



## Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas

### *Metal additive manufacturing advances: techniques, materials and machines*

### *Avances en la fabricación aditiva en metales: técnicas, materiales y máquinas*

### *Progrès de la fabrication additive métalliques: techniques, matériaux et machines*

**João Francisco Bueno Gomes**   
jfbgomes10@gmail.com  
Universidade de Taubaté  
(Unitau)

**Filipe Wiltgen**   
lfwbarbosa@gmail.com  
Universidade de Taubaté  
(Unitau)

#### Resumo

Com o advento de novas técnicas de manufatura aditiva, tornou-se possível a introdução de diversos metais como matéria-prima e isso tem sido uma revolução para indústria, pois permite muitas possibilidades. Neste artigo serão apresentadas técnicas de impressão 3D em metais, as matérias-primas metálicas mais utilizadas e os custos da manufatura aditiva em comparação com a manufatura subtrativa. O objetivo é apresentar as técnicas mais utilizadas em manufatura aditiva em metais aplicadas na indústria de tecnologia mecânica (aeronáutica, aeroespacial e automobilística) alinhando as inovações, expectativas e dificuldades enfrentadas por essas técnicas na fabricação de componentes que necessitam de grande resistência estrutural. Por fim, serão apresentadas possíveis aplicações no futuro próximo.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva. Metais. Impressão 3D. Componentes aeronáuticos.

#### Abstract

With the advent of new additive manufacturing techniques, it became possible to introduce several metals as raw material, and this has been a revolution for industry, as it allows many possibilities. This article will present 3D printing techniques on metals, the most used metallic raw materials, and the costs of additive manufacturing compared to subtractive manufacturing. The objective is to present the most used techniques in additive manufacturing in metals applied in the mechanical technology industry (aeronautics, aerospace, and automobile) aligning the innovations, expectations, and difficulties faced by these techniques in the manufacture of components that require great structural resistance. Finally, possible applications will be presented shortly.

**Keywords:** Additive manufacturing. Metals. 3D Printing. Aeronautical components.

#### Resumen

Con la llegada de nuevas técnicas de fabricación aditiva, ahora es posible la introducción de diversos metales como materia prima y esto es revolucionario para la industria, permitiendo muchas posibilidades. En este trabajo serán presentadas técnicas de impresión 3D en metales, las materias primas metálicas más utilizadas y los costes de la fabricación aditiva en comparación con la fabricación substractiva. El objetivo es presentar las técnicas más utilizadas en la fabricación aditiva en metales aplicadas en la industria de tecnología mecánica (aeronáutica, aeroespacial y automovilística) alineando las novedades, expectativas y dificultades enfrentadas por estas técnicas en la fabricación de componentes que piden

gran resistencia estructural. Por fin, serán presentados posibles usos en un futuro cercano.

**Palabras-clave:** Fabricación aditiva. Metales. Impresión 3D. Componentes aeronáuticos.

### Résumé

Avec l'avènement de nouvelles techniques de fabrication additive, il est devenu possible d'introduire plusieurs métaux comme matière première. Cela a été une révolution pour le secteur, car il permet de nombreuses possibilités. Cet article présente des techniques d'impression 3D métal. C'est-à-dire, les matières premières métalliques les plus utilisées et les coûts de fabrication additive par rapport à la fabrication soustractive. L'objectif est de présenter les techniques les plus utilisées en fabrication additive métallique appliqués dans le secteur des technologies mécaniques (aéronautique, aérospatiale et automobile). On veut aussi aligner les innovations, les attentes et les difficultés rencontrées par ces techniques dans la fabrication des composants qui nécessitent une grande résistance structurelle. Enfin, des possibles applications dans un avenir proches sont présentées.

**Mots-clés:** Fabrication additive. Métaux. Impression 3D. Composants aéronautiques.

## 1 Introdução

A manufatura aditiva (MA) começou a tomar forma na década de 80 (ALCALDE, 2019; WILTGEN; ALCALDE, 2019; ALCALDE; WILTGEN, 2018; WILTGEN, 2019) com o advento do CAD (*computer-aided designs*), o qual impulsionou o projeto e a modelagem de peças mecânicas de forma mais eficiente e rápida.

A possibilidade de manipular uma peça desenhada em um ambiente computacional do tipo CAD, em 3D, permite a visualização de como a peça pode ficar quando fabricada, além de incorporar rápidas formas de modificar os desenhos de um projeto. O desenho de uma peça em modelo físico tridimensional permite a análise completa do desenho do projeto, a implementação de aperfeiçoamentos necessários e a identificação de interferências funcionais, incluindo a possibilidade de movimentação de peças para observar sua montagem ou mesmo o funcionamento do mecanismo projetado.

Entretanto, a partir da ideia de unir os projetos desenhados em CAD com as máquinas de fabricação mecânica capazes de executar a construção/usinagem de peças com informações vindas de desenhos/modelos e/ou códigos computacionais que o caminho para a fabricação de protótipos começou a se tornar mais viável e rápida (WILTGEN, 2019).

Na atualidade, propor a construção de um protótipo, seja pelos métodos tradicionais (subtrativos) de fabricação, seja pelos métodos modernos (aditivos) de fabricação, é algo relativamente simples de ser realizado.

A prototipagem rápida (WILTGEN, 2019) é, sem dúvida, um marco no desenvolvimento e na inovação tecnológica, pois permite acelerar os processos de desenvolvimento de produtos na realização de ensaios em ambiente controlados (*DT&E – developmental test and evaluation*), ajudando a obter de forma mais rápida a maturidade tecnológica (*TLR – technology readiness level*) esperada para o lançamento de um produto no mercado.

Entre as tecnologias existentes atualmente em prototipagem rápida, destaca-se a manufatura aditiva via impressão 3D. As técnicas de impressão 3D vêm permitindo, ao longo dos últimos anos, o desenvolvimento e construção de novas máquinas, capazes de fabricar peças com os mais diferentes tipos de materiais (ALCALDE; WILTGEN, 2018). Nesta pesquisa, o material de interesse é o metal impresso em 3D com diferentes técnicas, diferentes dispositivos e diferentes tipos de metais e ligas metálicas, que podem ser empregados para a construção na indústria aeronáutica, aeroespacial e automobilística.

A integração da manufatura aditiva com a indústria de fabricação permite a criação de peças complexas, que antes eram difíceis ou impossíveis de serem fabricadas pelos métodos tradicionais, com a explícita economia de matéria-prima obtida por meio da inserção apenas na quantidade necessária para confeccionar a peça (ALCALDE; WILTGEN, 2018; WILTGEN, 2019).

## 2 Metodologia

### 2.1 Impressão de metais

A necessidade de aumentar a velocidade de criação e implementação de produtos tem feito da manufatura aditiva um aliado no desenvolvimento de novos produtos e sua utilização na indústria, os quais vêm crescendo gradualmente nos últimos anos e gerando inovações (LANGEFELD, 2017; THOMAS; VENKAT, 2016; BRIANTAIS, 2017).

Conforme pode ser observado no comitê de normas técnicas (ASTM, 2019), existem sete tipos de processo de manufatura aditiva, entretanto as técnicas que realmente são aplicáveis a metais são quatro: *powder bed fusion (PBF)*, *direct energy deposition (DED)*, *binder jetting (BJ)* e *sheet lamination (SL)*.

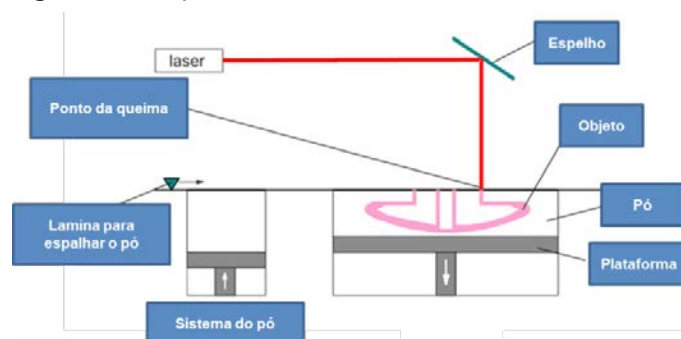
- *Técnica Powder Bed Fusion (PBF)*

Nesse processo de MA do tipo fusão em leito de pó, a impressão 3D é baseada na utilização de um feixe de laser. O feixe de laser é utilizado para fundir regiões que se encontram em um leito de pó metálico. Essa tecnologia é utilizada na produção industrial de peças altamente complexas e em pequenos lotes, no qual se faz necessário grande precisão dimensional. Normalmente, é utilizado em áreas aeroespaciais, e também na indústria automobilística destinada ao auxílio de equipes de corrida de automóveis. A seguir são apresentados os três principais métodos que utilizam a técnica PBF como princípio de impressão 3D em metal (ASTM F42, 2019).

- ▶ *Selective Laser Melting (SLM)*

A técnica de derretimento seletivo a laser (SLM) é semelhante à técnica SLS que é aplicada em plásticos e cerâmicas. A principal diferença entre essas técnicas é a fundição de pó metálico com a intenção de obter propriedades mecânicas semelhantes à de matérias-primas utilizadas na fabricação tradicional. Com a obtenção de melhores propriedades mecânicas é possível aumentar a possibilidade de utilização de componentes em regiões sujeitas a elevados esforços mecânicos. Esse processo, entretanto, possui algumas desvantagens, como as reações de absorção do feixe laser de forma diferente para cada tipo de metal, levando a tensões superficiais e aumentando a tensão térmica, podendo provocar trincas (YAKOUT *et al.*, 2018). A Figura 1 mostra um esquema de uma máquina SLM.

**Figura 1** – Esquema de funcionamento da técnica SLM

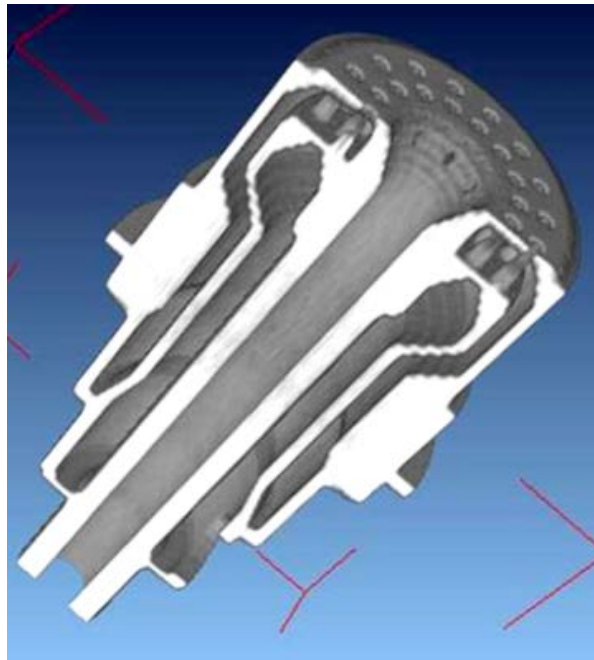


Fonte: Adaptado de Metal AM, 2019.

Nessa técnica podem ser impressos componentes com pó de um único tipo de metal ou misturas de pó metálico, formando ligas. Atualmente, esse processo possui limitação no que tange a matéria-prima metálica utilizada, uma vez que nem todos os tipos de metais podem ser utilizados nesse processo (YAKOUT *et al.*, 2018). Nessa técnica, SLM em metal, eventualmente pode ocorrer o encolhimento das dimensões do

componente devido a instabilidades na fusão do pó metálico. Dessa forma, todas as medidas físicas devem ser verificadas na análise dimensional. Esse método vem sendo utilizado pela NASA para desenvolver peças de alta complexidade. Em 2013, foi desenvolvido um injetor de motor foguete (NASA, 2013; MCMAHAN, 2013; KRAFT *et al.*, 2013) com essa tecnologia, cuja grande vantagem apontada pela NASA é a possibilidade de integrar muitas partes em uma única peça. Na fabricação tradicional do injetor do motor foguete da NASA, geralmente, eram necessárias construir e montar 115 (cento e quinze) peças. Com a utilização da MA via a técnica SLM, porém, foi possível reduzir de 115 peças para apenas duas peças (CASTELLS, 2016). Pode ser vista na Figura 2 a geometria complexa do injetor do motor foguete da NASA feito através da técnica SLM.

**Figura 2** - Injetor de motor foguete da NASA construído com a técnica SLM

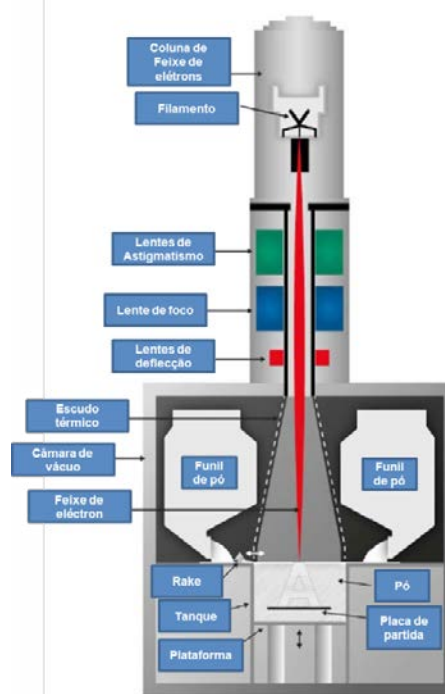


Fonte: NASA, 2013 e Kraft *et al.*, 2013.

► *Electron Beam Melting (EBM)*

O método de impressão 3D por fusão por feixe de elétrons (EBM) necessita de que o pó metálico seja pré-aquecido e que o processo seja feito a vácuo. O derretimento do pó de metal é feito através de um feixe de elétrons, diferentemente do SLM, que utiliza o laser para tal função. Esse método é similar ao SLM, mas apresenta maior complexidade operacional e rapidez na impressão 3D dos componentes fabricados quando comparados ao SLM. (YAKOUT *et al.*, 2018). Na Figura 3 é possível ver um esquema do método EBM em detalhes.

**Figura 3 - Esquema de funcionamento da técnica EBM**



Fonte: Adaptado de Sames 2016.

► *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*

Diferentemente do método SLM, a técnica de sinterização direta metal laser (DMLS) consegue construir peças com quase todo tipo de material metálico. A principal diferença entre eles é a temperatura do *powder bed fusion*, com o intuito de fundir ou sinterizar (DELGADO, 2012; DESIGNIFYING, 2018).

A técnica consiste em “espalhar” uma camada de pó metálico na superfície em que se deseja imprimir em 3D. Em seguida, é aplicado o feixe de laser de tal maneira que ocorre a sinterização do pó metálico, ocasionando, ao mesmo tempo, o derretimento de parte do pó metálico (CASTELLS, 2016). A técnica é repetida quantas vezes forem necessárias até que se obtenha a geometria desejada.

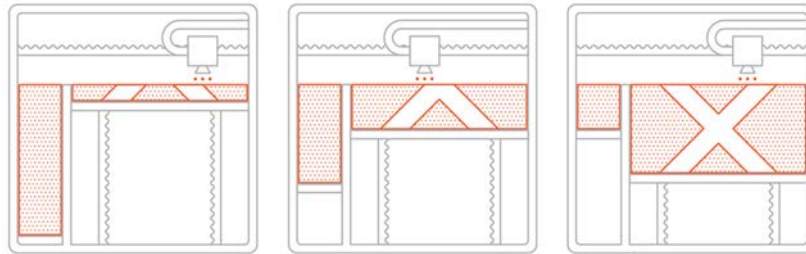
Essa técnica possui a vantagem de não criar tantas tensões residuais internas nas peças e, assim, consegue suprimir os defeitos na estrutura interna das peças fabricadas. O método DMLS, por ser uma técnica que permite utilizar diversos tipos de metais, tem custo elevado quando comparado a outras técnicas, sendo a sua utilização restrita a poucas aplicações, como na fabricação de protótipos da indústria aeroespacial (CASTELLS, 2016).

• *Técnica Binder Jetting (BJ)*

O método de jateamento por enfardamento (BJ) é realizado em temperatura ambiente, no qual o pó de metal é impresso, camada por camada, utilizando-se de um agente aglutinante que faz a ligação ou colagem de uma camada na outra, permitindo a impressão em 3D (REDWOOD *et al.*, 2017).

Essa impressão 3D é semelhante à de uma impressora 2D, cuja principal diferença é a plataforma que se desloca para baixo conforme a peça vai sendo impressa, como pode ser observado na Figura 4, de maneira similar a mecânica utilizada na SLS.

**Figura 4 - Esquema de funcionamento da técnica BJ**



Fonte: Redwood, 2017.

Devido à impressão 3D ser realizada em temperatura ambiente, para que o metal venha a possuir resistência estrutural, é necessário realizar um pós-processamento, com a finalidade de remover o agente aglutinante e, concomitantemente, ter uma peça metálica resistente.

Existem dois métodos de pós-processamento nessa técnica: infiltração e sinterização, sendo que a sinterização é a técnica mais utilizada por sua maior resistência estrutural e térmica quando comparada com a técnica de pós-processamento por infiltração (3D HUBS, 2019).

Na técnica de infiltração, o agente aglutinante é removido, criando uma peça altamente porosa. Posteriormente, essa peça é aquecida em forno industrial junto com um metal de baixo ponto de fusão, de modo que os espaços vazios são preenchidos por esse metal e, assim, obtém-se uma peça bimetálica.

No método de sinterização, a peça é colocada em forno de alta temperatura, no qual o agente aglutinante é “queimado” e o metal é sinterizado, obtendo-se a peça com alta densidade. Esse método tem a desvantagem de que, no processo, a peça pode diminuir cerca de 20% de seu tamanho original (3D HUBS, 2019). Para compensar essa perda dimensional, é necessário imprimir o componente com dimensões cerca de 20% maiores, contabilizando seu encolhimento.

- *Técnica Direct Energy Deposition (DED)*

A deposição por energia direta (DED) é tipicamente formada por um braço multi-eixo que, através de um bocal/queimador, funde o material metálico e o deposita sobre uma superfície.

É um processo que possui duas técnicas *3D cladding* (revestimento) e *3D welding* (soldagem) (YAKOUT *et al.*, 2018). A primeira técnica consiste em utilizar um pó metálico, que é fundido por um feixe de laser ou uma tocha de plasma. Esse método é mais utilizado para reparar peças ou adicionar metal a peças fabricadas.

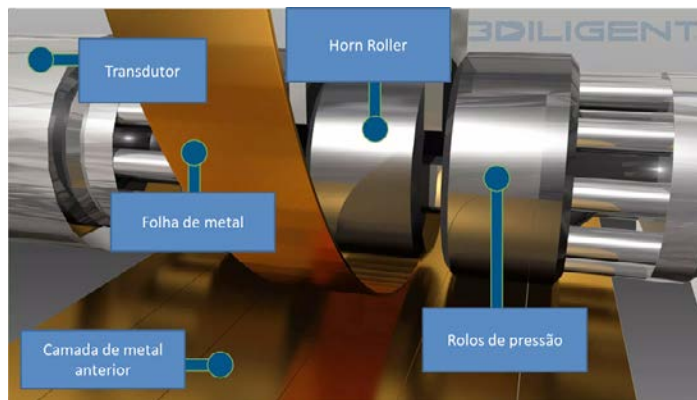
A técnica chamada de *3D welding*, também conhecida como *shaped metal deposition* (SMD), utiliza arames metálicos em vez de pó. Esse arame de metal é derretido e se liga às camadas anteriores através do processo de soldagem (YAKOUT *et al.*, 2018). A técnica é promissora para a utilização em componentes que exijam resistência estrutural, pois produz peças com alta resistência e há grande quantidade de materiais que podem ser empregados. Por outro lado, possui como desvantagem a pouca acuracidade geométrica e o controle difícil da “poça” de solda.

- *Técnica Sheet Lamination (SL)*

Dentro da técnica de laminação em folha (SL), pode-se destacar a *ultrasonic additive manufacturing* (manufatura aditiva ultrassônica - UAM), a qual utiliza “folhas” de metal para a fabricação de componentes. A união entre as “folhas metálicas” é feita através de soldagem ultrassônica (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2019).

O processo é feito em baixa temperatura e requer pouca energia, uma vez que as folhas metálicas não são derretidas. Os componentes fabricados através da laminação não são aplicáveis em áreas estruturais, pois possuem baixa resistência estrutural. A simplificação do processo de fabricação através da UAM pode ser visto na Figura 5.

**Figura 5** - Esquema de funcionamento da técnica UAM



Fonte: Adaptado de 3D Iligent, 2019.

## 2.2 Manufatura aditiva em metais na indústria

### 2.2.1 Indústria aeroespacial e aeronáutica

A manufatura aditiva via impressão 3D tem sido inserida na indústria aeroespacial devido às suas características únicas de confecção de peças complexas. Tem caminhado para possibilitar sua utilização na indústria aeronáutica. Esse tipo de indústria exige peças com geometria altamente complexas, com exigência de baixo peso e alta resistência estrutural, e a produção é, geralmente, de baixa escala.

As técnicas para impressão 3D em metais nesse tipo de indústria que mais se destacam são a SLM e a EBM, porque são capazes de fabricar peças altamente complexas com baixo volume de produção e com o mínimo peso possível (YAKOUT *et al.*, 2018). Atualmente, as matérias-primas mais utilizadas são o titânio, as ligas de alumínio e alguns tipos de aço (COLLINS; CORE, 2018).

Para alguns tipos de componentes essas técnicas vêm sendo utilizadas, principalmente em peças que não são tão exigidas estruturalmente e que, normalmente, são confeccionadas em ligas de titânio Ti6Al4V e/ou Incomel 718. Várias empresas no mundo estão utilizando em suas linhas de produção a MA. Entre elas se podem destacar a GE e a Airbus (ÅLGÅRDH, 2018). Essas empresas têm investido maciçamente para que, até o ano de 2020, haja um grande aumento na produção através dessa técnica.

A Figura 6 mostra o bico de combustível desenvolvido pela GE e a Figura 7 mostra uma válvula em titânio desenvolvida pela Liebherr Aerospace, no qual conseguiram diminuir em 35% o peso em comparação com a versão feita em manufatura convencional.

**Figura 6** - Bicos de combustível do motor Leap 1 feito através da MA



Fonte: Billy, 2017.

**Figura 7** - Válvula do atuador de spoiler do A380 impresso com MA



Fonte: Bramm, 2017.

No Quadro 1 são observadas algumas empresas e os seus respectivos componentes fabricados via MA.

**Quadro 1** - Empresa vs. componentes fabricados por MA.

<b>EMPRESA</b>	<b>TIPO DE COMPONENTE</b>
<i>GE Aviation</i>	Bicos de combustível do motor Leap 1A
<i>Airbus</i>	Parede divisória de aeronave
<i>Comac</i>	Longarina de asa
<i>LiebherrAerospace</i>	Válvulas hidráulicas
<i>Honeywell</i>	Componentes para motor
<i>Boeing</i>	Peças em Ti6Al4V
<i>GE Aviation</i>	Bicos de combustível do motor Leap 1A

Fonte: Ålgårdh, 2017 e Bramm, 2017.

No caso da *Boeing* foram adotados alguns componentes produzidos pela empresa *Norsk Titanium*, que conseguiu certificação de um processo DED (ALWYN, 2017). Estima-se que a empresa *Boeing* economizará entre 2 e 3 milhões de dólares em cada avião ao utilizar o método de manufatura aditiva (WOHLERS, 2019; JACKSON, 2019).

Os desafios para maior implementação dessa técnica na indústria aeronáutica são:

- *Maior robustez e qualificação de componentes, garantindo que a qualidade seja sempre a mesma;*
- *Pós-processamento para melhorar o acabamento superficial e a estrutura interna, removendo qualquer tipo de tensão residual para obter menor fadiga dos componentes;*
- *Métodos de inspeção não destrutiva precisam ser desenvolvidos para que seja garantida uma produção em série desses componentes;*
- *Melhorar as propriedades mecânicas de materiais e desenvolver a utilização de aços de alta resistência;*
- *Garantir maior velocidade de produção, para que seja possível a serialização da produção;*
- *Projetos pensados exclusivamente para fabricação via manufatura aditiva, uma nova filosofia conceitual de projeto, no qual o projetista necessita pensar na forma de manufatura aditiva;*
- *Certificação de matérias-primas e processos por parte da autoridade aeronáutica e seus respectivos órgãos fiscalizadores (FAA, ANAC e EASA).*

### 2.2.2 Indústria automobilística

Assim como a indústria aeroespacial e aeronáutica, a indústria automobilística tem vários componentes complexos que são candidatos a serem integrados, otimizados e fabricados em manufatura aditiva. Acredita-



se que, atualmente, aproximadamente 14% das peças feitas em MA na indústria automobilística em produção em série são utilizadas em motores de veículos (ÄLGÄRDH, 2017).

Quando a MA é utilizada com a finalidade de substituir a manufatura convencional (subtrativa e formativa), obtém-se uma otimização na geometria, reduzindo quantidade de massa, componentes e complexidade, como pode ser visto nas Figuras 8 e 9.

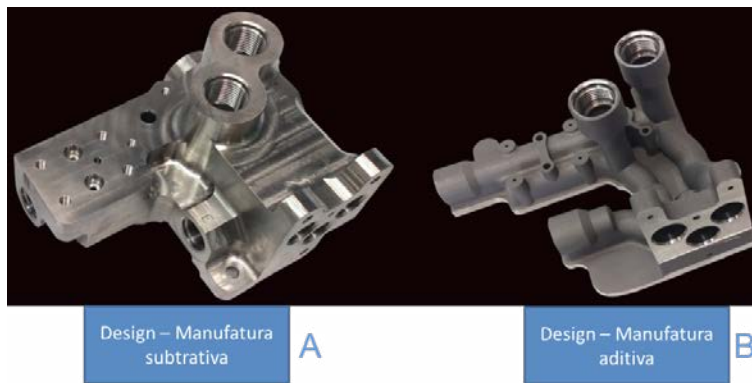
**Figura 8** - Comparação entre manufatura subtrativa (A) e manufatura aditiva (B)



Fonte: Adaptado de Älgårdh, 2017.

3D Iligent, 2019

**Figura 9** - Comparação entre manufatura subtrativa (A) e manufatura aditiva (B)



Fonte: Wohlers, 2019.

Entre as vantagens, estão: a customização de peças automotivas de diversos modelos de veículos; mudanças nas geometrias de peças que provoquem menor consumo de combustível; melhor eficiência; além de inúmeros tipos de adaptações que podem ser feitas para ajustar diferentes tipos de peças em diferentes tipos de veículos.

### 2.3 Tipos de metais utilizados em cada tipo de tecnologia

O Quadro 2 mostra as tecnologias de impressão de metais e as principais matérias-primas utilizadas.

**Quadro 2** - Empresa vs. componentes fabricados por MA.









TECNOLOGIA	MATÉRIAS-PRIMA UTILIZADAS
SLS	Al, Ti, Ligas de Ni, CoCr, Steel
SLM	Al, Ti, Ligas de Ni, CoCr, Steel
EBM	Al, Ti, Ligas de Ni, CoCr, Steel
DMLS	Al, Ti, Ligas de Ni, CoCr, Steel
BJ	WC, W, CoCr, Steel/ Bronze, Steel, Inco
DED	Ti, Ligas de Ni, Steel, Co, Al
UAM	Al, Cu

Fonte: Langefeld, 2018, 3D Diligent, 2019 e Designifying, 2019.

**2.4 Estimativa de custo da manufatura aditiva em metais**

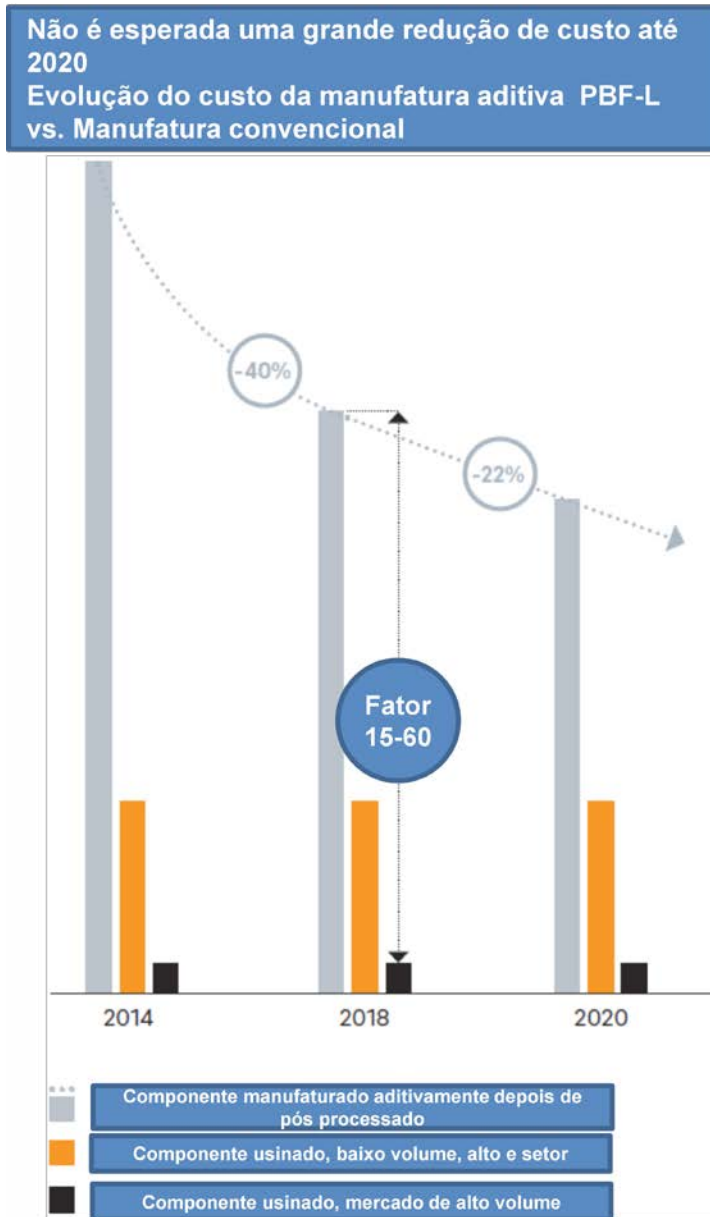
Para que a MA se torne atrativa em um mercado de alta demanda, como a indústria automotiva, é necessário que exista um fator menor que 10 (dez) no custo quando comparado à produção convencional (LANGEFELD, 2018). Nessa comparação, foi adotado o processo *powder bed fusion* com utilização de laser (PBF-L), pois é o processo mais utilizado na indústria (LANGEFELD, 2018). Na Figura 10 pode-se ver a redução dos custos em MA para os próximos anos e, no Quadro 3, observa-se a maturidade dos processos e o seu respectivo custo.

**Quadro 3** - Empresa vs. componentes fabricados por MA.

TECNOLOGIA	MATURIDADE	CUSTO
PBF-L (SLS, SLM, DMLS)	Maturidade atingida para indústrias específicas 	
PBF-EB	Maturidade atingida para indústrias específicas 	
DED	Até agora usado principalmente para camadas (revestimentos) 	
BJ	Maturidade atingida para aplicação em nichos 	

Fonte: Adaptado de Langefeld, 2018.

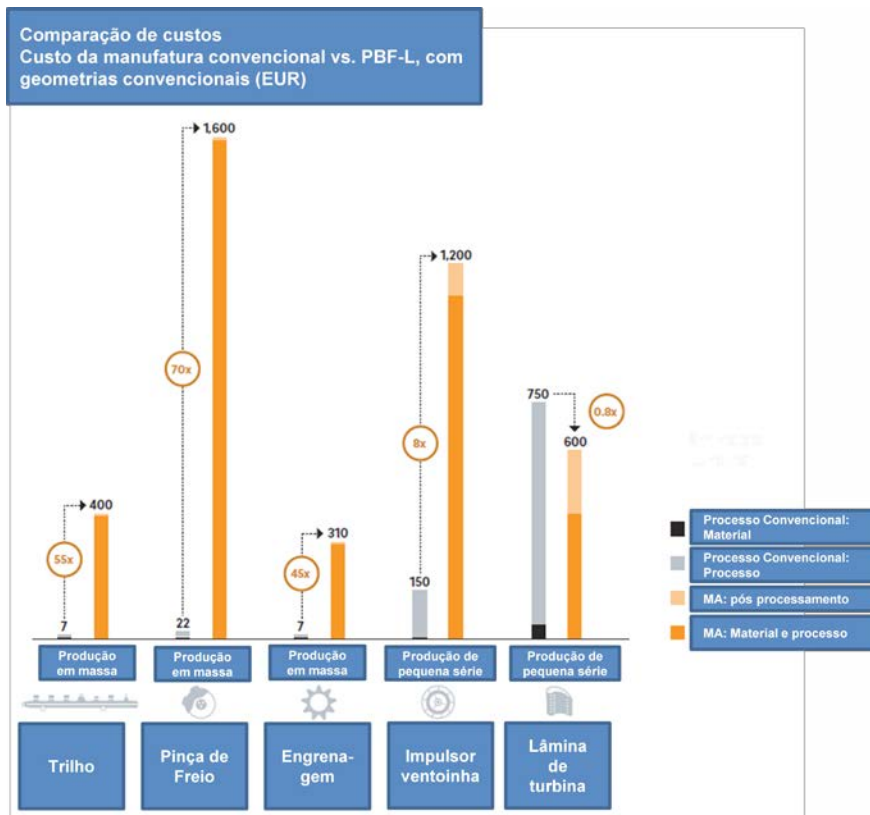
**Figura 10** - Comparação entre custo de produção em manufatura subtrativa e aditiva



Fonte: Adaptado de Langefeld, 2018.

Comparando-se alguns componentes que são fabricados em MA, pode-se verificar que o custo é alto se comparado ao processo convencional para a produção em massa. Quando se fala de componentes de baixa demanda, a diferença entre as duas tecnologias não é tão diferente, como pode ser visto na Figura 11.

**Figura 11** - Custo de produção manufaturas do tipo subtrativa vs. Aditiva

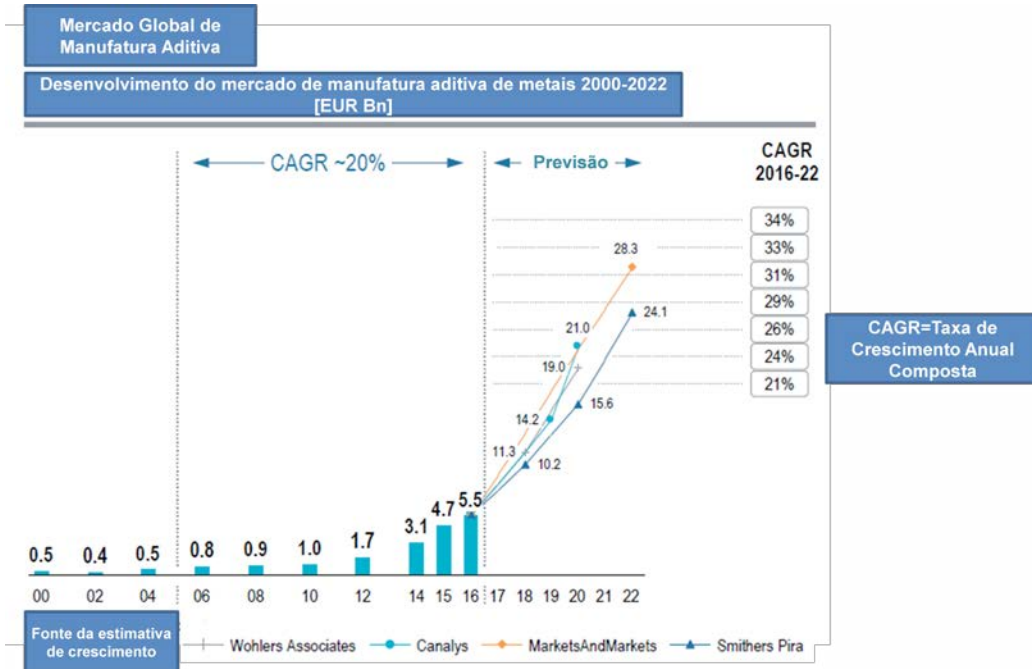


Fonte: Adaptado de Langefeld, 2018.

### 2.5 Expectativa de utilização da manufatura aditiva em metais no futuro

Para os próximos anos haverá crescimento da MA, conforme estudo publicado por (LANGEFELD, 2017). A Figura 12 mostra, com base em informações vinda de várias consultorias, a previsão de crescimento da manufatura aditiva nos próximos anos. Um grande indicativo de que a manufatura aditiva de metais está avançando devido ao comprometimento das entidades de normas técnicas, que estão gerando normas específicas para esse tipo de tecnologia. A ASTM desenvolveu o comitê F42 (ASTM, 2019), cuja finalidade é formular normas relativas a MA. Além dessa entidade, o FAA fez um *workshop*, no ano de 2016, no qual mostrou as suas atividades, e entre elas, a criação do AMNT (Equipe Nacional de Manufatura Aditiva), da qual farão parte os principais fabricantes de MA, e o engajamento de diversos grupos de trabalho com a indústria (KABBARA, 2016).

**Figura 12 - Previsão de crescimento da manufatura aditiva**



Fonte: Adaptado de Langefeld, 2017.

### 3 Resultados e discussão

Tendo em vista as tecnologias apresentadas neste artigo, cada empresa deverá avaliar e verificar quais componentes são candidatos a serem manufaturados em tecnologia aditiva. Atualmente, a MA de metais está presente na fabricação de jóias, próteses dentárias e peças mais complexas. Na área aeronáutica e aeroespacial, a MA em metais está sendo utilizada para fabricar componentes específicos, em especial de peças que necessitam ter pouco peso, com alta resistência mecânica e geometrias complexas.

O desafio atual da impressão 3D em metal é conseguir aumentar a quantidade de tipos de metais utilizáveis, como os aços de ligas com alta resistência mecânica. Esses metais são frequentemente utilizados na indústria aeroespacial e aeronáutica, entretanto não figuram entre as matérias-primas disponíveis atualmente em MA. Componentes que sofrem muitos carregamentos cíclicos (fadiga) possuem pouca maturidade tecnológica devido à falta de informações que mostrem o que ocorre com o comportamento dessas matérias-primas em MA quando cicladas (curvas SN e curvas EN). Além disso, será necessário o desenvolvimento de métodos de inspeção não destrutivos compatíveis com essa nova tecnologia.

Na área da aeronáutica existem alguns obstáculos há vencer, como a certificação de processos, a criação de padrões específicos para inspeção e de testes de fabricação de componentes manufaturados de forma aditiva. Entretanto espera-se que, para os próximos anos, a MA consiga alcançar novas aplicações objetivando a confecção de componentes de baixa demanda. Além disso, a possibilidade de produzir peças integradas, leves, rígidas e complexas, será, sem dúvida, um grande diferencial construtivo.

Em um futuro próximo acredita-se que as novas tecnologias disruptivas de manufatura aditiva venham a integrar efetivamente as indústrias e os processos produtivos, apoiando o desenvolvimento da manufatura avançada e fazendo, assim, parte definitiva da produção industrial mundial. Portanto, modificando permanentemente a forma de produzir novos produtos na indústria.

## Referências

- ALCALDE, E. **Prototipagem rápida aditiva**: aplicação em dispositivo funcional de auxílio humano para membros superiores. 2019. 141 f. / Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté (UNITAU), Taubaté, 2019.
- ALCALDE, E.; WILTGEN, F., Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro, **Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté**, Taubaté, v. 24, n. 2, p. 12-20, 2018.
- ÅLGÅRDH J. *et al.*, **State-of-the-Art for Additive Manufacturing of Metals**. [S. l.]: Metalliska Material, 2017. Disponível em: [https://www.metalliskamaterial.se/globalassets/3-forskning/rapporter/2016-03898---state-of-the-art-for-additive-manufacturing-of-metals-2\\_1.pdf](https://www.metalliskamaterial.se/globalassets/3-forskning/rapporter/2016-03898---state-of-the-art-for-additive-manufacturing-of-metals-2_1.pdf). Acesso em: 15 jul. 2019.
- ALWYN, S. Printed titanium parts expected to save millions in Boeing dreamliner costs. **Reuters**, 2017. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-norsk-boeing/>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- ASTM. **ASTM F42/ISO TC 261 Develops Additive Manufacturing Standards**. [S. l.:s. d.]. Disponível em: [https://www.astm.org/COMMIT/F42\\_AMStandardsStructureAndPrimer.pdf](https://www.astm.org/COMMIT/F42_AMStandardsStructureAndPrimer.pdf). Acesso em: 15 jul. 2019.
- BILLY W. *et al.* **The value of additive manufacturing: future opportunities**. Briefing paper N2, Technical Report, Institute for Molecular Science and Engineering, Imperial College London, September, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/323079276\\_The\\_value\\_of\\_additive\\_manufacturing\\_future\\_opportunities/](https://www.researchgate.net/publication/323079276_The_value_of_additive_manufacturing_future_opportunities/). Acesso em: 06 jul. 2019.
- BRAMM, U. **First ever 3D printed primary flight control component from Liebherr** – Aerospace Flown on an Airbus Aircraft. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.liebherr.com/>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- BRIANTAIS, L. **Metal additive manufacturing**: process, conception and post-treatments. 2017. 117 f. Dissertação (Màster Universitarien Enginyeria d'Automoció), Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona, 2017.
- CASTELLS, R. **DMLS vs SLM 3D printing for metal manufacturing**. [S. l.]: Element Materials Technology, 2016. Disponível em <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- COLLINS, R.; CORE, B. **Additive manufacturing and light weight materials for aerospace and defense**. [S. l.]: IDTechEx, 2018.
- DELGADO, J. *et al.* Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with Iron - based materials. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], 60, 60, p. 601–610, 2012.
- DESIGNIFYING. **3D printing dmls direct metal laser sintering**. [Haryana], 2018. Disponível em <http://www.designifying.com/blog/3d-printing-technology/3d-printing-dmls-direct-metal-laser-sintering/>. Acesso em: 12 jul. 2019.
- GOEHRKE, S. **A look ahead in 3D printing with Gartner's Pete Basiliere**. Fabbaloo, 2019. Disponível em <https://www.fabbaloo.com/blog/2019/1/10/a-look-ahead-in-3d-printing-with-gartners-pete-basiliere>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- JACKSON, B. **SAE international releases first specifications for no risk titanium rapid plasma deposition**. [S. l.]: 3D Printing Industry, 2019. Disponível em <https://3dprintingindustry.com/news/sae-international-releases-first-specifications-for-norsk-titanium-rapid-plasma-deposition-149210/>. Acesso em: 15 jul. 2019.

- KABBARA, J.; GORELIK, M. **FAA Perspectives on Additive Manufacturing, On Demand**. Mobility Workshop Additive Manufacturing, FAA Perspectives, [S. l.], 2016. Disponível em: <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/tc16-15.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- KRAFT, R. *et al.* NASA tests limits of 3-D printing with powerful rocket engine check. **NASA**, 23 ago. 2013. Disponível em: <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/3d-printed-rocket-injector.html>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- LANGFELD, B. *et al.* **Advancements in metal 3D printing**. [S. l.]: Roland Berger, 2018. Disponível em: [https://www.rolandberger.com/publications/publication\\_pdf/Roland\\_Berger\\_Additive\\_Manufacturing.pdf](https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/Roland_Berger_Additive_Manufacturing.pdf). Acesso em: 06 jul. 2019.
- LANGFELD, B. *et al.* **Additive manufacturing in aerospace and defense**. [S. l.]: Roland Berger, 2017. Disponível em: [https://www.rolandberger.com/publications/publication\\_pdf/roland\\_berger\\_additive\\_manufacturing.pdf](https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_additive_manufacturing.pdf). Acesso em: 06 jul. 2019.
- LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. **Sheet Lamination**. [S. l.]: Additive Manufacturing Research Group. Disponível em: <https://www.lboro.ac.uk>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- MCMAHAN, T. **Hot-fire tests show 3-D printed rocket parts rival traditionally manufactured parts**. NASA, 24 jul. 2013. Disponível em <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/3dprinting.html>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- METAL AM. **Metal additive manufacturing processes**. [S. l.: s. d.]. Disponível em: <https://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/metal-additive-manufacturing-processes>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- NASA tests 3D-printed rocket engine fuel injector. **BBC News**, Londres, 15 jul. 2013. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/technology-23313921>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- REDWOOD, B.; SCHÖFFER, F.; GARRET, B. **The 3D printing handbook – technologies: design and applications**. Amsterdam: 3D Hubs B.V., 2017.
- SAMES W. J. *et al.* The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. **International Materials Reviews**, [S. l.], v. 61, n. 5, p. 315-360, 2016.
- THOMAS, D.; VENKAT, R. 3D Metal Printing Technology. **IFAC-PapersOnLine**, [S. l.], v. 49, n. 29, p. 103-110, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316325496>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- WILTGEN, F. Protótipos e prototipagem rápida aditiva sua importância no auxílio do desenvolvimento científico e tecnológico. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 10., COBEF, 10., São Carlos, 5-7 ago., 2019. **Anais [...]**. São Carlos: UFSCar. 2019
- WILTGEN, F.; ALCADE, E. Prototipagem rápida aditiva aplicada em dispositivos funcionais de auxílio humano. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 10., COBEF, 10., São Carlos, 5-7 ago., 2019. **Anais [...]**. São Carlos: UFSCar. 2019.
- WOHLERS ASSOCIATES, **Additive manufacturing and 3d printing**. [S. l.]: Disponível em: <http://wohlersassociates.com>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- YAKOUT, M, *et al.* **A review of metal additive manufacturing technologies**. Solid State Phenomena, [S. l.], p. 1–14, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.278.1>. Acesso em: 15 jul. 2019.

3DILIGENT. **Sheet lamination**. [S. l.:s. d.]. Disponível em: <https://www.3diligent.com/3d-printing-service/sheet-lamination/>. Acesso em: 15 jul. 2019.

3D HUBS, **Metal 3D Printing: additive manufacturing technologies compared**. Amsterdam: 3D HUBS, [S. d.]. Disponível em <<https://www.3dhubs.com/guides/metal-3d-printing/#metal-binder-jetting>> Acesso em: 08 jul. 2019.

## Sobre os autores

---

### João Francisco Bueno Gomes

Mestrando em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté (Unitau) em 2020. MBA em Gestão Industrial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) em 2015. Bacharel em Engenharia industrial mecânica pela (ETEP) em 2010.

### Filipe Wiltgen

Doutor em Dispositivos eletrônicos e computação, na área de fusão termonuclear controlada, utilizando inteligência artificial para controle do plasma de Tokamaks pelo Instituto de Tecnologia de Aeronáutica (ITA) em 2003. Mestre em Dispositivos eletrônicos e computação, na área de fusão termonuclear controlada, utilizando controle de campos magnéticos para confinamento e produção de plasma em Tokamaks pelo Instituto de Tecnologia de Aeronáutica (ITA) em 1998. Graduado em Engenharia elétrica, com ênfase em eletrônica de potência, pela Universidade de Taubaté (Unitau) em 1994. Atualmente é professor do Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica, e também, coordenador e professor no curso Especialização em Energia Solar Fotovoltaica na Universidade de Taubaté (Unitau).

---

**Recebimento em:** 03.09.2019

**Aceito em:** 02.12.2019