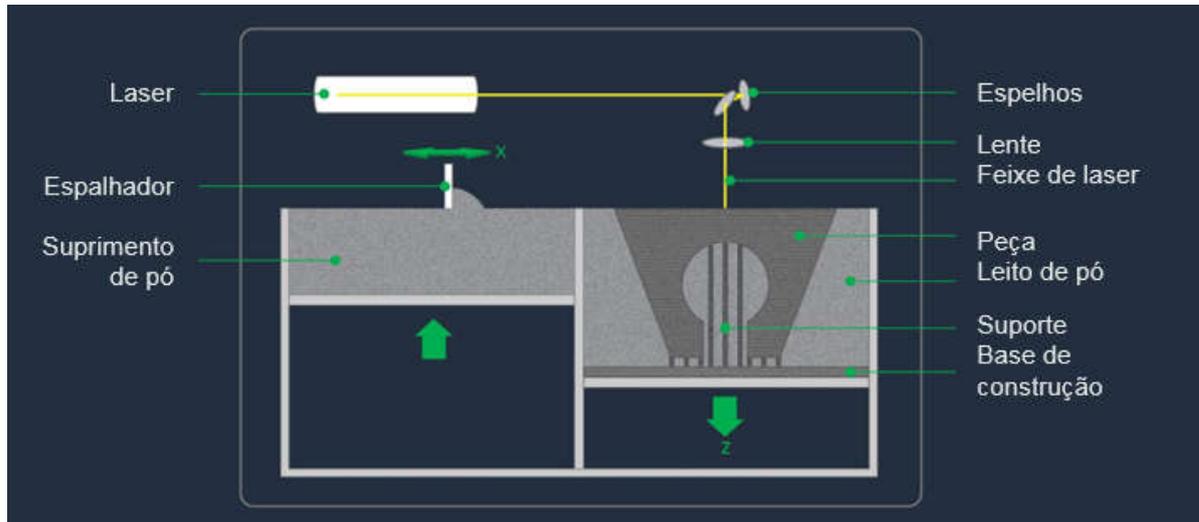
Para metais, os processos PBF surgiram comercialmente em 1995 com o nome de DMLS (*direct metal laser sintering* - sinterização direta de metal a laser) através da multinacional alemã EOS, mas os primeiros resultados de sucesso foram reportados pelo instituto de pesquisa alemão Fraunhofer em 1994, usando a liga de aço 316L como matéria-prima para o pó metálico (SHELLABEAR; NYRHILÄ, 2004). A instituição batizou o método de manufatura como SLM (*selective laser melting* - fusão seletiva a laser).

De acordo com Milewski (2017), tecnologias como a SLM são capazes de produzir peças com alta resistência mecânica e densidade maior que 99%, além de trabalhar com diferentes materiais como aços, ligas de titânio e alumínio (HERZOG et al, 2016), com as ligas de alumínio sinalizando significativo potencial de crescimento no mercado (SMARTTECH, 2018). MIT (2019) explica que os princípios do processo SLM são similares ao SLS, como pode ser averiguado comparando o equipamento representado na Figura 9 com o da figura anterior, porém, o gerenciamento de temperatura é crítico, tornando obrigatória a utilização de suportes que conectem os componentes à plataforma de construção (geralmente feita no mesmo material da peça) para dissipar o calor e evitar deformações. Assim sendo, é incomum a impressão de componentes sobrepostos dentro do leito de pó metálico, salvo através da elaboração de um design otimizado que permita lidar com os problemas térmicos mencionados.

Com base nos requisitos do produto, Redwood et al (2018) afirma que mais ou menos etapas pós-impressão são necessárias (afetando o custo), como o corte da plataforma de construção e dos suportes, a remoção do pó, tratamento térmico, acabamento de superfície e usinagens. O corte da plataforma de construção e de suportes são inerentes ao processo, já que ajudam a evitar as deformações causadas pelas altas temperaturas geradas durante a impressão. O manuseio e

remoção do pó (especialmente em componentes ocos) são também preocupações constantes. Tratamentos térmicos, acabamentos de superfície e usinagens podem variar para cada caso, porém, são frequentemente aplicados em peças funcionais.

Figura 9 - Principais componentes de um sistema SLM



Fonte: Adaptado de MIT (2019).

Duda e Raghavan (2016) explicam que devido à lenta velocidade de impressão (que varia de acordo com o equipamento e parâmetros utilizados) e o alto valor dos pós metálicos existentes, processos como o SLM são ainda bastante onerosos. Entretanto, os custos tendem a diminuir significativamente a médio prazo com o aumento da demanda de volume por pó metálico e com o avanço das tecnologias empregadas nas máquinas, como as citadas a seguir:

- Utilização de múltiplos feixes de laser.
- Estrutura de camadas otimizadas com diferentes espessuras de acordo com a necessidade da peça.
- Sistema de distribuição do pó atuando em paralelo com os feixes de laser.
- Otimização do sistema de distribuição do pó, como por exemplo, pó distribuído em ambas direções.
- Máquinas com múltiplas câmaras de construção para produção contínua.
- Estabilidade do processo aumentada através de monitoramento online dos sistemas.

Diversos processos similares ao SLM ou DMLS surgiram ao longo dos anos. Equipamentos que utilizam tecnologias como a LaserCUSING, DMP (*direct metal*

printing - impressão direta de metal) e DMLM (*direct metal laser melting* - fundição direta de metal a laser) oferecem vantagens específicas segundo os seus fabricantes, mas seguem os princípios básicos do SLM, como pode ser constatado em Concept Laser (2019), 3D Systems (2019) e GE Additive (2019), respectivamente. Outra variante disponível no mercado é o híbrido entre PBF e manufatura subtrativa oferecido pela empresa Sodick, através de uma máquina que possui um eixo-árvore (*spindle*) para utilização de uma fresa. A cada 10 camadas geradas por AM, a fresa é acionada e usina o acabamento da geometria impressa em meio ao leito de pó (SODICK, 2019).

2.1.5.1 Outros processos de fusão de leito de pó

Introduzido em 2016 pela tradicional companhia fabricante de impressoras jatos de tinta (e diversos outros produtos e serviços) Hewlett-Packard, ou HP, o processo de AM nomeado como MJF (*multi jet fusion* - fusão multijato) promete trazer significativos avanços em relação ao SLS para a fabricação de componentes poliméricos. Ao contrário do SLS, onde a fusão do pó ocorre pela energia direcionada localmente pelo laser, o MJF aplica gotículas de um agente químico de forma seletiva (através de milhares de bicos controláveis individualmente pelo software do equipamento) sobre o leito de pó, o qual absorve o calor oriundo de luz infravermelha e gera uma camada da peça. HP (2016) afirma que a tecnologia MJF tem o potencial de controlar as características do material em cada voxel da peça impressa, além de gerar múltiplas cores e acabamentos diferenciados, já que os agentes aplicados sobre o leito de pó podem ter outras funções além de apenas propiciar a fusão. Outras importantes vantagens citadas são uma maior densidade do componente e alta produtividade em relação ao SLS.

Com um conceito bastante similar, a empresa sueca Voxeljet lançou sua tecnologia chamada HSS (*high speed sintering* - sinterização de alta velocidade) em 2017. Uma das vantagens destacadas pelo fabricante é sua postura de permitir a livre utilização de pós fabricados por terceiros, além de fornecer um software altamente flexível para a configuração dos parâmetros de processo de acordo com as necessidades do cliente (VOXELJET, 2019).

Aplicável aos metais como ligas de titânio, cobalto-cromo e Inconel718, Volpato (2017) destaca o processo EBM (*electron beam melting* - fusão por feixe de

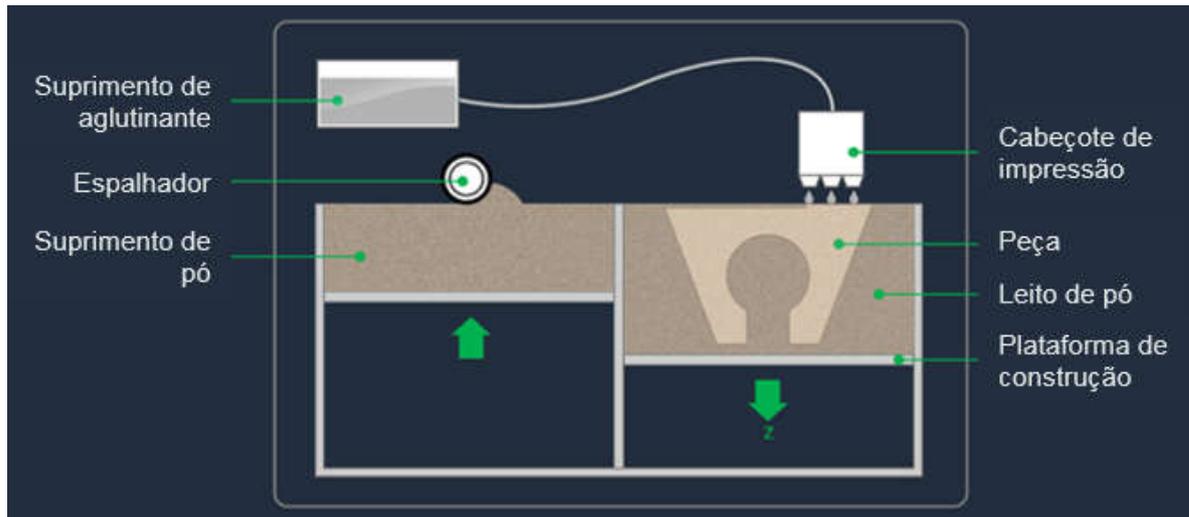
elétrons), disponibilizado comercialmente em 2003 pela também sueca Arcam. Segundo Moreau (2017), o conceito é semelhante ao SLM, mas feixes de elétrons são responsáveis por aquecer e fundir o leito de pó metálico (que necessita de uma câmara a vácuo para evitar a corrosão) ao invés de laser. A tecnologia EBM consegue lidar melhor com o gerenciamento das temperaturas durante a impressão, reduzindo as tensões residuais, além de ser mais rápida. Como desvantagens, o acabamento da superfície costuma ser pior do que no SLM e materiais magnéticos (como o aço) não são compatíveis. As principais aplicações são atualmente a fabricação de implantes médicos e dispositivos para a indústria aeroespacial (MIT, 2019).

2.1.6 Jateamento de aglutinante

De acordo com Milewski (2017), o jateamento de aglutinante é realizado em um leito de pó, como no processo SLM, onde resina é aplicada camada por camada para unir as partículas do material, que após a cura, formam uma “peça verde”. A cura do aglutinante pode ser feita entre a geração das camadas ou levando as peças para um forno, de acordo com o material que está sendo trabalhado. Sistemas de jateamento de aglutinante são usualmente parecidos com os vistos na Figura 10.

Para pós metálicos como o aço, a “peça verde” é geralmente infiltrada com bronze para atingir uma densidade de aproximadamente 95%, mas HIP (*hot isostatic pressing* - prensagem isostática a quente) pode ser utilizado em substituição à infiltração, atingindo densidades maiores do que 99% e tornando o processo viável para outros tipos de metais como o titânio. Existem também, equipamentos para impressão em areia, como os da ExOne, capazes de produzir machos para fundição em escala industrial (MILEWSKI, 2017).

Figura 10 - Principais componentes de um sistema de jateamento de aglutinante



Fonte: Adaptado de MIT (2019).

2.1.6.1 Outros processos de jateamento de aglutinante

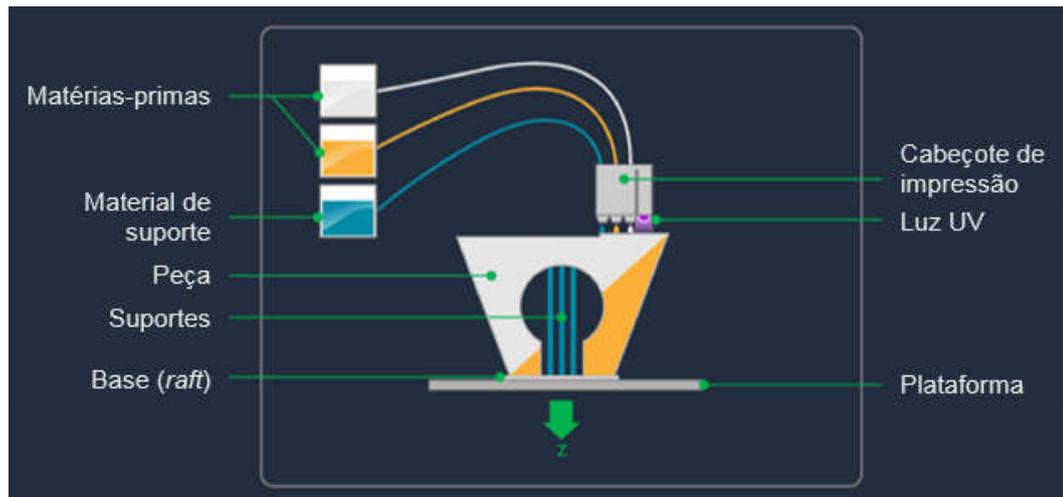
Tecnologias previstas para entrarem no mercado em 2020 através das empresas Markforged, Desktop Metal e HP, prometem aumentar a janela de viabilidade econômica para AM de metais, utilizando os pós metálicos e procedimentos do já bem estabelecido processo MIM. Como informado em Markforged (2019) e DM (2019), a tecnologia é baseada na deposição seletiva de agentes aglutinantes em um leito de pó metálico, curado camada por camada. As peças passam então pela etapa de *debinding*, sendo posteriormente sinterizadas em um forno. Suportes são necessários para evitar deformações durante a sinterização, mas são produzidos em material cerâmico facilmente destacável. Uma vantagem extra oferecida pela máquina da HP é que a etapa de *debinding* ocorre dentro da própria câmara de construção da impressora, reduzindo o ciclo produtivo em aproximadamente 20h (HP, 2018).

2.1.7 Jateamento de material

Equipamentos de jateamento de material, como apresentados na Figura 11, utilizam resinas fotossensíveis depositadas e curadas camada por camada para a fabricação de componentes que podem ser coloridos e ter propriedades variadas ao longo do volume impresso, como regiões rígidas e outras flexíveis. Tecnologias

como a Polyjet da Stratasys, são em maior parte utilizadas para a geração de mockups realistas, mas podem também ser aplicadas na área médica e de prototipagem funcional. Os suportes são solúveis e densos, normalmente impressos ao redor de todo o componente, conferindo significativa liberdade de design (REDWOOD et al, 2018).

Figura 11 - Principais componentes de um sistema de jateamento de material



Fonte: Adaptado de MIT (2019).

2.1.8 Dados comparativos entre processos

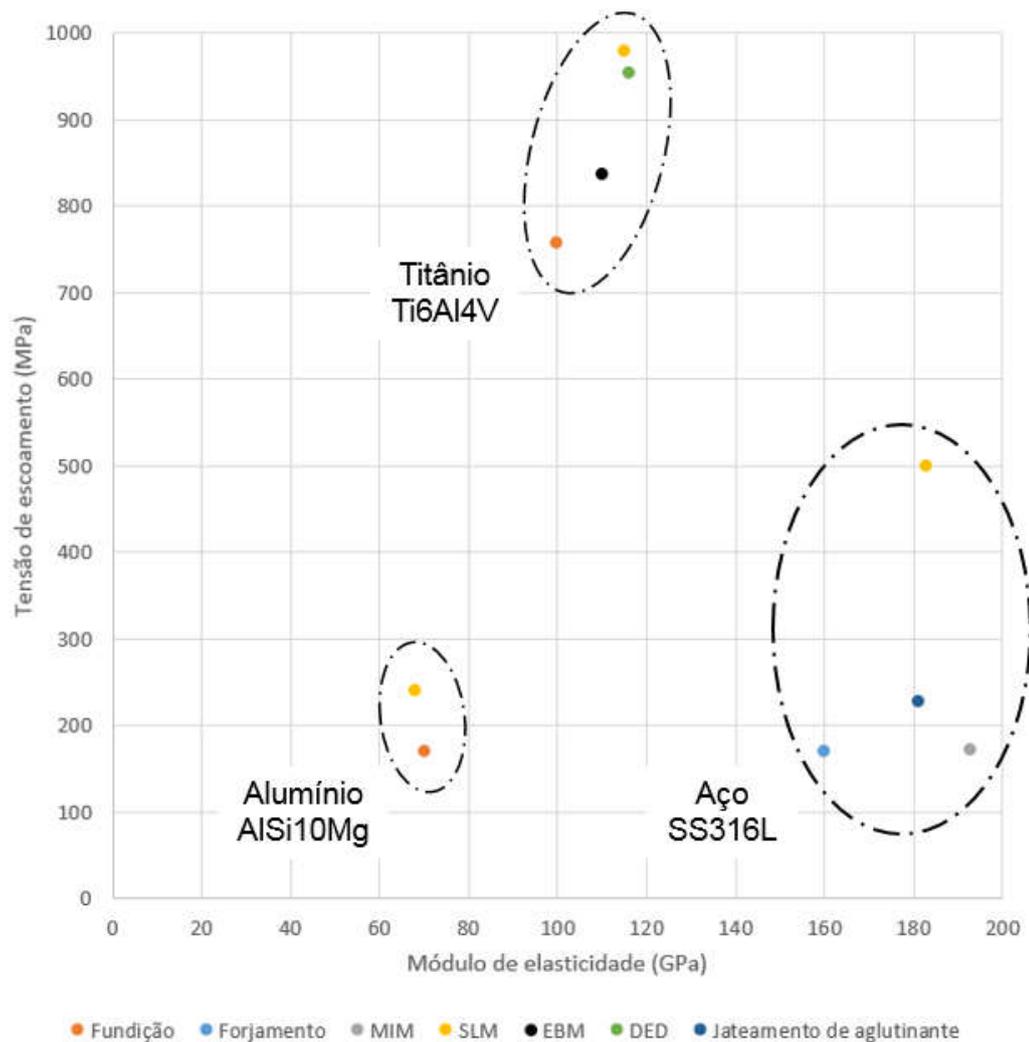
Os dados a seguir foram compilados para facilitar a comparação entre os principais processos de AM e também métodos tradicionais de fabricação. A Tabela 1 traz informações sobre o tamanho dos componentes que geralmente podem ser impressos nas máquinas de AM atuais (MIT, 2019), além das tolerâncias gerais atingíveis consultadas em MIT (2019) e Redwood et al (2018). Já o Gráfico 1 compara a relação da tensão de escoamento com o módulo de elasticidade entre processos tradicionais e AM para titânio, alumínio e aço. Por fim, a Tabela 2 classifica alguns processos de AM dentro das classes de tolerâncias ISO (onde 5 é a classe mais fina e 16 a mais grosseira), colocando-os em perspectiva com metodologias tradicionais de produção quanto à precisão dimensional alcançável.

Tabela 1 - Tamanhos das peças e tolerâncias gerais obtidas por AM

Processo	Tamanho da peça (mm)	Tolerâncias gerais (mm)
FFF	a partir de ~10	$\pm 0,13$ (industrial) $\pm 0,5$ (desktop)
SLA	até ~1000	$\pm 0,15$
SLS	de ~5 a 1000	$\pm 0,2$
Jateamento de material	até ~1000	$\pm 0,1$
Jateamento de aglutinante	até ~1000 (areia) até ~100 (metal)	$\pm 0,3$ (areia) $\pm 0,2$ (metal)
SLM	de ~5 a 500	$\pm 0,1$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 1 - Propriedades mecânicas resultantes de processos tradicionais e AM



Fonte: Adaptado de MIT (2019).

Tabela 2 - Comparativo de tolerâncias entre processos tradicionais e AM

Processo	Classe de tolerância - IT (DIN EN ISO 286-1)											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Fundição												
Sinterização												
Forjamento livre												
Forjamento de precisão												
Extrusão a frio												
Fresamento												
Corte												
Torneamento												
Furação												
Faceamento												
Aplainamento												
Decapagem												
Retificação												
Manufatura aditiva												
FDM							xyz	xyz	xyz	z		
SLS									xyz	xyz	xyz	
SLM							xyz	xyz	xyz	xyz	z	z

Fonte: Adaptado de Lieneke et al (2015).

Em relação à resistência mecânica, o Gráfico 1 demonstra que a tensão de escoamento resultante para componentes metálicos (titânio, alumínio e aço) tende a ser superior quando fabricados por processos de AM ao invés de métodos como a fundição, o forjamento e o MIM. Quanto ao comparativo de tolerâncias visto na Tabela 2, a similaridade entre AM e processos tradicionais mais grosseiros, como a fundição e o forjamento, torna-se evidente.

2.2 DESIGN PARA MANUFATURA ADITIVA (DFAM)

Como já consolidado nos processos tradicionais de fabricação (fundição, usinagem, forjamento, etc.), onde metodologias de DfMA (*design for manufacturing and assembly* - design para manufatura e montagem) são aplicadas para desenvolver produtos mais baratos e confiáveis (BOOTHROYD et al, 2011), na manufatura aditiva, DfAM deveria ser utilizado para tirar vantagem do potencial dos sistemas de AM e trabalhar em torno de suas limitações para a obtenção de componentes impressos altamente otimizados (GIBSON et al, 2015). Para guiar os

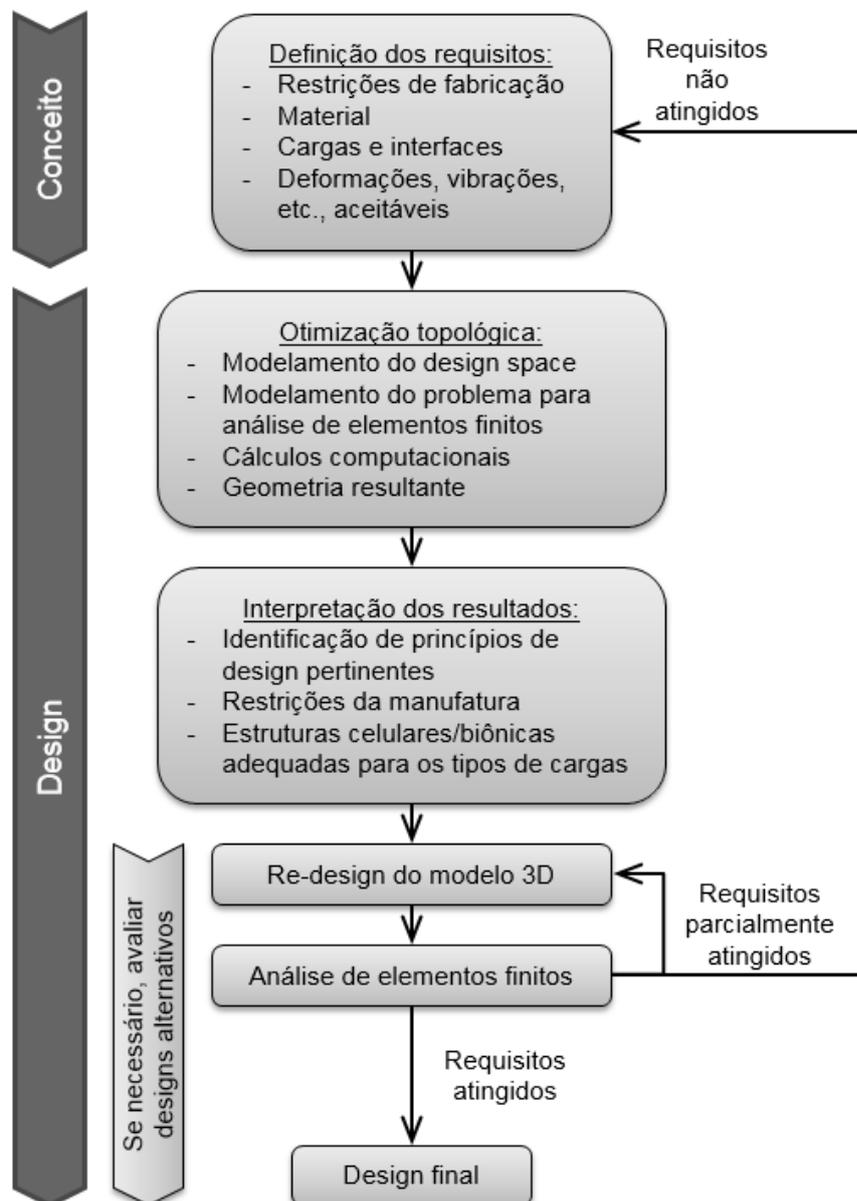
engenheiros neste caminho, Volpato (2017) sugere a adoção dos seguintes princípios de DfAM:

- Desconsiderar as restrições tradicionais de projeto mecânico e considerar as referentes ao processo de AM escolhido.
- Tirar vantagem da liberdade geométrica oferecida pelas tecnologias AM, aproveitando para criar produtos com geometrias complexas que agreguem valor, como funcionalidade, baixo peso, estética e custo de produção.
- Reduzir o número de componentes na montagem de um produto por meio da integração das funções.
- Otimizar topologicamente o projeto para a máxima resistência e o mínimo peso, empregando a quantidade mínima possível de matéria-prima com base em análises de cargas e tensões, que possibilitem concentrar massa apenas em regiões mais solicitadas da peça.
- Utilizar estruturas celulares para redução de peso e materiais, criando por exemplo, regiões ocas no componente reforçadas com treliças, colmeias, etc.
- Optar pela melhor solução de projeto combinando design e função através da criação de conceitos de maneira mais livre.
- Desconsiderar a produção por meio de ferramental, ou seja, ponderar que, durante a vida de um produto, mudanças e melhorias de projeto não são mais tão problemáticas.
- Atentar para as limitações quanto aos materiais disponíveis para a tecnologia AM escolhida, tendo em mente as características específicas de cada material e sua possível anisotropia.
- Levar em consideração no projeto, o processo e a orientação de fabricação do componente, dando importância à eventual anisotropia do material, a precisão dimensional e o acabamento da superfície do método de AM adotado.

O artigo de Gebisa e Lemu (2017) aponta que o re-design para AM de um componente já existente também pode ser considerado para a redução de peso enquanto mantem os requisitos funcionais originais. O peso, inclusive, costuma ser um fator de extrema importância para a viabilidade econômica de peças produzidas por AM, como demonstra Pont (2017), pois ao contrário dos processos de fabricação tradicionais, os custos na AM não são tão influenciados pela complexidade

geométrica, mas sim pela quantidade de material utilizado, entre outros fatores como o pós-processamento. Além do mais, a viabilidade econômica pode surgir dos benefícios decorrentes do menor peso ou de outras melhorias possíveis apenas através de um design mais complexo, variando de acordo com a percepção de diferentes mercados e aplicações para qual a peça possa ser destinada (HÄLLGREN et al, 2016). As etapas para elaboração de um design de baixo peso, onde otimização topológica e adição de estruturas celulares são realizadas, é detalhado na Figura 12.

Figura 12 - Fluxo de processo para design orientado para baixo peso



Fonte: Adaptado de Emmelmann et al (2011).

Klahn et al (2014) explica que a possibilidade de executar um design de baixo peso é um dos critérios a serem avaliados para a transformação de uma peça existente para AM, além do potencial da integração de componentes, da individualização para os clientes e da melhoria de eficiência do produto. No entanto, seja para o projeto de um novo produto ou para o re-design de um existente, os processos de AM possuem restrições que devem ser observadas. Estas restrições variam de acordo com o equipamento e parâmetros ajustados, mas como regra geral, as recomendações da Tabela 3 podem ser seguidas para as diferentes tecnologias de AM atualmente disponíveis no mercado.

Tabela 3 - Regras gerais de DfAM

	FFF	SLA	SLS	Jat. de material	Jat. de aglutin.	SLM
 Espessura mín. de paredes apoiadas (mm)	0,8	0,5	0,7	1	2	0,4
 Espessura mín. de paredes sem apoio (mm)	0,8	1	0,7	1	3	0,5
 Ângulo mín. em relação à mesa sem estruturas de suporte	45°	19° (C ≤ 1 mm)	-	Sempre	-	45°
 Relevos e rebaixos mín. (mm)	0,6 (L) x 2 (A)	0,4 (L x A)	1 (L x A)	0,5 (L x A)	0,5 (L x A)	0,1 (L x A)
 "Pontes" horizontais máx. sem estruturas de suporte (mm)	10	Não	-	Não	-	2
 Ø mín. de furos (mm)	2	0,5	1,5	0,5	1,5	1,5
 Folga mín. entre peças conectadas / com movimento (mm)	0,5	0,5	0,1 / 0,3	0,2	Não	Não
 Ø mín. de furos de escape para material (mm)	-	4	5	-	5	5
 Tamanho mín. de geometria (mm)	2	0,2	0,8	0,5	2	0,6
 Ø mín. de pinos (mm)	3	0,5	0,8	0,5	2	1

Fonte: Adaptado de Redwood et al (2018).

2.2.1 Otimização topológica

A otimização topológica é uma metodologia numérica empregada para esculpir a distribuição mais adequada de material de uma estrutura dentro de um espaço determinado (design space), submetido a um conjunto de cargas e condições de contorno. O procedimento combina o método de elementos finitos com fórmulas matemáticas de otimização, com intuito de proporcionar a melhor distribuição de material do espaço fixo de projeto (VIRTUALCAE, 2019). A otimização topológica vem demonstrando potencial crescente para aplicações decorrentes da maior liberdade de design oferecida pela AM, pois ao final da otimização, muitas vezes é obtida uma geometria inviável para fabricação por processos tradicionais de produção (VOLPATO, 2017).

Como citado por Redwood et al (2018), os seguintes dados são necessários para a realização de uma otimização topológica:

- Design pré-existente, já que massa só poderá ser removida se o usuário elaborar um modelo 3D para tal.
- Cargas e restrições, como as forças atuantes e suas direções, fixação da peça, material, etc.
- Restrições para a otimização, como limitações de espessuras, ângulos para evitar suportes na impressão, etc.
- Objetivo da otimização, que pode ser definido como um certo percentual de redução da massa.

De maneira simplificada, Abbey (2019) informa que a primeira etapa do processo consiste na elaboração de uma malha de elementos finitos sobre o modelo 3D que está sendo estudado. Em seguida, uma análise da distribuição das tensões é executada para avaliar as regiões que estão sendo eficientemente solicitadas. A partir desta análise, o software realiza diversas iterações eliminando o volume desnecessário do design space fornecido pelo usuário, resultando em uma geometria otimizada para os parâmetros especificados. Altair, Paramatters, Ansys, Autodesk, entre outros, são exemplos de companhias que oferecem soluções comerciais para otimização topológica (MIT, 2019).

2.2.1.1 Elementos finitos

Filho (2002) alega que, ao contrário de estruturas com geometria, carregamento e condições de contorno simples, onde uma solução analítica e exata é possível, estruturas complexas necessitam ser analisadas por meio de soluções aproximadas. Para tal, pode ser empregado o método dos elementos finitos.

A ideia básica do método dos elementos finitos é dividir o corpo em elementos conectados por nós, criando uma malha de elementos finitos. Para obter uma solução razoavelmente exata, milhares de nós são costumeiramente necessários, assim os computadores são essenciais para resolver essas equações. Geralmente, a exatidão da solução melhora com o aumento do número de elementos (e nós), mas o tempo computacional e, em consequência o custo, também aumentam. Nastran, Ansys e Abaqus são exemplos de softwares disponíveis no mercado para cálculos por elementos finitos (FISH E BELYTCHKO, 2009).

Chandrupatla e Belegundu (2012) relatam que para uma análise linear dentro do limite elástico do material, a relação entre a tensão e a deformação são regidas pela Lei de Hooke. Para materiais isotrópicos, as propriedades necessárias para a realização de uma análise por elementos finitos são o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Como critério de falha, von Mises é utilizado para materiais dúcteis, onde para que não ocorra falha, as tensões de von Mises devem ser inferiores à tensão de escoamento do material.

2.2.2 Estruturas celulares

As estruturas celulares são elementos de engenharia ou de arquitetura que auxiliam a otimizar projetos impressos em 3D (SCULPTEO, 2019). Volpato (2017) explica que a utilização de estruturas celulares podem incluir formas geométricas periódicas ou não, oferecendo alta resistência combinada com redução de massa. Além disso, pode também proporcionar características positivas em termos de absorção de energia de maneira controlada, isolamento térmico e acústico, filtragem, ou mesmo facilitar processos biológicos, como a osteointegração de componentes protéticos. Na Figura 13 a seguir, são visualizados exemplos de estruturas celulares impressas em metal.

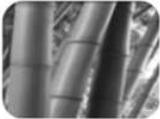
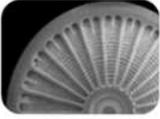
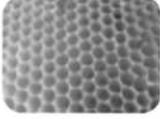
Figura 13 - Exemplos de estruturas celulares fabricadas por AM em metal



Fonte: Sculpteo (2019).

Como lembrado por Zhao et al (2010), após bilhões de anos de evolução, as estruturas de organismos vivos desenvolveram propriedades notáveis que servem como valiosa fonte de inspiração para a inovação e o desenvolvimento técnico da humanidade. Estas estruturas celulares baseadas na biônica, oferecem uma ampla gama de possíveis otimizações visando a economia de recursos para projetos mecânicos. A Figura 14 apresenta algumas estruturas existentes na natureza com suas propriedades e aplicações para engenharia.

Figura 14 - Exemplos de estruturas celulares biônicas, propriedades e aplicações

estrutura	propriedades	aplicações	
bamboo	resistência à flexão e torção	vigas, barras e eixos	
ruibarbo	resistência à flexão	vigas e barras	
diatomácea	resistência à pressão	estruturas de superfície	
colmeia	resistência à pressão	estruturas sanduíche e amortecedores	

Fonte: Adaptado de Emmelmann et al (2011).

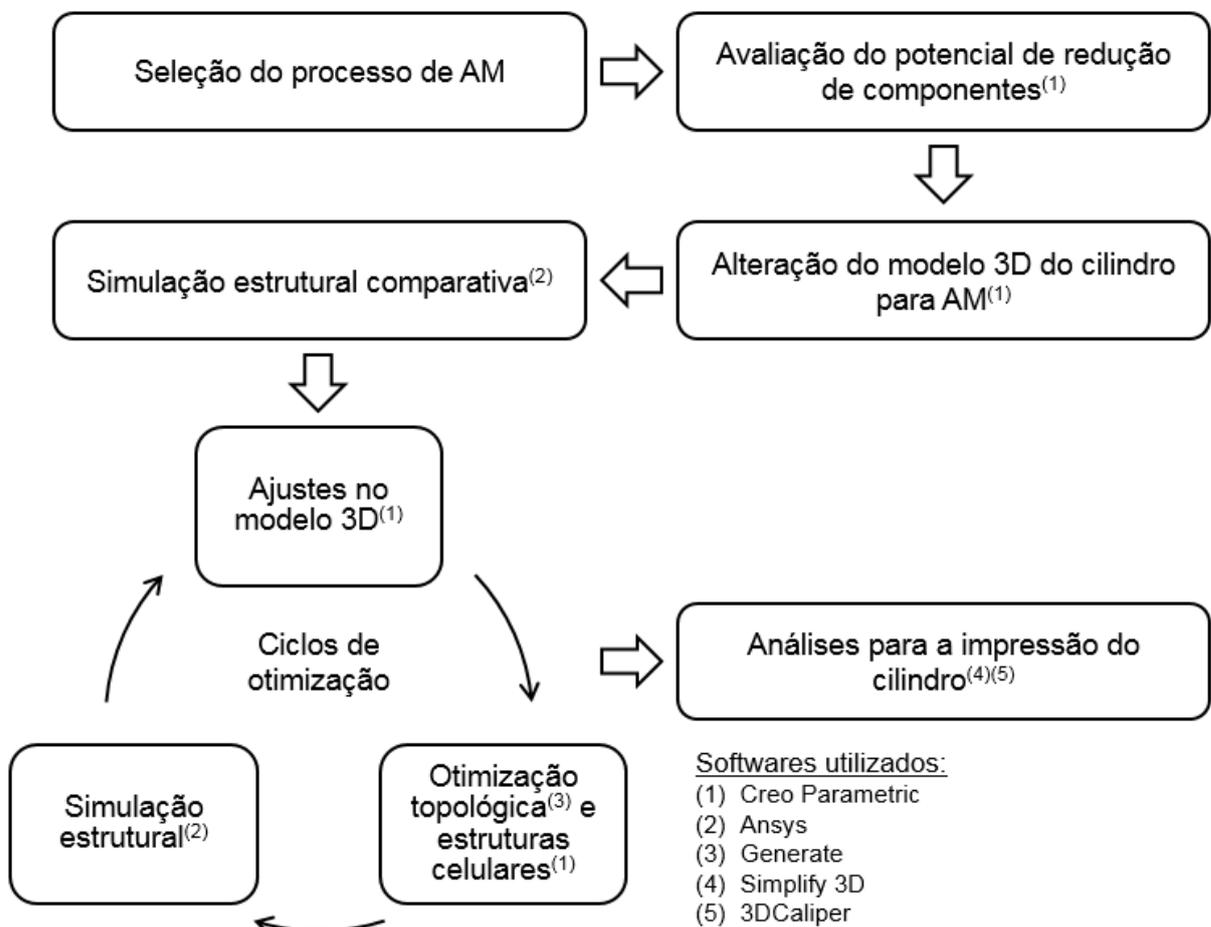
Devido à complexidade das estruturas celulares, estas podem ser mais facilmente produzidas via manufatura aditiva. Cada tecnologia AM possui vantagens e limitações na confecção de materiais celulares. A necessidade ou não do uso de estruturas de suporte, assim como a dificuldade de retirada de material não processado no interior das estruturas (na etapa de pós-processamento) são importantes para estabelecer a tecnologia a ser empregada (VOLPATO, 2017).

MIT (2019) esclarece que tecnologias AM baseadas na varredura de um feixe de laser, como SLM, SLS e SLA, ou feixe de elétrons como o EBM, são capazes de gerar células de alta resolução, assim como processos onde as camadas são curadas por projeção de imagens, como DLP e CLIP. No entanto, métodos como o FFF não formam boas estruturas por causa da fraca adesão entre camadas e da dificuldade em depositar o material de forma precisa para formar, por exemplo, pequenas barras inclinadas (treliças). Adicionalmente, estruturas celulares podem ser fabricadas sem restrições de orientação através de jateamento de material, desde que suportes sejam incluídos. No caso do jateamento de aglutinante (e também do SLS), o próprio pó serve como suporte, que precisa ser removido da peça final.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de adaptar a geometria de um cilindro de motor dois tempos, utilizado em uma roçadeira disponível no mercado e atualmente fabricado por fundição em alumínio para AM, foram definidas as etapas demonstradas na Figura 15, inspiradas pelos princípios de DfAM. Cada etapa é melhor detalhada nas seções seguintes.

Figura 15 - Fluxo definido para a adaptação de um cilindro fundido para AM



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 SELEÇÃO DO PROCESSO DE AM

Para a escolha do processo de manufatura aditiva substituto à fundição de alumínio, foram considerados os seguintes critérios:

- Possibilidade de trabalhar com a liga AlSi9Cu3, atualmente utilizada como matéria-prima do cilindro.
- Tolerâncias dimensionais atingíveis similares ou superiores à fundição.
- Propriedades mecânicas resultantes similares ou superiores à fundição.
- Capacidade de gerar geometrias similares ou mais complexas que na fundição.

Com base nestes critérios, o processo escolhido foi o SLM, uma tecnologia do tipo PBF. Portanto, as atividades descritas nas etapas posteriores foram realizadas tendo em vista as características do processo SLM e a utilização do material AlSi9Cu3.

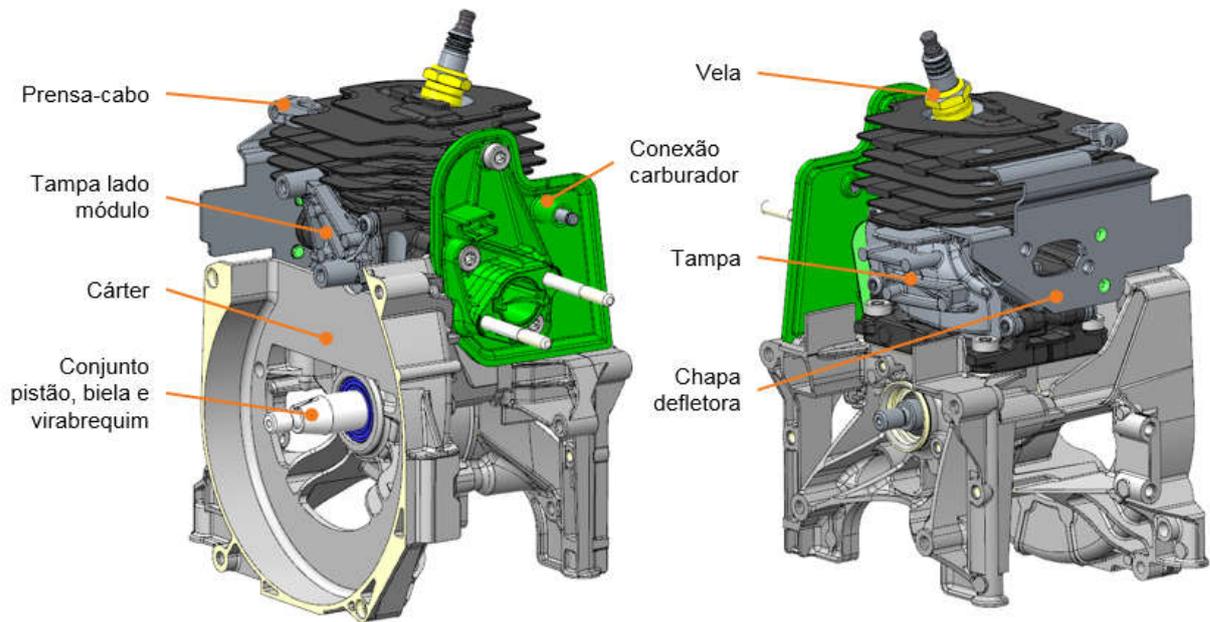
3.2 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REDUÇÃO DE COMPONENTES

Levando em conta a situação ideal defendida por Boothroyd et al (2011) onde todas as peças de uma montagem são combinadas em um único componente, com exceção daquelas onde algum dos critérios abaixo (não aplicáveis para elementos de fixação como parafusos, que devem sempre ser considerados como candidatos à eliminação) for atendido, foi avaliada a possibilidade da extinção de componentes do motor próximos ao cilindro através da integração destas peças à própria geometria do cilindro:

- Durante a operação do produto, a peça se movimenta em relação as demais.
- A peça deve ser de material diferente, ou precisa estar isolada por questões relativas à vibração, eletricidade, etc.
- A peça deve ser separada para permitir a montagem de outras peças ou a desmontagem.

A análise foi realizada através do software de CAD 3D Creo Parametric, de onde os dados dos componentes de interesse do motor da roçadeira, ou seja, aqueles em contato com o cilindro, foram extraídos. A Figura 16 demonstra os componentes considerados, com suas respectivas avaliações na Tabela 4.

Figura 16 - Componentes em contato com o cilindro considerados para integração



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 - Análise dos critérios de integração de peças do motor ao cilindro

Descrição	Possui movimento?	Material deve ser diferente ou é isolado?	Impediria montagem ou desmontagem?
Tampa	N	N	N
Tampa lado módulo	N	N	N
Prensa-cabo	N	S	S
Vela	N	S	S
Conexão carburador	N	N	S
Chapa defletora	N	N	S
Cárter	N	N	S
Pistão, biela e virabrequim	S	S	S

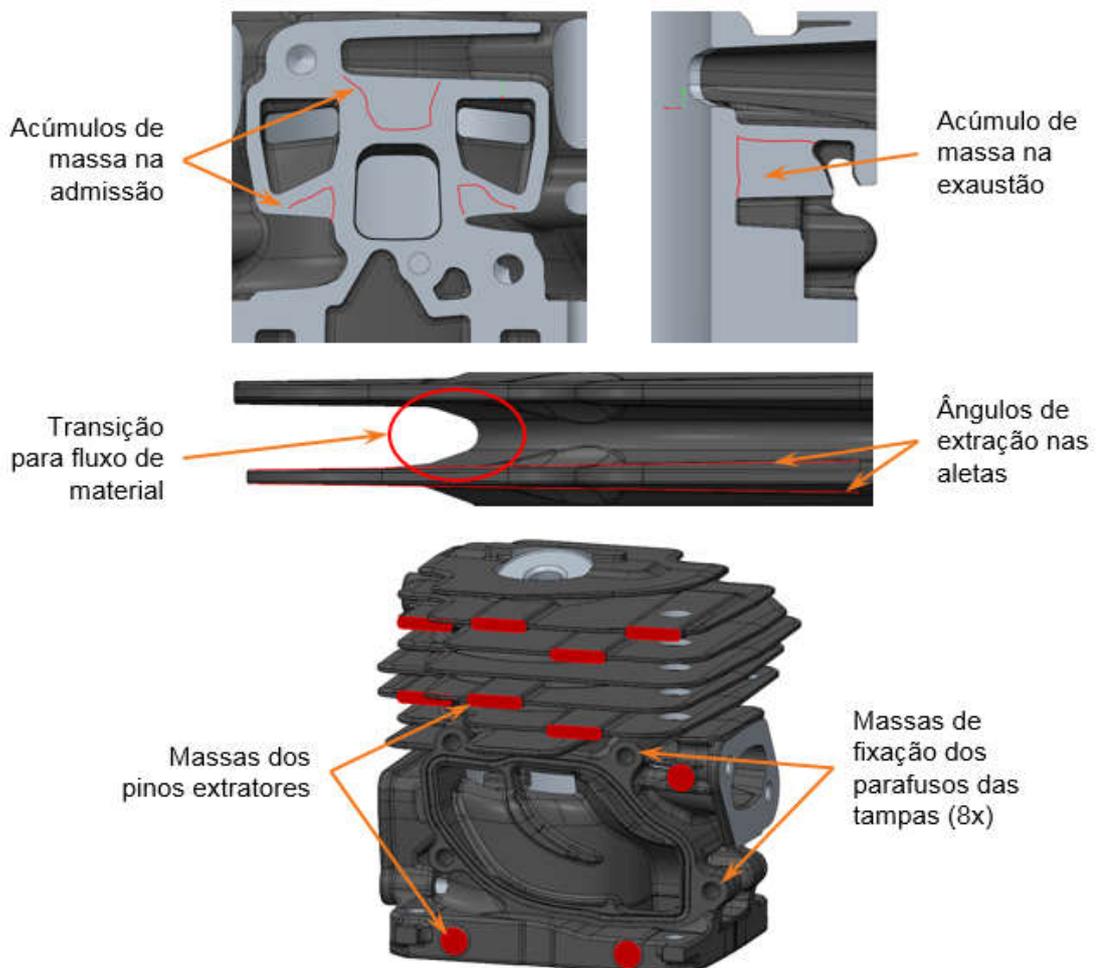
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 ALTERAÇÃO DO MODELO 3D DO CILINDRO PARA AM

Com a utilização do Creo Parametric, o modelo 3D original do cilindro foi modificado para abranger a integração das duas tampas conforme indicado na Tabela 4. Ademais, as restrições geométricas impostas pelas limitações da fundição foram identificadas e posteriormente extinguidas no CAD.

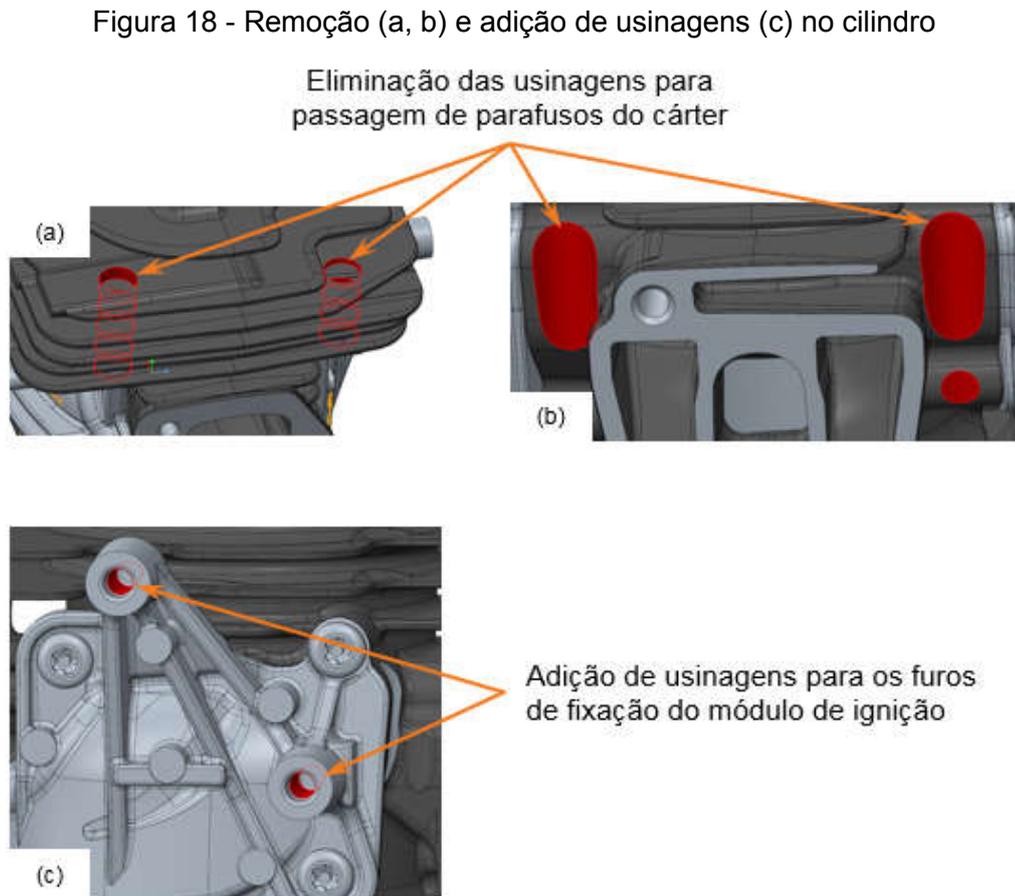
As observações de Lesko (2012) quanto às necessidades específicas de um design para fundição, como a inclusão de ângulos de extração, transições suaves para auxiliar o fluxo de material, planejamento das linhas de partição na peça, etc., foram apreciadas como forma de distinguir as geometrias no cilindro que não são necessárias para o SLM. A Figura 17 ilustra os principais pontos identificados como potenciais para redução de massa do cilindro através da eliminação das restrições da fundição.

Figura 17 - Potenciais significativos de redução de massa no cilindro



Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelamento das características usinadas também foi avaliado devido às adaptações para o processo SLM. A Figura 18 indica as operações de usinagens cotadas para serem eliminadas e as geometrias fundidas apontadas como usinagens para o novo cilindro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 SIMULAÇÃO ESTRUTURAL COMPARATIVA

De posse do modelo 3D do cilindro original e do arquivo modificado para SLM, simulações estruturais estáticas foram rodadas com o software de análise de elementos finitos Ansys para comparar as tensões de von Mises em ambas as geometrias. Para tal, a metodologia descrita em Posser e Oliveira (2019) foi replicada.

A configuração da simulação, visualizada na Figura 19, consistiu na fixação do cilindro pelos quatro furos do flange de conexão com o cárter e em seguida, uma pressão foi aplicada na câmara de combustão para atuar como as solicitações que

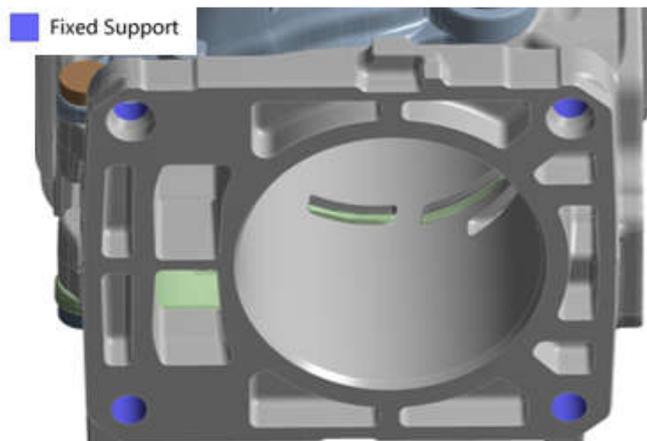
ocorrem durante o ciclo de compressão do motor. A carga adotada foi de 2 MPa, sendo atribuída de forma arbitrária para efeito de comparação entre o percentual de tensões das duas geometrias diferentes.

Na sequência, uma malha tetraédrica de segunda ordem com 3 mm foi gerada sobre todo o cilindro e refinada nas regiões de interesse para 0,3 mm. Como regiões de interesse, foram consideradas as superfícies do flange do cárter próximas aos furos e também de transição entre o flange e o diâmetro externo do cilindro. A Figura 20 exibe a aparência da malha definida e as regiões de interesse refinadas.

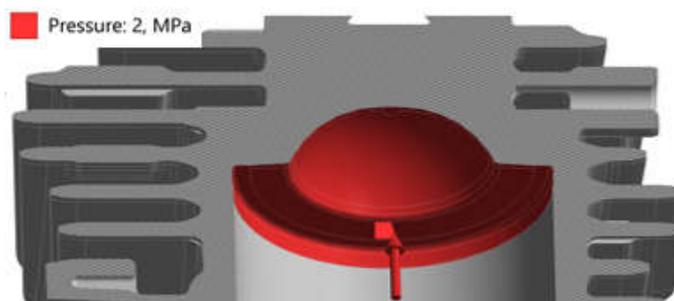
Como o cilindro original possui tampas aparafusadas que formam os dutos de transferência, a configuração da simulação passou por etapas extras de ajuste de contatos e de carga de aperto nos parafusos. Assim, foram especificados contatos de fricção entre as tampas e o cilindro e aplicada carga sobre cada parafuso, como realizado pelo fabricante durante o desenvolvimento do componente para o mercado. Para o modelo 3D do cilindro SLM, estas etapas não foram necessárias, já que as tampas foram integradas e os parafusos eliminados.

Figura 19 - Configuração da simulação no Ansys

Fixação nos furos do flange do cárter:

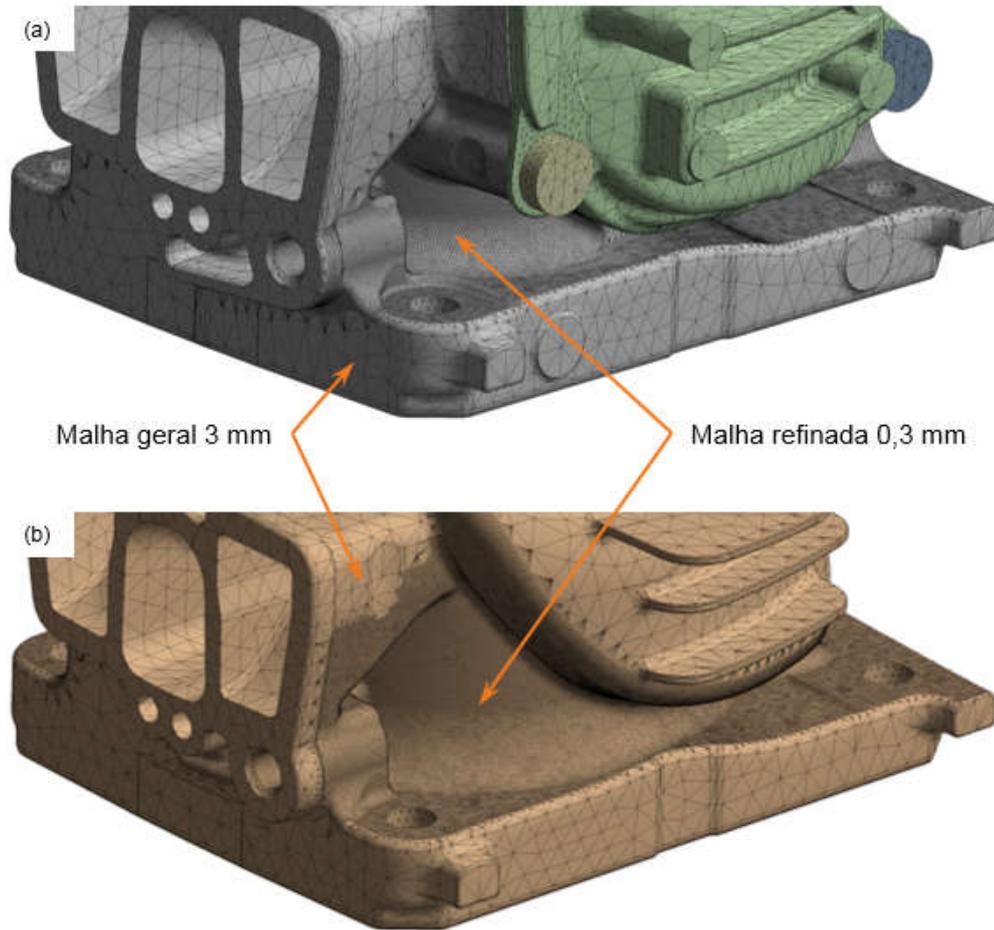


Pressão na câmara de combustão:



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Malha no cilindro original (a) e SLM (b)



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 CICLOS DE OTIMIZAÇÃO

Baseados nos resultados da simulação comparativa, ajustes para adequar as tensões de von Mises no flange do cárter do cilindro SLM com o original foram realizados. Depois, alívios de massa extras foram adicionados em regiões pouco solicitadas, ou seja, com tensões significativamente menores que as demais. Ciclos de simulações foram executados para validar estas alterações, que incluíram versões com a inserção de estruturas celulares para reforço de baixo peso e alto-suportado, similar ao efetuado em Posser e Oliveira (2019), com células cúbicas de 4 mm e barras angulares $\varnothing 1,5$ mm.

Para o topo do cilindro, foi percebida a possibilidade de implementação de otimização topológica para reforçar de forma adequada a região. Assim, as diferentes versões de modelos 3D gerados foram classificadas da seguinte forma:

- Original: Modelo 3D do cilindro atualmente em produção e fabricado por fundição.
- AM_V1: Modelo 3D alterado para SLM, sem as restrições da fundição e com a integração dos componentes pertinentes.
- AM_V2: Modelo AM_V1 com alívios de massa extras no flange do cárter.
- AM_V3: Modelo AM_V2 com ajustes no flange do cárter para nivelamento das tensões de von Mises com o original.
- AM_V4: Modelo AM_V3 com o topo dimensionado através de otimização topológica.

As versões AM_V1 e AM_V2 foram elaboradas com foco no aproveitamento da liberdade de design do processo SLM para reduzir massa do cilindro, sendo a versão AM_V1 correspondente ao arquivo utilizado para a primeira simulação estrutural comparativa descrita na seção anterior, confrontada com a versão Original. Já as versões AM_V3 e AM_V4, foram criadas com o propósito de ajustar a resistência mecânica da peça após as reduções de massa efetuadas.

3.5.1 Otimização topológica do cilindro

No topo do componente, onde um cilindro hidráulico exerce pressão de fixação para contrapor as forças de usinagem nas operações de pós-processamento, otimização topológica com o software Generate foi realizada a fim de dimensionar corretamente o novo modelo. A Figura 21 revela a maneira como os cilindros são fixados durante as operações de usinagens necessárias para alcançar os requisitos dimensionais e de acabamento do produto.

Durante a operação, o cilindro hidráulico exerce uma pressão de 260 bar sobre duas peças ao mesmo tempo, com êmbolo Ø25 mm e haste Ø20 mm. Desta forma, partindo da equação básica que relaciona a pressão (P) com uma força (F) aplicada sobre uma área (A), como em Parr (2011), temos:

$$P = \frac{F}{A}$$

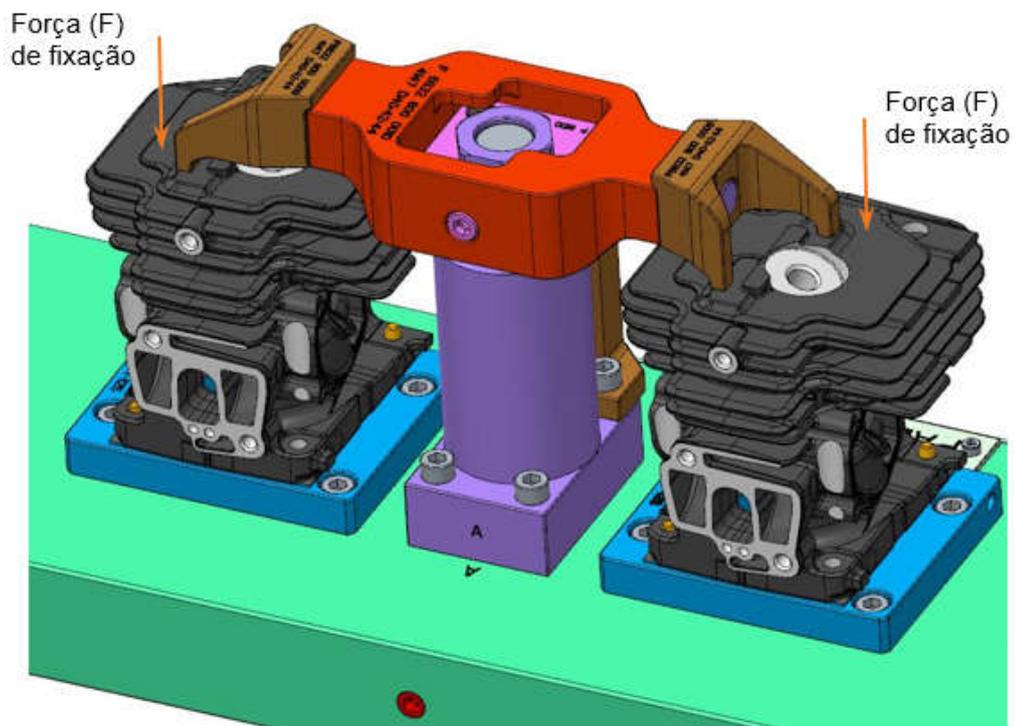
Onde:

$$F = \frac{P(A_{\text{embolo}} - A_{\text{haste}})}{2}$$

Resultando em uma força de fixação sobre cada peça de:

$$F = \frac{26(\pi 12,5^2 - \pi 10^2)}{2} = 2297 \text{ N}$$

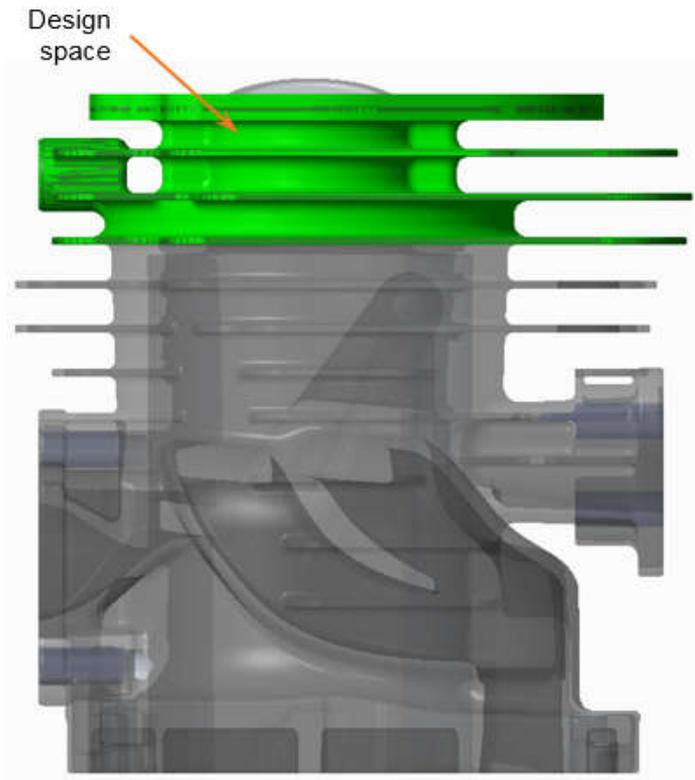
Figura 21 - Dispositivo de fixação para usinagem dos cilindros



Fonte: Elaborado pelo autor.

O design space, ou seja, o volume destinado para remoção de material na otimização topológica, foi definido em altura como a região que compreende as quatro aletas superiores do cilindro e em largura e comprimento pelas massas existentes na peça fundida, com o cuidado de manter a área para passagem de ar entre as aletas similar à original. Este volume de material, visto na Figura 22, foi modelado no Creo Parametric e gravado no formato de arquivo STEP, para posterior importação no Generate.

Figura 22 - Design space para otimização topológica



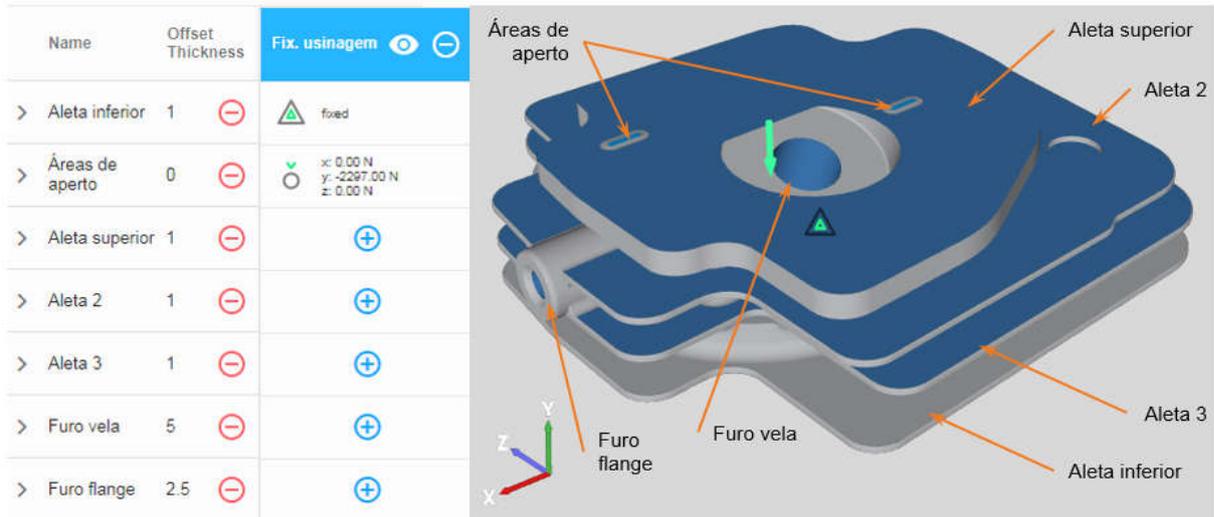
Fonte: Elaborado pelo autor.

A otimização topológica foi configurada no Generate fixando o modelo 3D (design space) pela superfície inferior e aplicando a força calculada de 2297 N sobre as duas áreas de aperto do dispositivo de usinagem. Como restrição à eliminação de material no volume modelado, foi especificado um offset de 5 mm no furo da vela, 2,5 mm no furo do flange e 1 mm para as aletas. O material selecionado foi AlSi10Mg, já que a liga AlSi9Cu3 não estava disponível. A configuração da otimização pode ser analisada na Figura 23, onde um recorte das informações inseridas no Generate foi registrado.

Com os parâmetros configurados, foram rodados ciclos de otimização partindo de um alvo para o volume de material restante de 50% do inicial com resolução fina. O volume alvo foi ajustado a cada ciclo até que o limite mínimo de material atingível pelo software resultasse em uma tensão com fator de segurança entre 1,3 e 2 relativo à tensão de escoamento, faixa considerada adequada pelos critérios de Norton (2004) para matérias-primas dúcteis sob condições bem conhecidas. Os passos realizados estão presentes na Tabela 5, que indica quais os

volumes foram possíveis de serem calculados pelo Generate com suas respectivas tensões resultantes.

Figura 23 - Configuração da otimização topológica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Ciclos de otimização topológica

Volume alvo	Tensão máx. (MPa)
50%	77
25%	*
37,5%	*
44%	112

*Otimização não concluída pelo software

Fonte: Elaborado pelo autor.

A geometria gerada com 50% do volume inicial em resolução fina foi então exportada do Generate em formato STL e importada para o modelo 3D do cilindro no Creo Parametric, servindo como referência para a criação de reforços otimizados no topo da peça. O modelo 3D antes e depois da modificação foi simulado no Ansys com a força de 2297 N aplicada nas regiões de aperto do dispositivo de usinagem. Para isso, uma malha tetraédrica de segunda ordem com 3 mm foi gerada e refinada na rodada de simulação seguinte para 0,3 mm, nas regiões de maiores tensões de

von Mises, conforme visto na Figura 24. Para validação, as tensões da geometria antes e depois da otimização (com ciclos de ajustes do modelo 3D no Creo Parametric também incluídos) foram comparadas com a tensão de escoamento da liga AlSi9Cu3.

Figura 24 - Malha gerada para validação dos reforços no topo do cilindro



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 ANÁLISES PARA A IMPRESSÃO DO CILINDRO

Por indisponibilidade de software específico para a programação do processo SLM, as análises para a impressão do cilindro foram limitadas na avaliação da orientação e nas espessuras da peça tendo em mente as restrições do processo. A avaliação da orientação do cilindro seguiu o preceito de Posser e Oliveira (2019), onde o principal impedimento para a definição do posicionamento do componente na plataforma de construção da impressora foi a necessidade de evitar suportes nos dutos de transferência que seriam de difícil remoção. Para tanto, diferentes inclinações foram averiguadas no software Simplify 3D, onde a geração automática de suportes para ângulos menores que 45° em relação à plataforma, foi configurada para a observação da existência de materiais de apoio nos dutos de transferência.

No tocante às espessuras da peça, Creo Parametric com o plug-in 3DCaliper foi utilizado para uma verificação geral das paredes modeladas. O tipo de análise selecionada no software foi a denominada *thin walls* (paredes finas), para uma faixa de espessura entre 0 e 3 mm e o tamanho de malha escolhido foi 0,5 mm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DISCUSSÕES SOBRE A ESCOLHA DO PROCESSO DE AM

Com o intuito de manter a matéria-prima original do cilindro, a liga de alumínio AlSi9Cu3, evitando assim avaliações de produto fora do escopo deste trabalho, o processo de manufatura aditiva escolhido foi o SLM, pois Buchbinder (2010) indica que esta é uma liga comumente utilizada para fundição e ao mesmo tempo empregada para a fabricação de componentes via SLM com propriedades mecânicas comparáveis e até superiores às indicadas na norma DIN EN 1706 (composição química e propriedades mecânicas de ligas de alumínio para fundição). De fato, quando as tensões de escoamento de outros materiais como a da liga Ti6Al4V e AlSi10Mg são também comparadas entre fundição e AM, comportamentos similares são percebidos, conforme registrado no Gráfico 1.

Outro ponto favorável ao processo SLM é seu potencial de gerar geometrias consideravelmente mais complexas do que a fundição, característica esta grifada em *cases* de grandes companhias como BMW, Airbus e Boeing (MIT, 2019), bem como sua capacidade de trabalhar com paredes finas, apontada na Tabela 3. O sucesso de alguns componentes utilizados em aeronaves e automóveis fabricados via SLM serve como indicativo dos potenciais do processo, tanto no quesito de forma geométrica quanto em propriedades mecânicas concebíveis. Além disso, a impressão de um cilindro dois tempos através de SLM foi realizada no estudo de Posser e Oliveira (2019), atestando a capacidade da tecnologia para tal.

Por fim, quando comparamos as tolerâncias de processo entre fundição e AM disponíveis na Tabela 2, bem como o tamanho da peça que geralmente pode ser impressa por cada processo de AM (Tabela 1) com as dimensões do cilindro, o processo SLM confirma ser adequado. Já quando os requisitos de material da peça (AlSi9Cu3), tolerâncias, design e propriedades mecânicas são avaliados como um todo, o SLM (e seus análogos como o DMLS) destaca-se como o processo de AM mais indicado dentre as possibilidades atuais.

4.2 IMPACTOS DA ELIMINAÇÃO DAS RESTRIÇÕES DA FUNDIÇÃO

As restrições impostas pelo ferramental de fundição impelem ao design original do cilindro a necessidade da divisão do componente em três peças, além da inclusão de oito parafusos de fixação. Caso contrário, não seria possível a fabricação do cilindro pelo processo de fundição sob pressão, pois as geometrias complexas dos dutos de transferência não poderiam ser extraídas do molde metálico. Por este motivo, duas tampas, uma para cada duto de transferência, foram criadas para formar parte do duto, o qual é completamente formado quando a tampa é montada no cilindro, que possui a outra parte da geometria.

Utilizando os princípios de DfAM relativos à integração de componentes e aproveitamento da liberdade de design em conjunto com a metodologia de DfMA presente na Tabela 4, foi percebida e executada a integração da geometria das tampas ao corpo do cilindro, tal como a eliminação dos parafusos de fixação, como mostra a Figura 25. Esta medida, somada com a retirada dos requisitos da fundição, como ângulos de extração, pinos extratores e acúmulos de material devido ao sentido de fechamento do molde, vistos na Figura 17, trouxe uma redução de massa ao cilindro SLM de 29% em relação ao original fundido, descrita na Tabela 6.

A maior liberdade de design do processo SLM permitiu também que determinadas usinagens fossem eliminadas. Os dois furos nas aletas demonstrados na Figura 18a, que servem apenas como passagem dos parafusos de fixação do flange do cárter e portanto, não necessitam de grande precisão dimensional, foram deixados como parte da geometria originada diretamente pela impressão da peça metálica, ao passo que os dois alívios usinados da Figura 18b, desapareceram pela própria redução de material do novo cilindro. Entretanto, os dois furos de fixação do módulo de ignição (Figura 18c), passaram a ser usinados para garantia das tolerâncias do diâmetro de formação das roscas geradas durante o aparafusamento, tendo em vista que parafusos autoatarraxantes são utilizados.

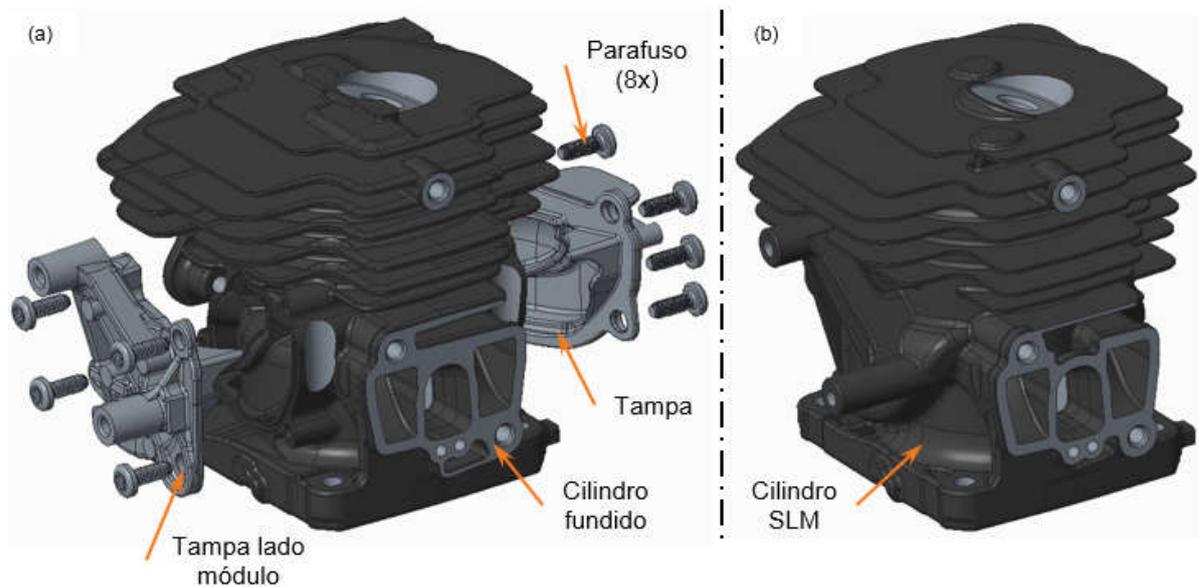
Ainda que não faça parte do escopo deste trabalho, vale ressaltar que a retirada de massa nas aletas e o aumento de fluxo de ar em regiões quentes, como o flange de exaustão e a câmara de combustão, pode melhorar a refrigeração do cilindro, segundo os fundamentos de Incropera e DeWitt (2003). A Figura 26 apresenta através da sobreposição dos modelos 3D, as regiões onde massas impedem a livre passagem de ar no cilindro fundido, o que não ocorre no SLM.

Tabela 6 - Massa do cilindro original fundido e alterado para SLM

	Massa cilindro (g)	Massa tampa lado módulo (g)	Massa tampa (g)	Massa parafuso (g) x 8	Massa total (g)
Fundição	461	39,8	31,4	12,8	545
SLM	386	-	-	-	386

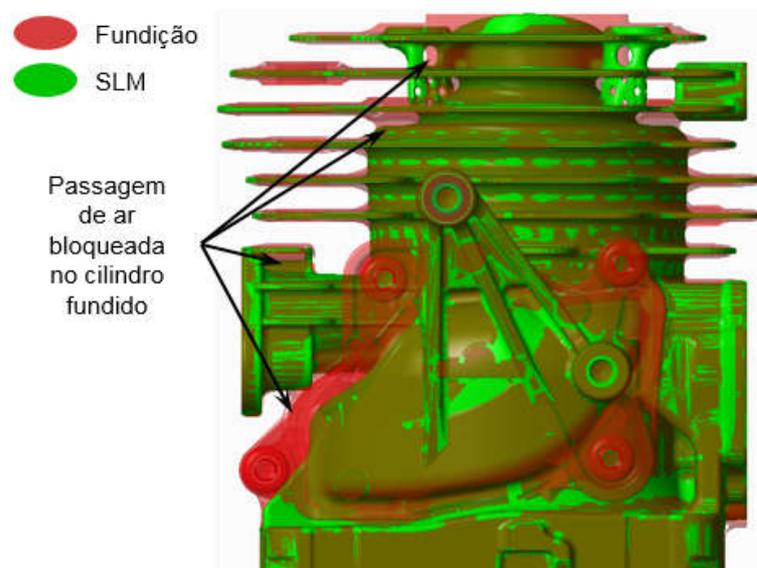
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 - Cilindro original e seus componentes (a) e cilindro SLM (b)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Sobreposição do cilindro fundido e SLM



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Resultados das simulações computacionais

As propriedades mecânicas de componentes fabricados via SLM podem variar de acordo com determinados parâmetros de processo adotados, como mostram os resultados de Buchbinder (2010) relativos à ligas de alumínio e o apanhado geral sobre manufatura aditiva de metais escrito por Debroy et al (2018). Propriedades dinâmicas como a resistência à fadiga podem variar também com o acabamento da superfície do produto (NORTON, 2004), que no caso do cilindro SLM, seria oriundo do processo de impressão e de etapas posteriores de pós-processamento.

A definição de parâmetros de processo para cilindros produzidos via SLM e a correlação com suas propriedades mecânicas necessitaria de ciclos de impressão e pós-processamento, somados com etapas de testes de validação, que inviabilizariam a execução deste trabalho dentro do prazo proposto. Com estas restrições em mente, as simulações computacionais realizadas no Ansys com os modelos 3D, tanto com o original quanto com as variantes para AM, foram feitas considerando as propriedades da liga fundida AISi9Cu3, que segundo a norma DIN EN 1706, possui tensão de escoamento de 140 MPa (DIN, 2010).

A avaliação da resistência do flange do cárter através de simulação estática é realizada como parte do ciclo de desenvolvimento do cilindro pela empresa que o produz, sendo uma etapa preliminar a outros testes de validação de produto. Para o cilindro SLM, procedimento similar ao original no que tange o setup da simulação, que inclui configurações de malha, parâmetros de material, etc., foi executado. O objetivo neste caso, foi garantir que as tensões resultantes de von Mises não ultrapassassem as existentes no modelo 3D da peça de fundição, servindo como indicador do sucesso da adaptação da geometria para AM. Esta metodologia comparativa é a mesma utilizada em Posser e Oliveira (2019), mas ajustada no presente trabalho para uma abordagem mais conservadora, uma vez que o limite de tensão máxima aqui admissível no flange do cárter do cilindro SLM, pelo critério de von Mises, não deve ultrapassar o valor original, eliminando a tolerância de $\pm 20\%$ permitida no citado artigo.

O primeiro ciclo de simulação foi efetuado no modelo 3D original da peça fundida, onde a tensão máxima no flange do cárter de 36 MPa foi calculada e definida como o limite máximo permitido para as variantes SLM. Esta tensão é

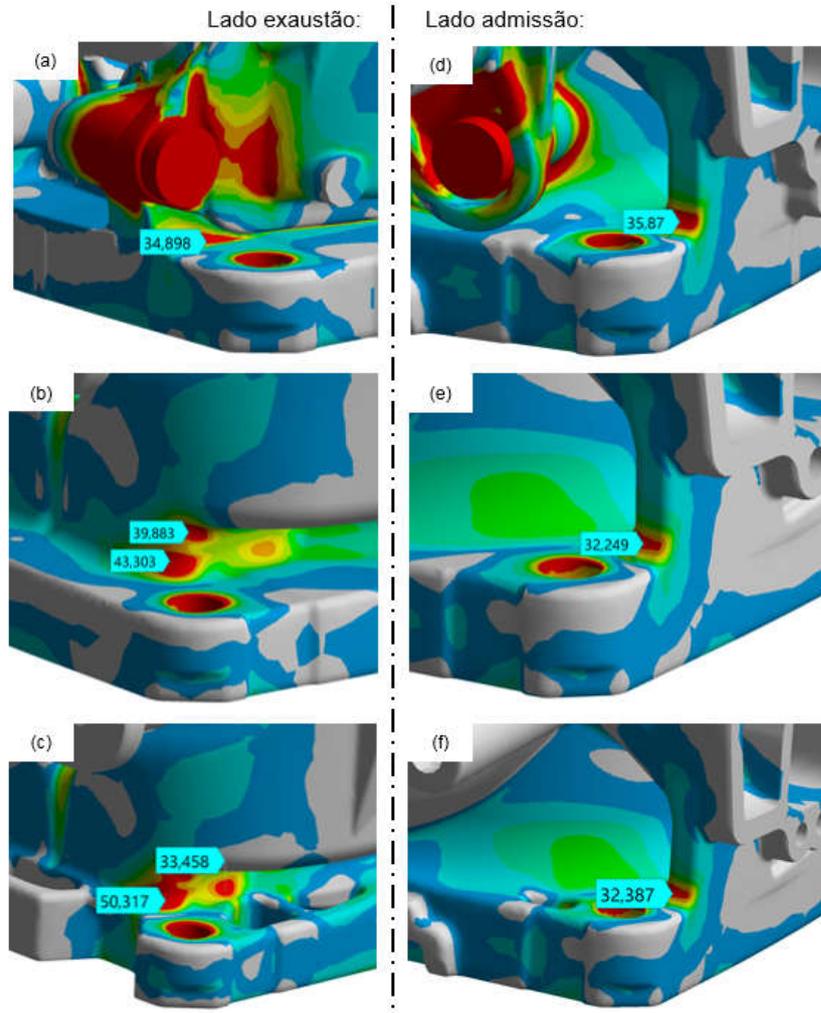
resultante da pressão arbitrária de 2 MPa aplicada sobre a câmara de combustão vista na Figura 19 e não corresponde à pressão real sob a qual a peça está submetida durante os ciclos de compressão do motor. Como a mesma pressão (2 MPa) foi aplicada para todas as variantes de modelos 3D verificadas, o valor da carga em si não é relevante quando o objetivo for avaliar de forma comparativa as tensões resultantes, posto que a solicitação considerada é estática e atua dentro do limite elástico do material, gerando resultados de comportamento linear (NORTON, 2004).

Definido o limite máximo de tensão permitida no flange do cárter, a primeira versão do modelo adaptado para SLM, denominada AM_V1, foi simulada e comparada com a original. Apesar de um aumento de tensão em um ponto crítico no lado da exaustão do cilindro ser percebido (de 35 para 43 MPa), alívios extras de massa no flange foram modelados para uma nova variante chamada de AM_V2, pois a geometria possuía pontos pouco solicitados que poderiam ser convertidos em redução de massa da peça. Os alívios extras acabaram por aumentar mais a tensão no ponto crítico do lado exaustão do flange, passando para 50 MPa.

Ao contrário do ocorrido no flange do cárter lado exaustão, no lado admissão houve redução da tensão resultante, o que pode ter sido causado pelo maior raio de ligação entre o flange e o corpo do cilindro, aplicado no local onde originalmente existia a geometria necessária para a montagem das tampas. O raio foi desenhado seguindo os conceitos de biônica de Mattheck (2003), baseado no formato natural da base do caule de árvores, que acaba por distribuir melhor as tensões ao longo da geometria e evita pontos de concentração. A Figura 27 demonstra as tensões resultantes encontradas no modelo original e nas duas primeiras versões modeladas para SLM, com os valores apontados no lado exaustão e admissão do flange do cárter.

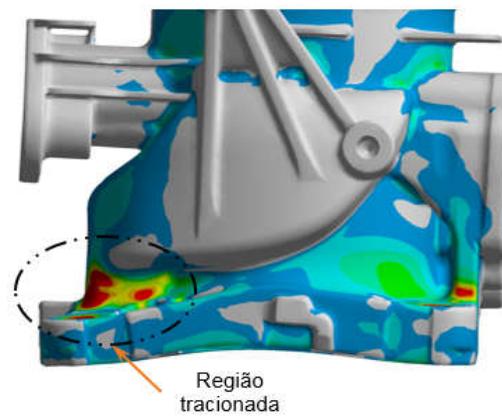
Com as tensões no flange do cárter lado admissão do cilindro SLM dentro dos níveis encontrados no original fundido, novas versões do modelo 3D foram criadas para reforçar o lado exaustão. Como pode ser notado na Figura 28, tensões trativas ocorrem na região próxima ao furo de fixação do flange quando a pressão na câmara de combustão é aplicada. A remoção das massas de fixação dos parafusos das tampas na versão AM_V1, somados com os alívios extras criados na versão AM_V2, diminuiu a resistência mecânica naquela área, deixando a geometria sem sustentação.

Figura 27 - Tensões no modelo 3D original (a, d), AM_V1 (b, e) e AM_V2 (c, f)



Fonte: Elaborado pelo autor.

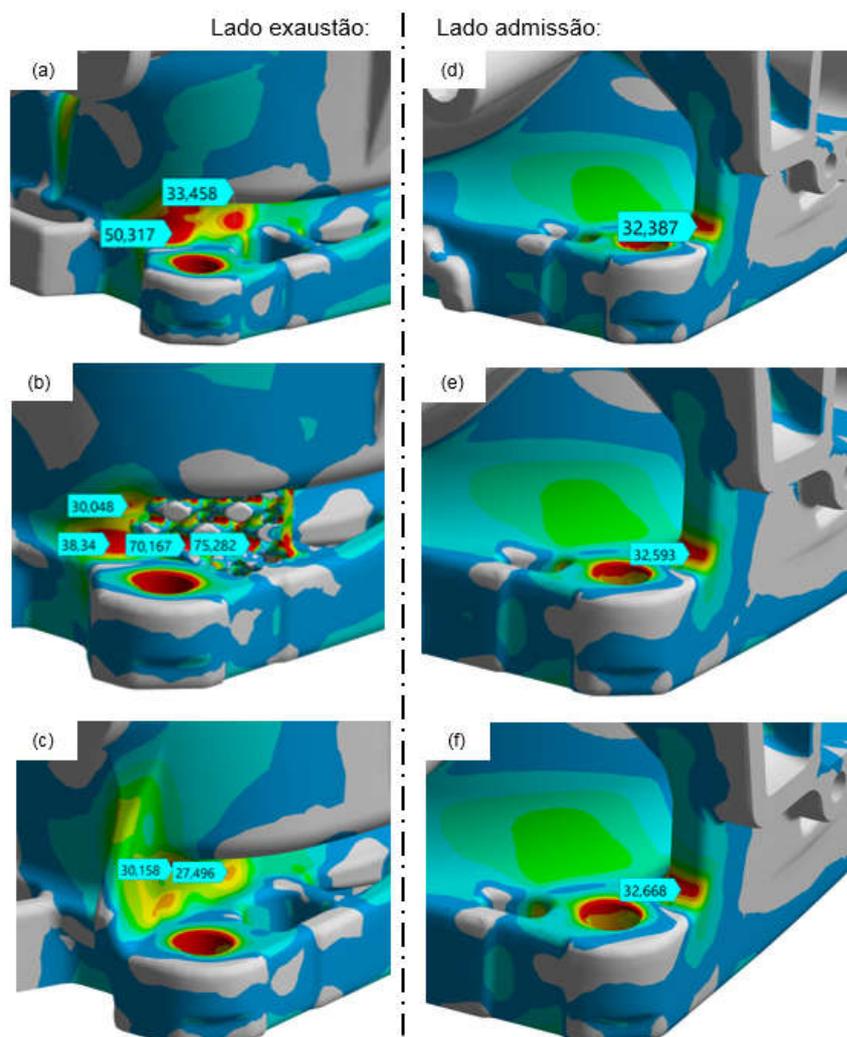
Figura 28 - Deformação (300x) no flange do cárter do modelo 3D AM_V2



Fonte: Elaborado pelo autor.

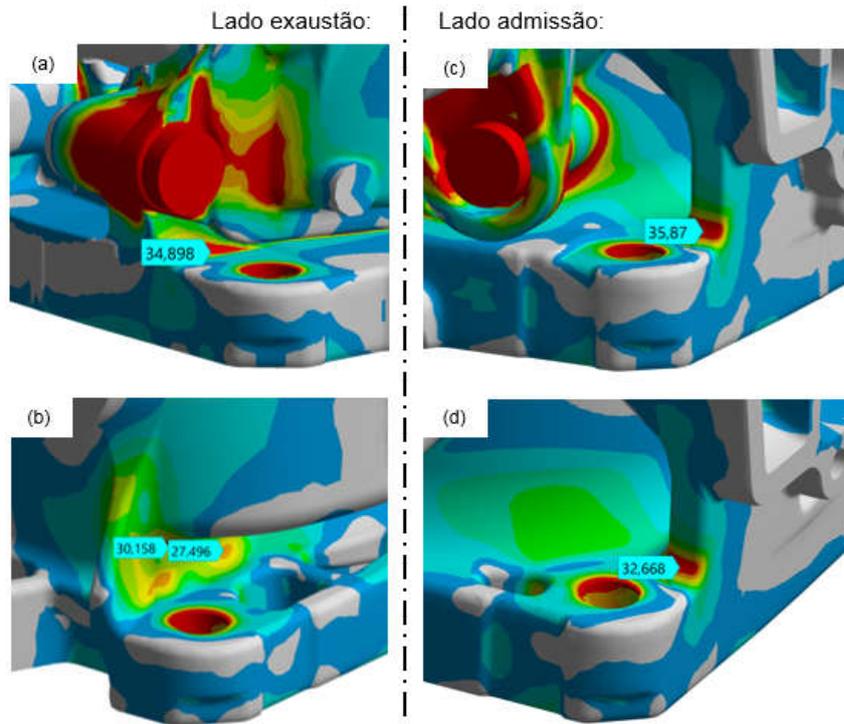
Objetivando diminuir as tensões no lado exaustão do cilindro SLM, o modelo 3D versão AM_V3a foi concebido com estruturas celulares para reforçar a região, reduzindo a tensão de 50 para 38 MPa. Porém, os valores encontrados em meio às próprias estruturas foram superiores, alcançando 75 MPa. Assim, a versão AM_V3b foi gerada, substituindo as estruturas por uma nervura de conexão entre a aresta próxima ao furo de fixação do flange e o corpo do cilindro, suavizada com um raio baseado na biônica de Mattheck (2003). Por meio desta abordagem, a tensão foi reduzida para 30 MPa, o que está abaixo do cilindro fundido. Os comparativos entre as versões do modelo 3D SLM com e sem reforços na exaustão são retratados na Figura 29, enquanto a Figura 30 compara a versão final do flange SLM (AM_V3b) com a original e o Gráfico 2 traz um apanhado geral entre todos os modelos.

Figura 29 - Tensões no modelo 3D AM_V2 (a, d), AM_V3a (b, e) e AM_V3b (c, f)



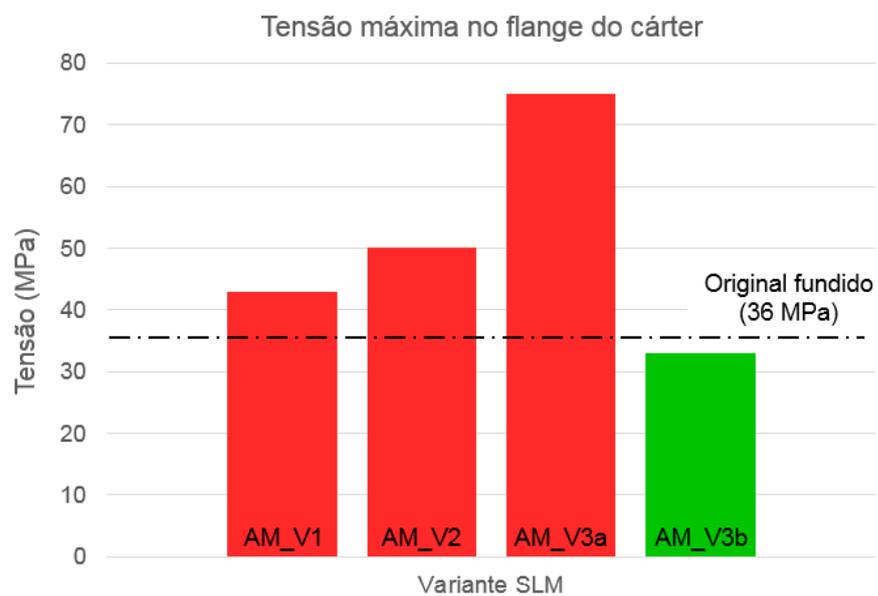
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Tensões no modelo 3D original (a, c) e AM_V3b (b, d)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 - Tensão máxima no flange do cárter para cada variante de modelo 3D

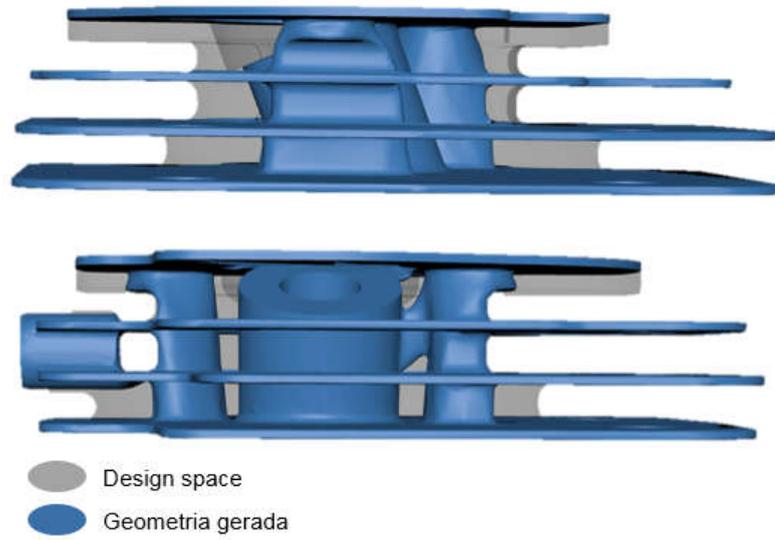


Fonte: Elaborado pelo autor.

Além do impacto no flange do cárter, a retirada das restrições da fundição no modelo do cilindro SLM acarretou em uma diminuição de material no topo da peça. Como o componente deve passar por diversas etapas de pós-processamento, incluindo usinagens onde um cilindro hidráulico exerce pressão significativa sobre o topo para contrapor as forças da operação, otimização topológica com o software Generate foi realizada a fim de dimensionar corretamente o novo modelo. A liga de alumínio AISi10Mg, que possui tensão de escoamento igual à da liga AISi9Cu3 (DIN, 2010), foi selecionada como o material para a otimização, pois não havia opção para escolha de outra liga de alumínio e nem de customização das propriedades. Para este fato, não foi dada maior importância, já que a geometria gerada no Generate seria remodelada no Creo Parametric e validada no Ansys utilizando o material correto. Para a validação, foi definida uma tensão admissível de 108 MPa, derivada da tensão de escoamento da liga AISi9Cu3 (140 MPa) com coeficiente de segurança de 1,3.

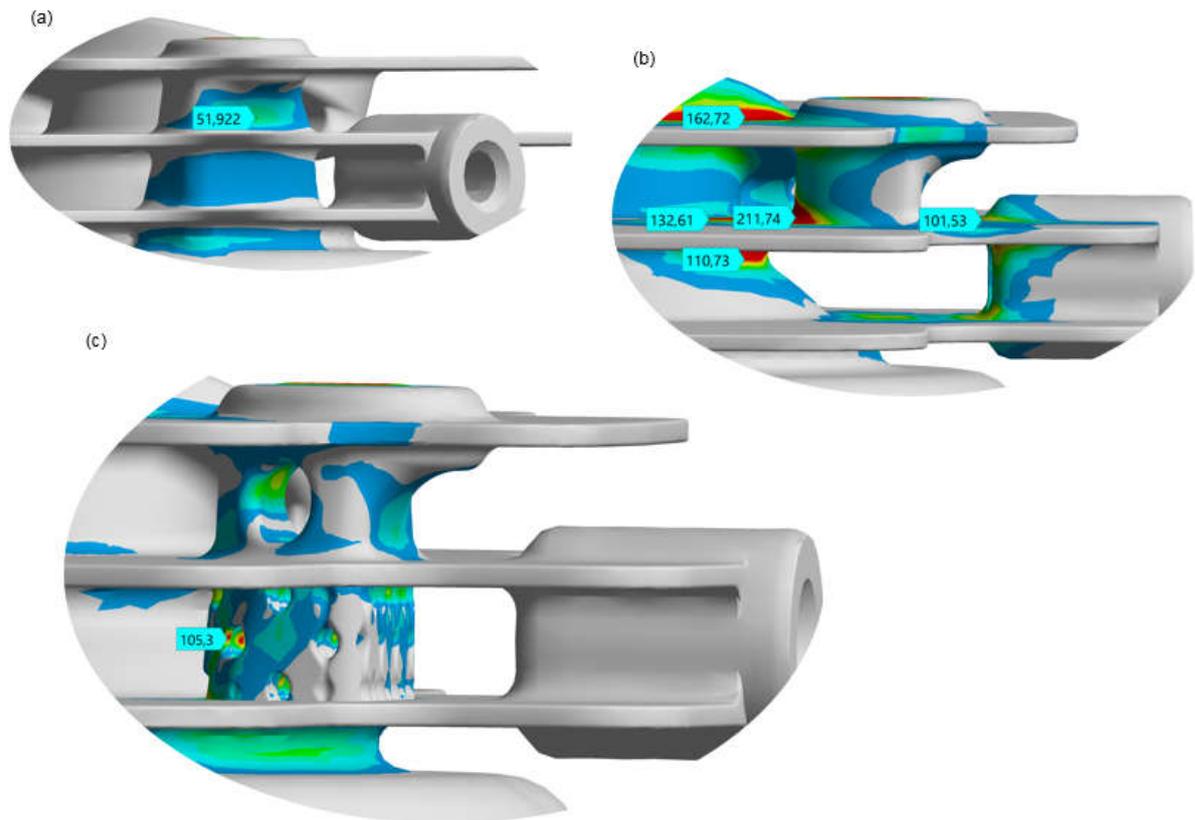
Concluída a otimização topológica, representada na Figura 31, a geometria exportada do Generate no formato STL e importada para o Creo Parametric foi remodelada sobre a versão do cilindro SLM AM_V3b, criando a variante AM_V4a. O resultado da simulação encontrou uma tensão máxima na região avaliada de apenas 52 MPa (menos da metade da tensão admissível), com boa parte da geometria modelada para reforço do topo do cilindro sendo pouco solicitada. Por conseguinte, a versão AM_V4b, com massa mantida apenas entre a primeira e segunda aletas, foi criada e simulada no Ansys, mostrando tensões acima do limite definido. Desta forma, uma nova versão foi necessária, batizada como AM_V4c, onde estruturas celulares foram aplicadas entre a segunda e terceira aletas para dar sustentação à massa entre as aletas superiores, porém com menor densidade e com passagens de ar que em teoria, podem auxiliar no resfriamento do cilindro. Da mesma maneira, um furo com formato elíptico foi desenhado entre a massa da primeira e segunda aletas para diminuir a densidade em um volume com pouca solicitação de tensões. Essas ações foram efetivas em manter as tensões dentro do limite admissível e ao mesmo tempo reduzir a massa da versão inicial, como apresentado na Figura 32 e compilado no Gráfico 3.

Figura 31 - Resultado da otimização topológica no Generate



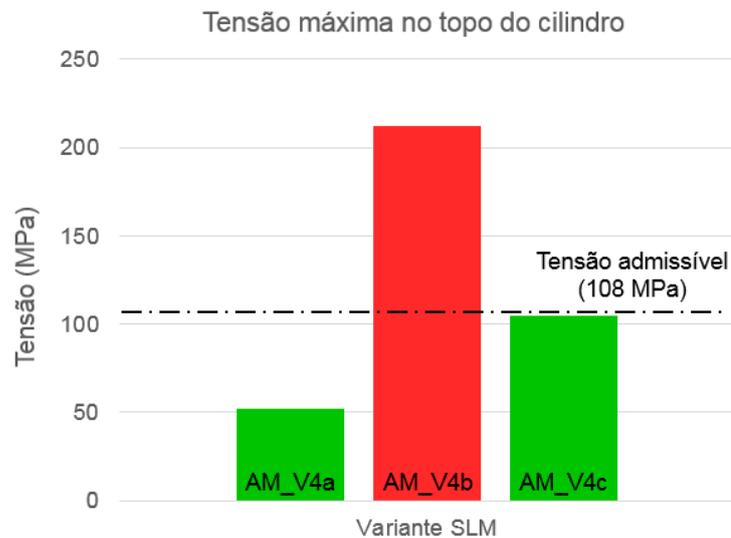
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 - Geometria AM_V4 inicial (a), intermediária (b) e final (c)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 - Tensão máxima no topo do cilindro para cada variante de modelo 3D



Fonte: Elaborado pelo autor.

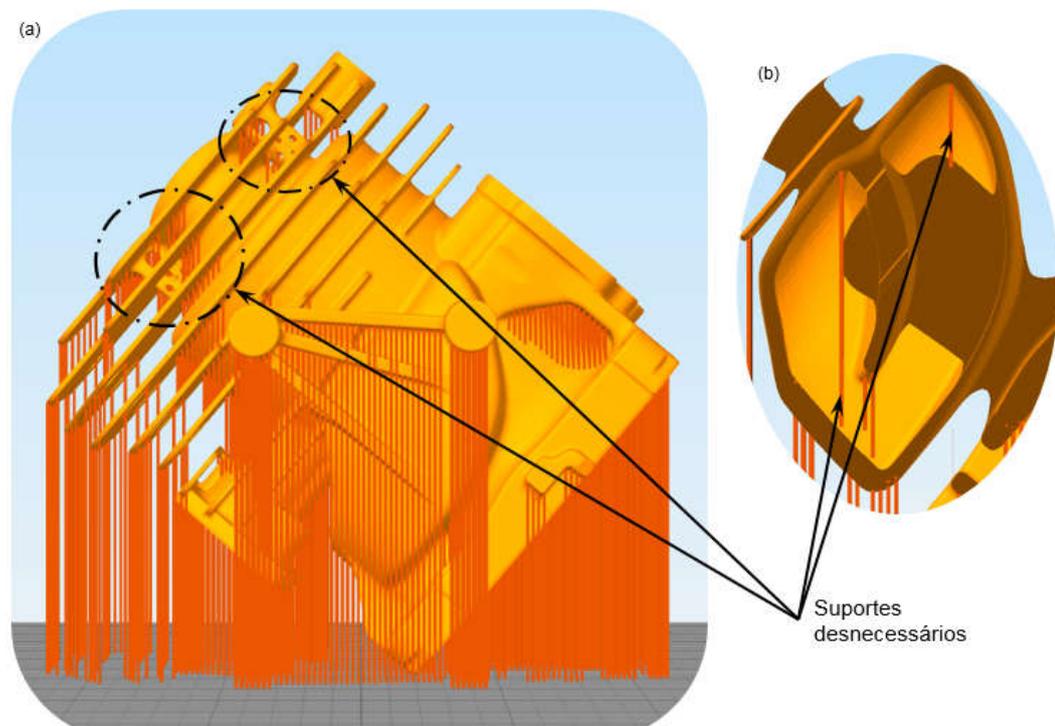
4.3 ANÁLISES RELATIVAS AO PROCESSO PRODUTIVO DO CILINDRO

A factibilidade da manufatura do cilindro SLM é dependente da geometria da peça, sua orientação em relação à plataforma de construção da impressora e do consequente projeto das estruturas de suporte necessárias para a impressão. A presença de suportes dentro dos dutos de transferência, por exemplo, inviabilizaria a fabricação do cilindro, pois tornaria muito difícil a remoção do material em meio a estes canais internos do componente. Ademais, Zhang et al (2019) afirma que a geometria dos suportes influencia significativamente na deformação da peça impressa devido sua atuação na dissipação de calor. Este fato deve ser encarado para o correto projeto de suportes em prol da estabilidade dimensional do componente.

Visando definir a orientação do cilindro em relação à plataforma de construção da máquina, o software Simplify 3D foi utilizado para averiguar a necessidade de suportes dentro dos dutos de transferência para diferentes ângulos da peça. No entanto, o Simplify 3D não é um software adequado para a programação de processos SLM, mas sim, aplicável à impressoras FFF, o que restringiu a análise apenas à visualização da adição de suportes pelo ângulo de rotação aplicado ao componente em relação à plataforma.

Executadas algumas iterações, a orientação do cilindro foi definida com uma inclinação de 45°, vista na Figura 33a, para evitar suportes em demasia entre as aletas de refrigeração e ao mesmo tempo não tornar necessária a inclusão de estruturas nos dutos de transferência, que apesar de estarem presentes na Figura 33b, não foram consideradas como impreteríveis para o sucesso da impressão. Esta conclusão foi baseada nas informações da Tabela 3 e na circunstância de as geometrias estarem conectadas, ou seja, suportadas por outras paredes da própria peça, mesma situação percebida nas estruturas celulares no topo do cilindro. Além do mais, Posser e Oliveira (2019) já realizaram a impressão de um cilindro SLM com regiões geometricamente parecidas com as do atual estudo e Clouts et al (2017) comprova que a necessidade de estruturas de suportes é também influenciada por parâmetros de processo, como a estratégia de varredura do laser adotada na impressão, abrindo a possibilidade de uma otimização geral dos suportes gerados para a fabricação do cilindro SLM.

Figura 33 - Orientação do cilindro SLM (a) e corte nos dutos de transferência (b)

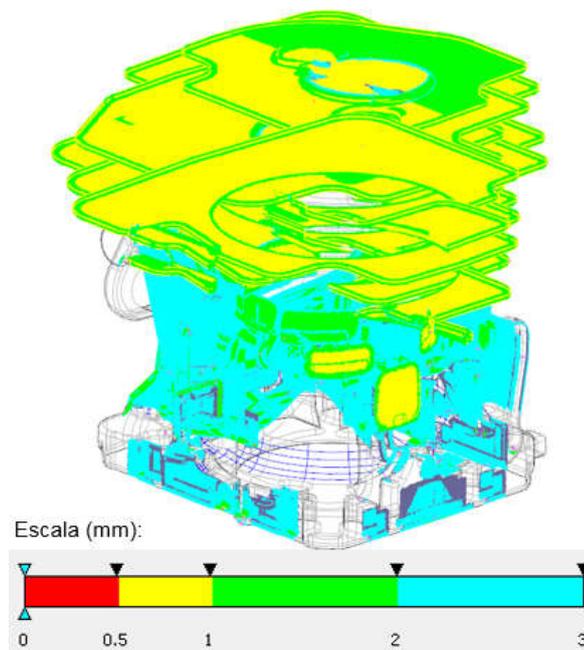


Fonte: Elaborado pelo autor.

A próxima restrição do processo SLM avaliada foi a recomendação de manter as paredes gerais do produto com pelo menos 0,5 mm de espessura, conforme dados da Tabela 3. Para isso, o modelo 3D do cilindro no Creo Parametric foi analisado com o plug-in 3DCaliper, onde uma malha foi gerada sobre a geometria e colorida de acordo com a escala especificada na Figura 34. Regiões em vermelho, ou seja, com espessuras menores que 0,5 mm, não foram detectadas, validando a geometria quanto as paredes modeladas.

Os resultados das análises com o Simplify 3D e 3DCaliper foram considerados positivos quanto à viabilidade da impressão do cilindro pelo processo SLM. Com isso, a geometria modelada na versão AM_V4c foi definida como a final.

Figura 34 - Espessuras das paredes do modelo 3D do cilindro SLM



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.1 Fluxo de processo para fundição X SLM

Além da eliminação de quatro operações de usinagem e criação de duas novas, como discutido na seção 4.2, a substituição do processo de fundição por SLM traria impactos significativos ao fluxo produtivo do cilindro como um todo. Estes impactos deveriam ser analisados de forma aprofundada em conjunto com os investimentos exigidos para uma eventual troca do método de manufatura. O conhecimento e análise de dados do processo corrente faz-se aqui necessário, pois

indicadores como sucata e retrabalho das operações atuais poderiam ser incentivos importantes em prol da AM.

Como potenciais vantagens da AM, podem ser citadas a eliminação da injeção das tampas dos dutos de transferência, sua rebarbação, tratamento térmico e jateamento. A injeção e rebarbação do próprio cilindro, aplicação de silicone para vedação, montagem e aparafusamento das tampas também seriam eliminados. Como possíveis benefícios adicionais ao ciclo produtivo, teríamos a exclusão da construção e manutenção dos moldes e ferramentais de fundição, como as matrizes para rebarbação, além de dificuldades relacionadas à estoque de itens de reposição, relacionamento com fornecedores externos e procedimentos de compras associados.

Por outro lado, o cilindro fabricado via SLM traria consigo novas complicações. O tratamento térmico, em tese, teria de ser realizado com as peças ainda fixadas à bandeja de construção para evitar deformações, o que demandaria maior espaço disponível nos fornos, reduzindo a quantidade de peças tratadas por unidade de tempo. A separação dos cilindros da bandeja, bem como a remoção dos suportes das peças, poderiam resultar em etapas complexas e que não estão incluídas no processo atual de produção em série do componente. No mais, a aquisição ou construção das bandejas sobre as quais as peças são impressas, bem como o seu retrabalho após utilização, são custos extras que precisariam ser também elucidados.

4.4 APLICAÇÃO DOS PRINCÍPIOS DE DFAM

Os resultados discutidos nas seções anteriores foram obtidos através da aplicação dos princípios pertinentes de DfAM aos objetivos traçados para o re-design do cilindro fundido para SLM. Dois dos princípios sugeridos por Volpato (2017) não foram utilizados, já que otimizações funcionais e questões relativas ao ciclo de desenvolvimento do cilindro não foram abordadas. A Tabela 7 traz um levantamento geral dos princípios de DfAM e a maneira como foram considerados na adaptação do componente para AM.

A aplicação de alguns princípios de design ficou limitada por restrições das operações de pós-processamento, como por exemplo, a existência de dispositivos de fixação que utilizam geometrias de referência no flange do cárter que não poderiam ser eliminadas para redução de massa. A necessidade de manter os

componentes da máquina ao redor do cilindro inalterados, foi também um fator limitante às mudanças geométricas permissíveis à peça. O design de geometrias mais complexas em outras regiões do cilindro, através da utilização de otimização topológica e de estruturas celulares, foi restrito pela complexidade das simulações que seriam associadas a estas modificações e do levantamento dos dados relativos às condições de contorno do problema.

Tabela 7 - Princípios de DfAM aplicados ao cilindro SLM

Princípios de DfAM	Aplicado?	Observações
Desconsiderar as restrições tradicionais de projeto e considerar as de AM.	Sim	Aplicado ao re-design do cilindro fundido para SLM.
Tirar vantagem da liberdade oferecida pela AM para agregar valor ao produto.	Sim	Aplicado para a obtenção de uma peça mais leve e para a diminuição do número de componentes na montagem.
Reduzir o número de componentes na montagem por meio da integração das funções.	Sim	Aplicado na integração das tampas dos dutos de transferência ao cilindro e na eliminação dos parafusos de fixação.
Otimizar topologicamente o projeto para a máxima resistência e o mínimo peso.	Sim	Aplicado para o dimensionamento dos reforços no topo do cilindro para a fixação da peça durante o processo de usinagem.
Utilizar estruturas celulares para redução de peso e material.	Sim	Aplicado para reduzir a densidade dos reforços adicionados ao topo do cilindro.
Optar pela melhor solução de projeto combinando design e função.	Não	Fora do escopo do trabalho.
Ponderar que, com AM, mudanças de projeto são menos problemáticas.	Não	Fora do escopo do trabalho.
Atentar para as características dos materiais disponíveis para a tecnologia AM escolhida.	Sim	Aplicado para a escolha do processo SLM como tecnologia de AM para utilização da liga de alumínio AISi9Cu3.
Levar em consideração a influência da orientação de impressão do componente.	Sim	Aplicado para a avaliação da necessidade de suportes internos nos dutos de transferência do cilindro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de princípios de DfAM em cilindros de motores dois tempos proposta neste trabalho, resultou em uma redução de 29% da massa do componente originalmente fabricado via fundição, o qual foi redesenhado para o processo SLM, uma tecnologia AM de fusão de leito de pó. O projeto voltado para AM permitiu ainda, a integração das duas tampas dos dutos dos canais de transferência ao corpo do cilindro e a eliminação de seus oito parafusos de fixação, diminuindo assim, o número de peças do motor.

O modelo 3D do cilindro SLM foi validado através de simulações computacionais que demonstraram tensões equivalentes entre o flange do cárter original e o modificado, além de resistência adequada de reforços adicionados ao topo da peça para suportar a fixação no processo de usinagem. Ainda que durante a operação da máquina o cilindro esteja sob solicitações mais complexas, envolvendo temperatura, vibração e cargas cíclicas, as simulações realizadas servem como indicativo de eficiência da nova geometria, o que poderia ser confirmado com a produção de um protótipo funcional para validações adicionais. Além disso, propriedades mecânicas reais originadas do processo SLM tendem a ser superiores às oriundas da fundição, o que também poderia ser investigado com testes em protótipos.

Sendo assim, do ponto de vista técnico, não parecem haver empecilhos à substituição do processo de fundição por SLM na fabricação de cilindros dois tempos para máquinas portáteis. Este fato abre a possibilidade de, em um futuro onde os volumes de produção de motores à combustão sejam reduzidos devido às maiores restrições ambientais e tecnologias de AM estejam mais acessíveis, otimizações de design como as discutidas neste estudo, somadas com melhorias funcionais do cilindro para atingir maiores potências com menores índices de emissões de poluentes, tornem-se fundamentais para a viabilidade de novas máquinas portáteis à combustão.

Por fim, como forma de dar continuidade à pesquisa, os seguintes pontos são sugeridos:

- Construção de um protótipo funcional de um cilindro SLM para avaliações complementares e correlação com os dados teóricos aqui obtidos.

- Investigação de diferentes tipos de estruturas celulares e seus benefícios para o design do cilindro, averiguados por meio de simulações e/ou testes práticos.
- DfAM baseado em tecnologias AM alternativas ao SLM, aplicado para cilindros e utilizando matéria-prima apropriada.
- Análise de viabilidade econômica do emprego de AM na fabricação de cilindros, considerando investimentos e dados do ciclo produtivo atual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3D SYSTEMS. **Direct Metal Printing (DMP)**. Disponível em: <<https://www.3dsystems.com/direct-metal-printing>>. Acesso em: 09 junho 2019.

ABBEY T. **What Is Topology Optimization and Why Is It Useful?** Disponível em: <<https://www.ptc.com/en/cad-software-blog/what-is-topology-optimization>>. Acesso em: 02 novembro 2019.

ATZENI A, SALMI A. **Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts**. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 62, 1147–1155, 2012.

BLAIR G. **Design and Simulation of Two-Stroke Engines**. Warrendale, SAE, 1996.

BOOTHROYD G et al. **Product Design for Manufacture and Assembly**. New York, CRC Press, 2011.

BUCHBINDER D. **Generative Fertigung von Aluminiumbauteilen für die Serienproduktion**. Aachen, Fraunhofer Institut für Lasertechnik, 2010.

CARBON. **Our Technology**. Disponível em: <https://www.carbon3d.com/our-technology/>. Acesso em: 30 agosto 2019.

CHANDRUPATLA TR, BELEGUNDU AD. **Introduction to Finite Elements in Engineering**. Harlow, Pearson, 2012.

CLOOTS M et al. **Approaches to minimize overhang angles of SLM parts**. Rapid Prototyping Journal 23, 2, 362-369, 2017.

CONCEPT LASER. **The technology**. Disponível em: <<https://www.concept-laser.de/en/technology.html>>. Acesso em: 09 junho 2019.

DEBROY T et al. **Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties**. Progress in Materials Science 92, 112–224, 2018.

DIN. **DIN EN 1706: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Gussstücke - Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften**. Berlin, Deutsches Institut für Normung, 2010.

DM. **Desktop Metal**. Disponível em: <<https://www.desktopmetal.com/>>. Acesso em: 30 agosto 2019.

DUDA T, RAGHAVAN VL. **3D Metal Printing Technology**. IFAC PapersOnLine 49–29, 103–110, 2016.

EMMELMANN C et al. **Laser Additive Manufacturing and Bionics: Redefining Lightweight Design**. Phys. Procedia 12, 364–368, 2011.

EUROPEAN COMMISSION. **Non-Road mobile machinery emissions**. Disponível em: <https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/environment-protection/non-road-mobile-machinery_en>. Acesso em: 12 abril 2019

FILHO AA. **Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE**. Tatuapé, Érica, 2002.

FISH J, BELYTSCHKO T. **Um Primeiro Curso Em Elementos Finitos**. São Paulo, LTC, 2009.

GE ADDITIVE. **How Direct Metal Laser Melting (DMLM) Works**. Disponível em: <<https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/information/direct-metal-laser-melting-technology>>. Acesso em: 09 junho 2019.

GEBISA AW, LEMU HG. **Design for manufacturing to design for Additive Manufacturing: Analysis of implications for design optimality and product sustainability**. Procedia Manufacturing 13, 724–731, 2017.

GIBSON I et al. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. New York, Springer, 2015.

HÄLLGREN S et al. **(Re)Design for Additive Manufacturing**. Procedia CIRP 50, 246–251. 2016.

HERZOG D et al. **Additive manufacturing of metals**. Acta Mater. 117, 371–392, 2016.

HP. **HP Metal Jet technology**. Technical white paper. Disponível em: <<https://www8.hp.com/us/en/printers/3d-printers/products/metal-jet.html>>, 2018.

HP. **HP Multi Jet Fusion technology**. Technical white paper. Disponível em: <<https://www8.hp.com/us/en/printers/3d-printers/products/multi-jet-technology.html>>, 2016.

INCROPERA FP, DEWITT DP. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro, LTC, 2003.

ISO. **ISO 52900: Additive manufacturing - General Principles - Terminology**. Genebra, International Organization for Standardization, 2015.

JARED BH et al. **Additive manufacturing: Toward holistic design**. Scripta Materialia 135, 141–147, 2017.

KELLNER T, BOVALINO YM. **Laser Metalz: Bionic Design is the Next Frontier for 3D Printing**. GE Reports. Disponível em: <<https://www.ge.com/reports/laser-metalz-bionic-design-next-frontier-3d-printing/>>, 2017.

KLAHN C et al. **Design for Additive Manufacturing – Supporting the Substitution of Components in Series Products**. Procedia CIRP 21, 138–143, 2014.

LESKO J. **Design Industrial: Guia de Materiais e Fabricação**. São Paulo, Blucher, 2012.

LI Q et al. **Production planning in additive manufacturing and 3D printing**. *Comput. Oper. Res.* 83, 157–172, 2017.

LIENEKE T et al. **Systematical Determination of Tolerances for Additive Manufacturing by Measuring Linear Dimensions**. 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, 2015.

LIGON SC et al. **Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing**. *Chem. Rev.* 117, 10212–10290, 2017.

LOCKER A. **2019 Metal 3D Printer Guide – All About Metal 3D Printing**. All3DP.com. Disponível em: <<https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing/>>, 2019.

MARKFORGED. **Metal & Carbon Fiber 3D Printers**. Disponível em: <<https://markforged.com/>>. Acesso em: 30 agosto 2019.

MATTHECK C. **Warum alles kaputt geht: Form und Versagen in Natur und Technik**. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, 2003.

MILEWSKI J. **Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry**. Santa Fe, Springer, 2017.

MIT. **Additive Manufacturing for Innovative Design and Production**. Massachusetts Institute of Technology. Disponível em: <<https://xpro.mit.edu>>, 2019.

MOREAU C. **The Complete Metal 3D Printing Guide**. Villejuif, Sculpteo, 2017.

NORTON RL. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. Porto Alegre, Bookman, 2004.

PARR A. **Hydraulics and Pneumatics: A Technician's and Engineer's Guide**. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2011.

PONT M. **Metal Additive Manufacturing - Is This the End of Different Fluid Power Products for Different Markets?** *Domin Fluid Power*. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/metal-additive-manufacturing-end-different-fluid-power-marcus-pont?trk=portfolio_article-card_title>, 2017.

POSSER T, OLIVEIRA BF. **Design for additive manufacturing applied for mass reduction of a two-stroke engine cylinder for portable machine**. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2019.

QUINLAN H et al. **Industrial and Consumer Uses of Additive Manufacturing: A Discussion of Capabilities, Trajectories, and Challenges**. *Journal of Industrial Ecology* 21, S1, 2017.

REDWOOD B et al. **The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications**. Amsterdam, 3D HUBS, 2018.

SCULPTEO. **3D printing lattices: Find the best lattice generation tools!** Disponível em: <<https://www.sculpteo.com/blog/2018/04/18/3d-printing-lattices-find-the-best-lattice-generation-tools>>. Acesso em: 13 outubro 2019.

SHELLABEAR M, NYRHILÄ O. **DMLS - Development History and State of the Art**. Erlangen, LANE 2004 Conference, 2004.

SMARTECH. **Markets for Aluminum Alloys in Additive Manufacturing: 2018 to 2028**. Crozet, SmarTech Analysis, 2018.

SODICK. **Metal 3D Printing Technology**. Disponível em: <https://www.sodick.com/technology/3d-printing>>. Acesso em: 09 junho 2019.

SRINIVASAN V, BASSAN J. **3D Printing and the Future of Manufacturing**. Leading Edge Forum Technology Program, 2012.

TUAN N et al. **Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges**. Compos. B 143, 172–196, 2018.

VAROTSIS AB, et al. **3D Printing Trends Q1 2019: Industry highlights and market forecasts including a special on 3D printing in Automotive**. Amsterdam, 3D HUBS, 2019.

VIRTUALCAE. **Otimização topológica: Entenda o que é**. Disponível em: <<http://virtualcae.com.br/otimizacao-topologica-entenda-o-que-e/>>. Acesso em: 03 novembro 2019.

VOLPATO N. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. São Paulo, Edgar Blücher, 2017.

VOXELJET. **High Speed Sintering (HSS) for the Flexible Production of Functional Components**. Disponível em: <<https://www.voxeljet.com/unternehmen/news/voxeljet-introduces-high-speed-sintering-process/>>. Acesso em: 12 junho 2019.

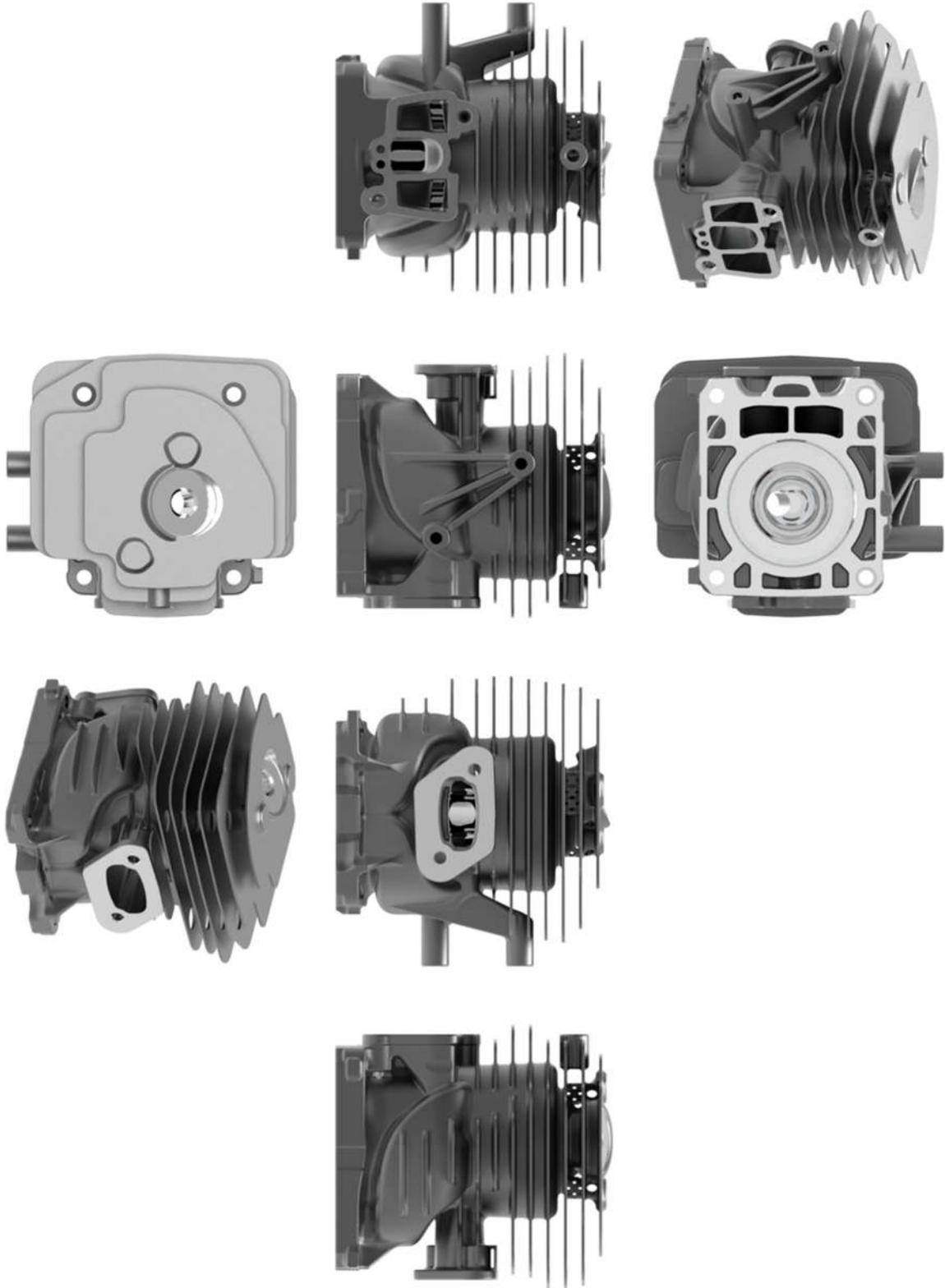
WOHLERS A. **Wohlers Report 2014**. Fort Collins, Wohlers Associates Inc., 2014.

WOHLERS A. **Wohlers Report 2018**. Fort Collins, Wohlers Associates Inc., 2018.

ZHAO L et al. **Lightweight Design of Mechanical Structures based on Structural Bionic Methodology**. Journal of Bionic Engineering 7, 224-231, 2010.

ZHANG K et al. **Study on the Geometric Design of Supports for Overhanging Structures Fabricated by Selective Laser Melting**. Materials 12, 27, 2019.

ANEXO A - RENDERIZAÇÃO DO CILINDRO SLM



Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO B - MOCKUP IMPRESSO EM POLÍMERO PELO PROCESSO FDM

Cilindro impresso em ABS com suportes solúveis aguardando a retirada da câmara de construção da impressora Stratasys Fortus 250mc



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cilindro finalizado após solubilização dos suportes



Fonte: Elaborado pelo autor.