

PROJETO PARA MANUFATURA ADITIVA: REVISÃO

Sergio Fernando Lajarin

Universidade Federal do Paraná, DEMEC, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210 CEP 81531-990, Curitiba/PR
espanhol@gmail.com

Lucas Aurélio Stelziner Fischer

Universidade Federal do Paraná, DEMEC, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210 CEP 81531-990, Curitiba/PR
lucas.stelziner@gmail.com

Neri Volpato

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, DAMEC, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 - Bloco K, Curitiba/PR.
nvolpato@utfpr.edu.br

Resumo: A Manufatura Aditiva (AM, do inglês *Additive Manufacturing*) é um processo de fabricação que permite uma maior liberdade geométrica dos componentes e, desta forma, novas alternativas de projeto podem ser empregadas. Isso vem exigindo adaptação nas práticas atuais de projeto para manufatura, dando origem ao recente conceito de Projeto para AM (DFAM, do inglês, *Design for AM*). Várias abordagens e metodologias de DFAM são propostas na literatura e este trabalho apresenta uma tentativa de agrupar as mesmas. Estudos de caso com aplicações de DFAM com diferentes focos e escopos são comentados. Contudo, observa-se que o conceito de DFAM ainda está engatinhando, as metodologias apresentam lacunas e muitas são superficiais. Não há entendimento suficiente de quando e como projetar para o AM, não consideram a capacidade de alguns processos de AM em produzir montagens funcionais e muitas das tecnologias necessárias para apoiá-la ainda não estão maduras. De uma forma geral, a maioria das pesquisas tem foco em desenvolver métodos e ferramentas de projeto para nichos específicos em vez de metodologias mais amplas e gerais. O amadurecimento de metodologias de DFAM é fundamental para a penetração maciça da AM na indústria. A maioria das metodologias tem como etapa estratégica a otimização topológica e criação de materiais celulares (estruturas treliçadas ou outras) que agregam inúmeras possibilidades, mas que também apresentam algumas dificuldades de projeto e aplicação.

Palavras chave: Manufatura Aditiva. Impressão 3D. DFAM. Otimização topológica. Materiais celulares.

1. INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (AM) tem como diferencial o método de fabricar por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente (Volpato, 2017). Muitos são os princípios de adição e também as tecnologias existentes. Atualmente, a ISO/ASTM 52900:2015 divide a AM em sete grupos, baseado no princípio de adição de camada. Por ser um processo relativamente novo, quando comparado aos processos de fabricação tradicionais, o desenvolvimento tecnológico na área é muito grande e novidades são constantes.

A AM tem capacidades únicas, como complexidade das formas (não tem as limitações dos processos de fabricação tradicionais), complexidade hierárquica (parâmetros do processo podem ser variados para obter uma microestrutura diferente), complexidade funcional (pode ser projetado para exercer diferentes funções), complexidade de material (o material e a maneira da sua aplicação pode variar durante a fabricação) (Boschetto *et al.*, 2019 e Sossou *et al.*, 2018). Hague, Mansour e Saleh (2003) há quase duas décadas atrás já apontavam que a AM e o conceito de manufatura rápida teriam profundas implicações em todos os aspectos do desenvolvimento e da manufatura dos produtos. Essa revolução na maneira de fabricar peças, leva a maior liberdade e alternativas de projeto e, como consequência, vem exigindo uma adaptação nas práticas atuais de projeto para manufatura (DFM, do inglês *Design for Manufacturing*) e para montagem (DFA, do inglês *Design for Assembly*) de forma a transitar para estratégias de DFAM (Gebisa e Lemu, 2017).

O conceito de DFAM vem atraindo interesse acadêmico e da indústria. Segundo Castilho e Siqueiros (2019) e Gebisa e Lemu (2017), o desenvolvimento de conhecimento, ferramentas, regras, processos e metodologias de DFAM é um dos principais desafios técnicos, necessidades e oportunidades para ampliar o uso da AM. Seepersad *et al.* (2017) mencionam que para projetar peças mais efetivas para AM, os projetistas precisam de regras e metodologias que ajudem a entender não apenas as limitações de um processo específico de AM, mas também as oportunidades e liberdades de projeto proporcionadas pelo processo.

Tang e Zhao (2016) definem DFAM genericamente como um método de projeto pelo qual o desempenho funcional e/ou outras considerações importantes do ciclo de vida do produto, como manufaturabilidade, confiabilidade e custo, podem ser otimizados, de acordo com as capacidades das tecnologias de AM. De acordo com Thompson *et al.* (2016), os objetivos e metas gerais do DFAM compreendem os três níveis de abstração do DFMA (do inglês, *Design for*

Manufacturing and Assembly), são eles: (1) oferecer ferramentas, técnicas e diretrizes para adaptar um projeto a um determinado conjunto de restrições de fabricação; (2) compreender e quantificar o efeito das restrições no processo de projetar para a fabricação (e vice-versa), a fim de melhorar o desempenho do sistema de manufatura e a qualidade do produto; e (3) conhecer a relação entre projeto e manufatura e seu impacto sobre o projetista, sobre o processo de projetar e na prática de projetar. Gibson *et al.* (2015) simplificam os objetivos do DFAM como o de maximizar o desempenho do produto através da síntese de formas, tamanhos, estruturas hierárquicas e composições de material, sujeitas às capacidades das tecnologias de AM. Nesse sentido, diferentes abordagens e metodologias estão sendo propostas na literatura. Algumas dessas metodologias são resumidas na próxima seção.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Abordagens e metodologias de DFAM

Os trabalhos da literatura sobre DFAM são bem diversificados. Alguns tentam classificar conceitualmente as abordagens de DFAM (Yang; Zhao, 2015, Kunke *et al.* 2016, Rosen, 2014), outros tem foco em regras de projeto para AM (Tang *et al.* 2016, Samperi 2014), mas poucos têm foco no processo de projetar em si (Kumke *et al.* 2016, Yang *et al.* 2015, Wiberg *et al.* 2019). Dessa forma, diferentes abordagens de DFAM com objetivo central distinto são relatados na literatura. Tang e Zhao (2016) fazem uma revisão abrangente de métodos de DFAM e os classifica em dois grupos principais: métodos para desempenho funcional e métodos gerais. Booth *et al.* (2016) classificam as metodologias de DFAM em três grupos com focos diferentes, são eles: (1) no método de projeto, (2) na tecnologia de AM e (3) nas diretrizes de DFAM. O primeiro grupo propõe métodos de projeto específicos que utilizam AM ou descrevem como o DFAM deve fazer parte de todo o processo de projeto. No entanto, nem todos fornecem detalhes específicos sobre os métodos propostos, em vez disso, defendem mais pesquisas (Ponche *et al.*, 2012, Gibson *et al.* 2016, Vayre *et al.* 2012, Rosen *et al.* 2007, Yang e Zhao, 2015). O segundo grupo, pesquisa diferentes abordagens para superar as limitações da AM, tais como manufaturar detalhes pequenos ou reduzir a necessidade de estruturas de apoio. Aplicações específicas, que agora são possíveis com AM frequentemente requerem um processo sob medida. Isso pode ter um impacto significativo no resultado dos produtos. Um exemplo é a capacidade de emular sistemas biológicos naturais, que só agora é possível devido às liberdades da AM (Adam e Zimmer, 2014, Gibson *et al.* 2016, Ponche *et al.*, 2012, Plessis e tal. 2019). O terceiro grupo se concentra nas diretrizes gerais do DFAM que destacam os desafios exclusivos da AM. Estas diretrizes são geralmente destinadas a serem usadas em qualquer momento durante o projeto (Adam e Zimmer, 2014, Rosen *et al.* 2007, Yang e Zhao, 2015).

Kumke *et al.* (2016) propuseram uma outra classificação para DFAM que distingue entre "DFAM no sentido estrito" e "DFAM no sentido amplo". O primeiro inclui abordagens relativas ao processo atual de projeto, por exemplo, diretrizes e metodologias que apoiam os engenheiros de projeto em suas principais tarefas de criação de produtos utilizando as potencialidades da AM. O segundo, contém abordagens adicionais ao processo de projeto central, com atividades anteriores e posteriores ao DFAM e também atividades genéricas relacionadas a DFAM realizadas no desenvolvimento de novos produtos. Os autores notaram que as contribuições existentes no campo do DFAM influenciam diferentes estágios do projeto do produto e, como tal, apenas otimização local é alcançada. Para uma melhor integração, eles propuseram uma metodologia de DFAM que combina o procedimento geral de projeto sistemático com todos os tipos existentes de métodos e ferramentas de DFAM. A estrutura desenvolvida guia o projetista para uma solução de problemas de projeto.

Posser e Oliveira (2019) apresentaram uma tentativa de abordagem mais abrangente que possui os seguintes princípios: (1) Descarte as restrições tradicionais do projeto e considere as novas, relacionadas ao processo AM escolhido; (2) Aproveite a liberdade de projeto oferecido pela AM para agregar valor ao produto; (3) Elimine componentes de montagem através da integração de funções; (4) Realize a otimização topológica para força máxima e massa mínima; (5) Considere usar estruturas celulares (treliça, favo e espuma) como ferramenta de projeto para redução de massa, calor e isolamento acústico; (6) Selecione a melhor possibilidade em relação aos requisitos de projeto e função; (7) Leve em conta que as mudanças da geometria durante o ciclo de vida do produto têm um impacto menor do que no processo de fabricação tradicional, no qual é necessário um ferramental especial; (8) Esteja ciente das limitações do material usado na AM e sua anisotropia; (9) Considere a orientação da impressão durante a fase de conceito e todas as suas influências (propriedades mecânicas, acabamento superficial, tolerâncias, etc.).

As tentativas de classificar DFAM em grupos e conceitos, apontam para direções diferentes e não conseguem ser abrangentes o suficiente, revelando superficialidade e uma lacuna de aplicação, um problema que está sendo contornado pelo desenvolvimento de abordagens pontuais de DFAM, para nichos e tecnologias específicas. Independente disso, vale a pena considerar como diretriz de projeto sete "regras de ouro" que foram apresentadas por Diegel (2019), são elas: (1) Regras de DFAM são dependentes de muitos fatores, (2) Você precisa usar a AM como primeira alternativa de processo de fabricação?, (3) Deixe seu produto bonito, (4) Sempre projete com a orientação de impressão em mente, (5) Projete evitando material de suporte, (6) Evite grandes massas de material e (7) Aplique cantos arredondados sempre que possível.

Tang e Zhao (2016) chamam a atenção para o emprego do DFAM em dois níveis, como métodos de nível de produto, que considerem montagens, e de nível de peça. É natural que a análise do projeto deve olhar o produto como um todo e depois descer a nível de peça.

Descendo ao nível da peça, várias considerações podem ser feitas, iniciando por características gerais da AM, independente da tecnologia de adição propriamente dita, e posteriormente recomendações que levam em considerações específicas de cada tecnologia. Nesta última abordagem, pode-se pensar em projeto para tecnologias de extrusão de

material, projeto para tecnologias de fusão em leito de pó, projeto para tecnologias por energia direcionada, e assim sucessivamente. Adicionalmente, novos conceitos como otimização topológica e materiais celulares estão sendo aplicados a nível de peça para explorar todas as vantagens da AM.

As seções a seguir destacam trabalhos que se concentraram em algumas destas abordagens.

2.2. DFAM com considerações a nível de produto

Durante a fase de projeto de uma peça é necessário racionalizar o conhecimento sobre AM e considera-lo na definição da forma final da peça. No entanto, é importante adotar procedimentos de projeto que analisem o produto como um todo, combinando componente, se possível, em níveis de montagem, melhorando a geometria e a topologia a nível de peças entre outras.

Considerando o nível do produto, Rodrigue e Rivette (2010) apresentaram uma metodologia de projeto direcionada ao projeto de montagens por AM. O objetivo da metodologia é auxiliar o projetista durante o projeto do produto a considerar as vantagens oferecidas pela AM, principalmente a da consolidação de várias peças e uma única e a fabricação de peças em diferentes materiais. Anteriormente, Becker *et al.* (2005) já tinham realizado um trabalho nesse sentido, um reprojeto onde as vantagens da AM foram consideradas para modificar um dispositivo inicialmente composto por vários componentes montados que foi reprojetoado como componente único. No novo projeto houve a redução do número de peças, menor esforço para montar e avanços de funcionalidades (ver Fig. 1). Gibson *et al.* (2016) também afirmam que tanto a montagem quanto o desempenho funcional de um produto podem ser otimizados pelo redesenho da relação de montagem entre suas peças.

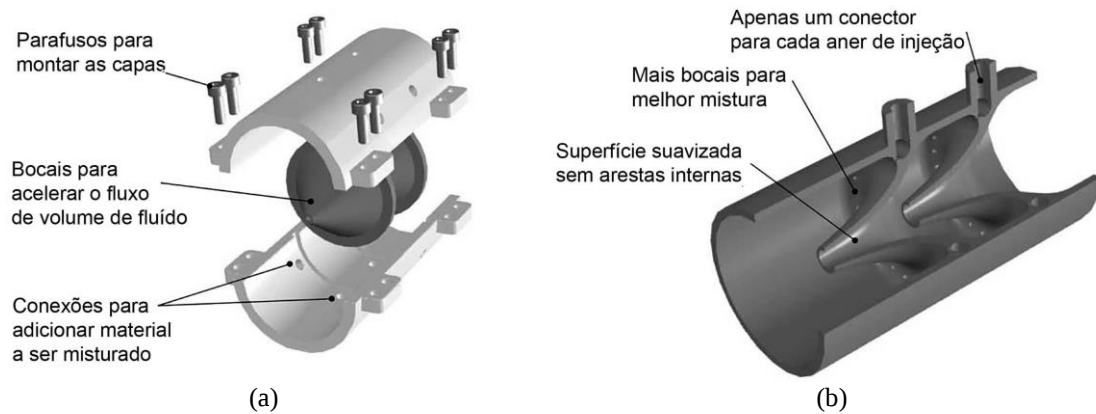


Figura 1. Reprojeto de uma montagem para fabricação por AM, (a) projeto para manufatura convencional, em (b) projeto otimizado (Adaptado de Becker *et al.*, 2005).

Tang e Zhao (2016) apontam a necessidade de métodos mais amplos de DFAM no nível do produto que considere simultaneamente a relação montagem e funcionalidade dos produtos. Segundo os autores a maioria dos métodos de DFAM existentes se concentram principalmente no projeto em nível de peça. Para o projeto em nível de produto, o relacionamento de montagem é geralmente otimizado por métodos tradicionais de DFMA que não consideram as capacidades exclusivas dos processos de AM para a melhoria da funcionalidade. Assim, um método geral de DFAM no nível do produto é urgentemente necessário para reduzir as dificuldades de montagem, bem como para aumentar o desempenho geral dos produtos.

2.3. DFAM com considerações a nível de peça

Em nível de peça, diversas abordagens são empregadas para projetar para AM. Diegel *et al.* (2020) relatam um reprojeto de um *manifold* hidráulico fabricado convencionalmente para ser fabricado por AM. O procedimento de DFAM aplicado constituiu etapas de remoção de todo o material que não desempenhava função específica de engenharia, explorando os efeitos de diferentes orientações de impressão, técnicas para eliminar o material de suporte e pós-processamento. A melhoria na funcionalidade do produto também era um interesse do novo projeto. Eles descrevem as etapas utilizadas no estudo de caso de uma maneira genérica para torná-las aplicáveis a outras peças fabricadas por AM em metal ou polímero, ver Fig. 2. O bloco original feito em aço inox 316 pesava 16.2 Kg, incluindo os acessórios hidráulicos necessários para conectar as mangueiras a ele. Na etapa seguinte todo o material supérfluo foi retirado, deixando apenas os tubos, com espessura de parede que atendessem aos requisitos de pressão do produto. Um reprojeto melhorando a funcionalidade foi feito juntamente com um estudo de orientação e necessidade de estruturas de suporte. Estruturas de suporte otimizadas foram incorporadas definitivamente na geometria do produto, melhorando a resistência e diminuindo a necessidade de pós-processamento. O resultado final foi um produto com 91% a menos de peso, exigindo menos volume de instalação e proporcionando um melhor fluxo para o fluido hidráulico.

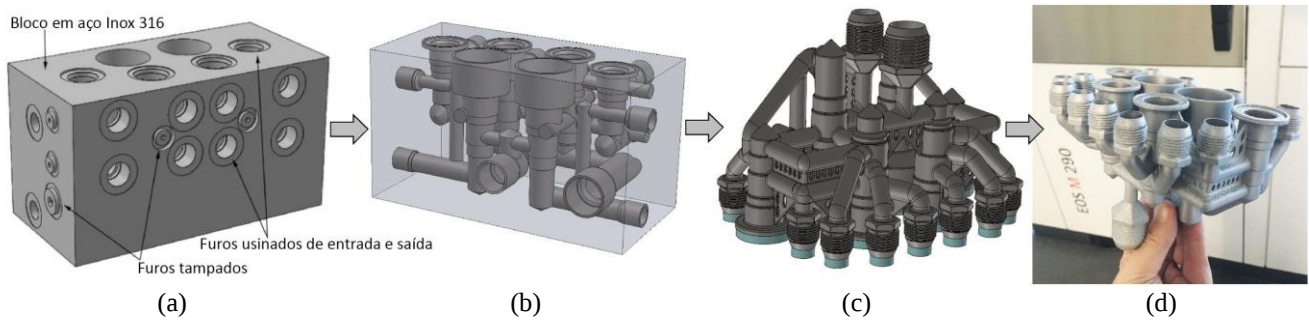


Figura 2. Reprojetado de *manifold* hidráulico, em (a) projeto original, (b) Remoção de material desnecessário, (c) Melhorando a funcionalidade e incorporando estruturas de suporte, (d) Componente reprojetado fabricado (Adaptado de Diegel *et al.*, 2020).

Twelsiek *et al.* (2016) apresentam uma abordagem que distingue entre características do processo de AM, princípios de projeto e regras de projeto; cada uma dando suporte ao projetista durante os diferentes estágios do projeto. Os autores analisaram a influência da orientação das peças nas regras de projeto existentes, e apresentam um procedimento de projeto chamado de "determinação antecipada da orientação da peça". Ele tem o objetivo de determinar a orientação da peça no estágio inicial do processo de projeto e a partir dessa decisão, direcionar as demais. No trabalho foi projetado um suporte para cabeçote de corte a laser que a orientação antecipada auxiliou na migração do projeto ideal para um projeto viável, ajudando a evitar iterações de projeto e o pós-processamento. Dieter *et al.* (2019) também desenvolveram trabalho onde o design da peça a ser fabricada por AM foi direcionado pela orientação da peça na plataforma de impressão. Hietikko (2014) utilizou conceitos de DFAM associado a simulação computacional por FEM (do inglês *Finite Element Methods*) para projetar peças com geometrias e formas não tradicionais (planas, cilíndricas, retas e circulares) de forma a otimizar seu funcionamento e reduzir volume de material. Neste caso, a orientação da peça também direcionou a geometria interna da peça, com seção em forma de gota, de modo a eliminar a necessidade de estruturas de suporte, ver Fig. 3. O procedimento traz pouca novidade conceitual, mas mostra a importância da orientação da peça no *design* final e como formas impensadas para os processos de fabricação tradicionais podem ser agora consideradas, trazendo benefícios tão importantes como redução de massa atrelada a melhora funcional.

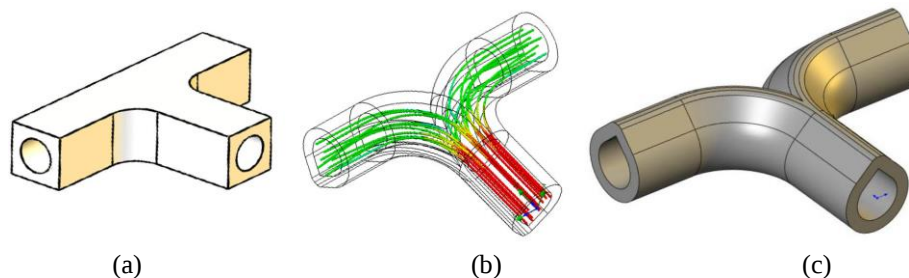


Figura 3. DFAM aplicado a otimização topológica, em (a) modelo inicial, em (b) análise por FEM, em (c) superfícies externas e internas reprojetada, (Adaptado de Hietikko, 2014).

No sentido de projetar peças para a fabricação por AM, Ponche *et al.* (2014) desenvolveram uma metodologia para projetar peças metálicas para fabricação por manufatura aditiva a laser. Considerando as especificações funcionais da peça, as características do processo, as restrições e os fenômenos físicos, a abordagem gera um "modelo CAD realista" para planejamento da manufatura (ou seja, caminhos de impressão e sua sequência). Na sequência, a geometria da peça e os caminhos de fabricação são otimizados e os desvios entre as visões "como projetado" (modelo CAD) e "como fabricado" são minimizados.

Em um trabalho anterior Ponche *et al.* (2012) propuseram uma abordagem mais geral independente do processo, na qual as características do processo (por exemplo, dimensões alcançáveis, precisão, cinemática, fenômenos físicos, etc.) são combinadas com especificações funcionais (geometria, requisitos mecânicos) e contexto (o que se pretende otimizar) de modo a gerar uma definição adequada do projeto. Uma desvantagem desse método é que ele deve ser aplicado após a seleção do material e do processo, pois essa informação é necessária durante a fase de síntese do projeto. Além disso, com base no método proposto, não considera como alternativas de projeto a otimização de topologia e o uso de materiais celulares.

Chu *et al.* (2008) apresentam um sistema de DFAM para que o projetista resolva problemas de DFAM usando algoritmos de análise, que incluem FEA e outras especialidades que, integradas, ajudam o projetista a determinar o comportamento do projeto. O objetivo desse sistema é determinar como serão fabricadas as formas, tamanhos, mesoestruturas e microestruturas da peça. Para isso, possui um modelador de sólidos heterogêneos implícito e multiescala, onde informações sobre o material e outras propriedades são modeladas juntamente com a geometria. Bibliotecas de

materiais e mesoestruturas permitem a construção rápida de alternativas de projeto. Por fim, simula o processo de fabricação para determinar se ele atende aos requisitos do projeto.

Booth *et al.* (2016) propõem um DFAM planilhado onde usuários iniciantes e intermediários podem verificar e validar um projeto antes da fabricação por AM. Ele tem o objetivo de reduzir falhas de impressão, melhorar a compreensão das limitações de AM e recomendar um curso de ação. Para avaliar se o ciclo de projeto foi afetado positivamente pela planilha e validá-la, os autores optaram por uma métrica simples onde o número de iterações para projetar peças é medido pelo número de impressões 3D com falha e quantos arquivos foram reimpressões. Eles registraram os trabalhos de impressão durante o período de cerca de um mês (com mais de 2000h de serviço) com e sem o uso da planilha. Apesar de inconsistências no procedimento experimental o resultado aponta para uma redução de 42% nas falhas de impressão e de 39% de necessidade de reimpressão, tudo isso motivado por melhorias sugeridas no projeto.

2.3. DFAM considerando Otimização topológica e material celular

A liberdade de forma oferecida pela AM tem propiciado duas grandes tendências na maneira como as peças são projetadas e são presentes nas metodologias de DFAM. A primeira é a otimização topológica que associada a FEM otimiza a distribuição de material dentro de um espaço de projeto definido, sob um conjunto de condições de contorno, cargas e restrições. A segunda tendência é projetar materiais com estrutura celular onde as principais vantagens são a alta relação resistência-peso, boa absorção de energia, boas características de isolamento térmico e acústico. Os objetivos com a otimização topológica e estrutura celular podem ser diversos, tais como redução de massa, aumento de rigidez e resistência mecânica, eficiência aerodinâmica, forma estética do componente, óssea-integração (implantes), entre outras.

O método de Becker *et al.* (2005) estabelece uma lista de recomendações ou princípios de DFAM com foco na economia máxima possível de material (como consequência, energia e tempo), colocando o material apenas onde for necessário. Opgenoord e Wilcox (2019) descrevem uma metodologia com foco em projeto de estruturas celulares em fase inicial de projeto. Os autores usam técnicas de malhamento adaptativo para projetar a topologia da estrutura celular e demonstram o método, aplicando em um suporte genérico para aeronave (ver Fig. 4). Como resultado, milhares de opções de projeto são avaliadas rapidamente, apontando as opções mais recomendadas.

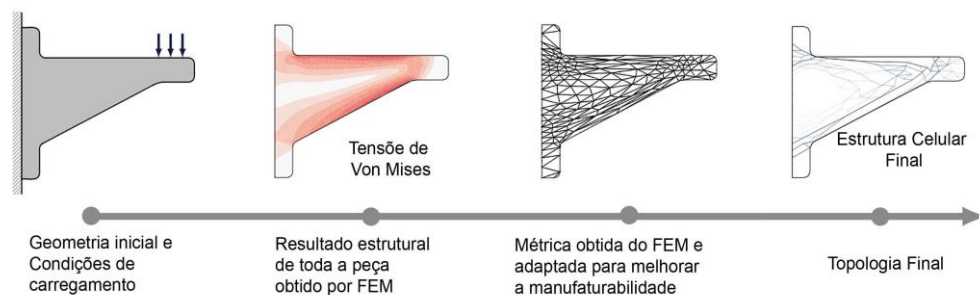


Figura 4. Etapas para projetar uma estrutura celular manufaturável (Adaptado de Opgenoord e Wilcox, 2019).

Hällgren *et al.* (2016) apresentam um estudo para criar formas que são difíceis ou caras de fabricar usando a manufatura tradicional. Um método orientado ao processo de fabricação utiliza otimização de topologia para encontrar a solução ideal, sem necessidade de simetria de fabricação e com redução de massa. O segundo método orientado ao formato da peça, usa material celular para reduzir a massa e o tempo de impressão, tornando a estrutura auto-sustentável. Três alternativas de projeto são apresentadas na Fig. 5. O projeto original, projetado para fundição, se fosse impresso (azul), mostra o efeito das estruturas de suporte interno que deveriam ser removidas para reduzir custo. Alterando os ângulos dos reforços, eles se tornam auto-sustentados (verde) e reduziram o tempo de impressão de 16.6h por peça para 15.0h por peça, imprimindo 8 peças por vez. A complexidade de forma da estrutura de treliças projetadas (vermelho) torna a estrutura auto-sustentada, mas imprime mais lentamente do que as demais. A combinação da otimização de topologia orientada a forma e ao processo pelo projetista (amarelo) fornece o menor volume de peça.

Os autores comparam o custo relacionado ao tempo de impressão e as massas do projeto original e dos reprojetados. O resultado mostrou quando reprojetar para AM é importante. A redução de massa teve um grande aumento no custo por peça. O benefício de reduzir 0,15 kg, com aumento de custo de 1600€, foi considerado pelos autores como inviável. Entretanto, indústrias onde o desempenho é mais importante do que o custo da peça, onde os volumes de série são baixos, onde o uso de materiais resistentes aumenta o desempenho e reduz os tempos de impressão a abordagem apresentada é vantajosa.

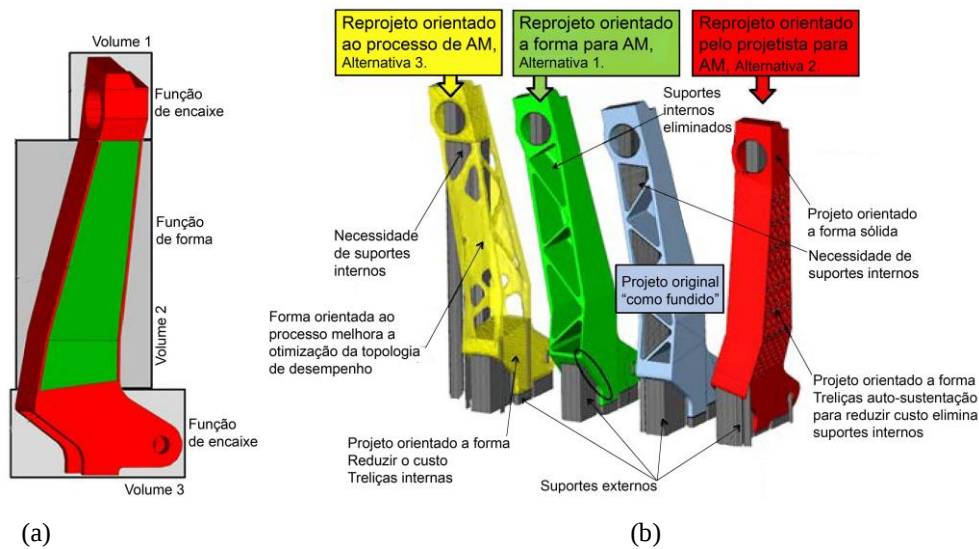


Figura 5. Braço de lançador de míssil, em (a) geometria de entrada para reprojeção para AM, em (b) três alternativas de projetos apresentados (Adaptado de Hällgren *et al.*, 2016).

A empresa GE Aviation apresentou um desafio para redesenho de um suporte de motor de aeronave com objetivo de redução de peso. O concurso recebeu 700 inscrições e o foco dos trabalhos foi a otimização topológica e estrutura celular, ver Fig. 6. Em termos de dólares e economia de combustível, a implementação do suporte vencedor (Fig. 6c) reduzirá o peso de um motor de avião em 1,7 kg. Se reduções de peso semelhantes fossem aplicadas a todas as aeronaves voadoras em todo o mundo, a economia anual de combustível seria em torno de 12 a 22 milhões de galões de combustível (a um valor atual de US \$ 37 milhões - US \$ 71 milhões) (Cartera, *et al.* 2015).

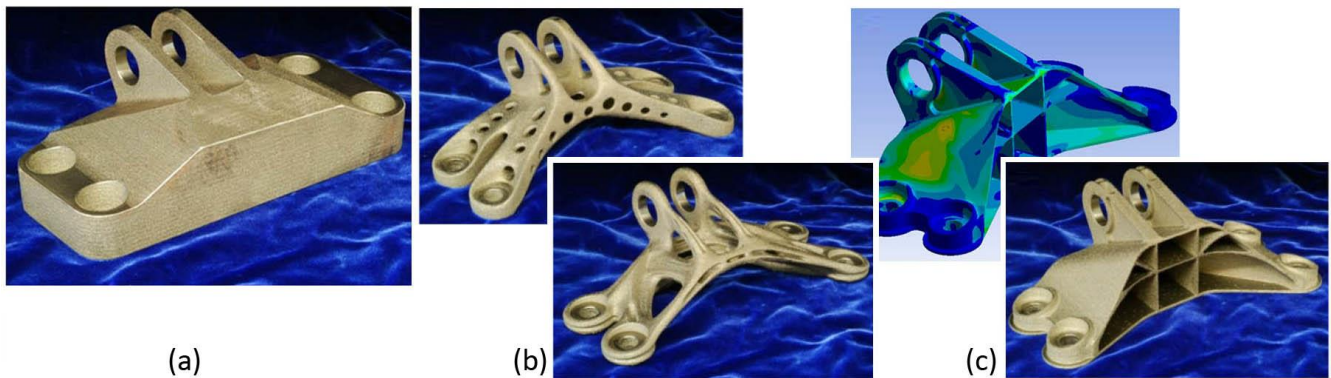


Figura 6. Exemplos de suportes de motor de aeronave, (a) projeto original, (b) projetos apresentados, (c) projeto ganhador e sua análise por FEM (Adaptado de Cartera, *et al.* 2015)

Lin *et al.* (2007) propuseram um método para otimizar a rigidez e a resistência mecânica de um implante (*cage*) de fusão inter-corpos lombar. O implante foi impresso na liga TiAl6V4 pelo processo SLM e pode ser visto na Fig. 7. A estrutura celular além de garantir ótima resistência mecânica tem características de porosidade importantes para óssea-integração.

A otimização topológica e a estrutura celular, são estratégias de projeto muito atrativas, com muitas possibilidades, mas que esbarram em algumas dificuldades que precisam ser consideradas. Alguns processos de AM exigem estruturas de suportes e sua retirada em regiões pequenas e de difícil acesso pode ser um limitador. Além disso, o projeto de estrutura celular que é amplamente empregado em projetos de estruturas metálicas ainda não está totalmente desenvolvido para aplicações com AM. Um outro limitador é que a complexidade geométrica dessas estruturas as tornam difíceis de projetar pelos sistemas CAD convencionais.

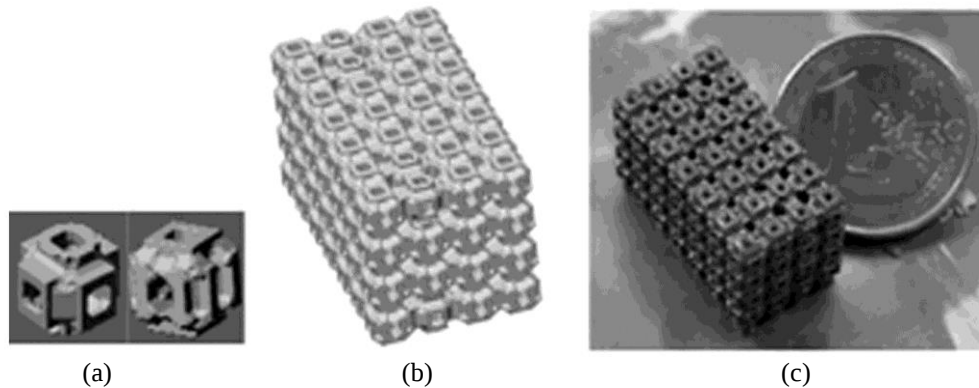


Figura 7. Microestruturas projetadas pela otimização da topologia em (a) frações de volume de 35% (esquerda) e 55% (direita), (b) modelo 3D no formato STL da estrutura ótima, (c) modelo fabricado em titânio (Adaptado de Lin *et al.*, 2007)

3. DISCUSSÃO E PERSPECTIVAS

Os avanços das tecnologias e popularização do processo de AM trazem novas possibilidades de projeto, produtos e paradigmas de produção. O progresso está sendo conduzido de cima para baixo e de baixo para cima, de simples usuários e também por setores da indústria e da pesquisa. Porém, as abordagens de DFAM que devem dar suporte aos projetos ainda estão engatinhando, apresentam lacunas e muitas são superficiais. Não há entendimento suficiente de quando e como projetar para o AM, não consideram a capacidade de alguns processos de AM em produzir montagens funcionais e muitas das tecnologias necessárias (ex. *software* dedicados) para apoiá-la ainda não estão maduras.

Apesar de existir um esforço de órgãos internacionais de padronização como a ASME e ISO em estabelecer diretrizes para projetos voltados à AM, de uma forma geral, a maioria dos pesquisadores tem identificado nichos específicos para desenvolver e aplicar métodos e ferramentas de projeto.

Algumas ferramentas e conceitos de representação, análise e otimização de projeto terão de ser transferidas da academia e da pesquisa para prática da indústria. Mas o assunto carece de amadurecimento para que sirva de apoio as atividades de projeto na indústria e para disseminação educacional.

Thompson *et al.* (2016) afirmam que a compreensão e aplicação insuficiente do DFAM está limitando a ampla penetração da AM na indústria, impedindo seu uso na produção de peças finais, impedindo que os projetistas se beneficiem plenamente da AM e evitando que ela atinja todo o seu potencial.

Além das limitações das metodologias de DFAM, acrescenta-se as dificuldades de aplicar as estratégias de otimização topológica e estruturas treliçadas que são quase unânimes nas abordagens de DFAM. Como alternativa, tentando ocupar uma lacuna que existe na manufatura de peças complexas, a manufatura híbrida é uma tendência. Liu e To (2017) pioneiros nesta área de pesquisa e Flynn *et al.* (2016) apresentam trabalhos com otimização topológica voltada para este tipo de manufatura.

4. REFERÊNCIAS

- Adam, G.A.O., Zimmer, D., 2014, "Design for Additive Manufacturing-Element transitions and aggregated structures" *CIRP J Manuf Sci Technol*, Vol. 7, pp. 20–28.
- Becker, R., Grzesiak, A., & Henning, A., 2005, "Rethink assembly design". *Assembly Automation*, Vol. 25, No. 4, pp. 262–266.
- Booth, J.W., *et al.*, 2016, "The design for additive manufacturing worksheet", In *Proceedings of the ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2016*, August 21-24, 2016, Charlotte, North Carolina, USA.
- Boschetto, A., *et al.*, 2019, "Selective Laser Melting of a 1U CubeSat structure". *Design for Additive Manufacturing and assembly, Acta Astronautica*, Vol. 159, pp. 377–384.
- Cartera, WT, *et al.* 2015, "The GE Aircraft Engine Bracket Challenge: An Experiment in Crowdsourcing for Mechanical Design Concepts", SFF 20141402.
- Castillo, M., Siqueiros, Z., 2019, "Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review", *Chin. J. Mech. Eng.*, pp. 32:53
- Chu, C., Graf, G. and Rosen, D.W. (2008), "Design for additive manufacturing of cellular structures", *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 4 No. 5, pp. 686-696.
- Diegel, O., 2019, "Design for AM: The key to industrializing additive manufacturing", 30th Annual International Soli Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, USA.
- Dieter, L.S., Lajarin, S.F, Okimoto, M.L.L.R, Foggiatto, J.A., 2019, "Projeto de produto para manufatura aditiva por extrusão de material utilizando uma impressora 3d de baixo custo", In *Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, COBEF*, São Carlos, SP, Brasil.

- Flynn, J. M., et al., 2016, "Hybrid additive and subtractive machine tools research and industrial developments". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 101, pp. 79–101.
- Gebisa, A.W., Lemu, H.G., 2017, "Design for manufacturing to design for Additive Manufacturing: Analysis of implications for design optimality and product sustainability". *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, pp. 724–731.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., 2016, "Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing", Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
- Hague, R., Mansour, S. Saleh, N., 2003, "Design opportunities with rapid manufacturing", *Assembly Automation*, Vol. 23:4, pp. 346–356.
- Hällgren, S., Pejryd, L., Ekengren, J., 2016, "(Re)Design for Additive Manufacturing". *Procedia CIRP* 50, pp. 246–251.
- Hietikko, E. 2014, "Design for Additive Manufacturing -DFAM". *The Int. J. of Eng. And Sc. (IJES)*, Vol.3, 12, p. 14-19.
- ISO/ASTM 52900:2015 (ASTM F2792). "Additive manufacturing - General principles -Terminology".
- Kumke, M., et al. 2016, "A new methodological framework for design for additive manufacturing". *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 11, No. 1, pp. 3–19.
- Lin, C.-Y., et al., 2007, "Structural and mechanical evaluations of a topology optimized titanium interbody fusion cage fabricated by selective laser melting process". *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, Vol. 83A, No. 2, pp. 272–279.
- Liu, J., To, A.C., 2017, "Topology optimization for hybrid additive-subtractive manufacturing". *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 55, pp.1281–1299.
- Plessis, A., et al., 2019, "Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing", *Additive Manufacturing*, Vol. 27, pp. 408–427.
- Ponche, R., et al., 2012, "A new global approach to design for additive manufacturing: A method to obtain a design that meets specifications while optimizing a given additive manufacturing process is presented in this paper", *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 7, No. 2, pp. 93-105.
- Ponche, R., Kerbrat, O., Mognot, P., & Hascoet, J.-Y., 2014. "A novel methodology of design for additive manufacturing applied to additive laser manufacturing process". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 30, No. 4, pp. 389–398.
- Posser, T., Oliveira, B.F., 2019, "Design for additive manufacturing applied for mass reduction of a two-stroke engine cylinder for portable machine", *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*.
- Rodrigue, H., Rivette, M., 2010, "An assembly-level design for additive manufacturing methodology". In *IDMME-virtual concept*.
- Rosen, D.W., 2007, "Computer-aided design for additive manufacturing of cellular structures", *Computer-Aided Design & Applications*, Vol. 4, No. 5, pp. 585-594.
- Rosen, D.W., 2014, "Research supporting principles for design for additive manufacturing", *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 9:4, pp. 225-232.
- Samperi, M.T., 2014, "Development of Design Guidelines for Metal Additive Manufacturing and Process Selection", Dissertação de mestrado, The Pennsylvania State University.
- Seepersad, C.C., Jared, A., Conner, S., 2017, "The need for effective design guides in additive manufacturing". In: *Proceedings of the 21 st International Conference on Engineering Design (ICED17)*.
- Sossou, G., Demoly, F., Montavon, G., Gomes, S., 2018, "An additive manufacturing oriented design approach to mechanical assemblies.". *J. of Comp. Des. and Eng.*, Vol. 5, pp. 3–18.
- Tang, Y., Zhao, Y.F., 2016, "A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 22, No. 3, pp. 569–590.
- Thomas, D., 2009, "The Development of Design Rules for Selective Laser Melting", (*Dissertação de Doutorado*) University of Wales.
- Thompson, M.K. et al., 2016, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, *CIRP Annals*" – *Manufacturing Technology*, Vol. 65, pp. 737–760.
- Twelsiek, B. L.-, Klahn, C., Meboldt, M., 2016, "Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing", *Procedia CIRP* 50, pp. 408–413.
- Volpato, N., de Carvalho, J., 2017. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Edgar Blücher.
- Wiberg, A., Persson, J., Ölvander J., 2019, "Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software, *Rapid Prototyp. J.*, Vol. 25 (6), pp.1080–1094.
- Yang, S., and Zhao, Y. F., 2015. "Additive manufacturing enabled design theory and methodology: a critical review". *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 80 No. (1-4), pp. 327–342.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) o(s) único(s) responsável(is) pelas informações incluídas neste trabalho.

DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING: REVIEW

Sergio Fernando Lajarin

Universidade Federal do Paraná, DEMEC, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210 CEP 81531-990, Curitiba/PR
espanhol@gmail.com

Lucas Aurélio Stelziner Fischer

Universidade Federal do Paraná, DEMEC, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210 CEP 81531-990, Curitiba/PR
lucas.stelziner@gmail.com

Neri Volpato

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, DAMEC, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 - Bloco K, Curitiba/PR.
nvolpato@utfpr.edu.br

Abstract. Additive Manufacturing (AM) is a manufacturing process in which the material is added layer by layer to build a physical part. It is a relatively new process, when compared to traditional ones, and it has aroused increasing interest, and as a consequence, the technological development in the area is very large. Due to the unique capabilities of the process, greater freedom and design alternatives can be employed and this has required adaptation to current manufacturing design practices. The concept of Design for Additive Manufacturing (DFAM) is recent and several approaches and methodologies are proposed in the literature. In this work, some attempts to group these methodologies are presented. Case studies with DFAM applications with different focuses and scopes are commented. However, it is observed that the concept of DFAM is still in its infancy, the methodologies have gaps and many are superficial. There is not enough understanding of when and how to design for AM, they do not consider the ability of some AM processes to produce functional assemblies and many of the technologies needed to support it are not yet mature. The maturation of DFAM methodologies is fundamental for the massive penetration of AM in the industry. Most of the methodologies have as a strategic step the topological optimization and creation of cellular materials (lattice structures or others) that add innumerable possibilities, but which also present some design and application difficulties.

Keywords: Additive Manufacturing. 3D printing. DFAM. Topological optimization. Cellular materials.

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.