



*Desafios de uma sociedade  
digital nos Sistemas Produtivos e  
na Educação*



## **Manufatura aditiva em materiais metálicos, seus processos e aplicações – um ensaio teórico**

Thais Aparecida Fernandes Kabuchi<sup>1</sup>, Rosinei Batista Ribeiro<sup>2</sup>

**Resumo** - A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, iniciada no final da década de 1980, é uma tecnologia para construção de um objeto físico a partir de um modelo tridimensional, oriunda de um ambiente computacional (CAD). Nesta pesquisa, abordaremos os materiais metálicos na manufatura aditiva, os tipos de processos adotados, suas características e as principais aplicações no mercado atual.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva, metais, tecnologia aditiva

**Abstract** - The additive manufacturing, also known as 3D printing, which began in the late 1980s, is a technology for building a physical object from a three-dimensional model, derived from a computing system (CAD). In this research, we will cover the metal in the additive manufacturing, the types of processes adopted, their characteristics and the main applications in the current market.

### **Keywords:**

Additive manufacturing, metals, additive technology

---

<sup>1</sup> Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa, CEETEPS, São Paulo, thais.kabuchi@cpspos.sp.gov.br

<sup>2</sup> Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa, CEETEPS, São Paulo, rosinei.ribeiro@cpspos.sp.gov.br

## 1. Introdução

Os principais processos de fabricação possuem princípios baseados na moldagem, conformação, união ou divisão do componente ou ainda o mais utilizado pela indústria em geral, a remoção (ou subtração) de material para alcançar a forma desejada. No final da década de 1980, um novo princípio de fabricação baseado na adição de material foi apresentado, denominado atualmente de Manufatura Aditiva (MA) ou impressão 3D (VOLPATO, 2017)

Os primeiros equipamentos de manufatura aditiva foram máquinas de prototipagem rápida, ou seja, máquinas que tinham como finalidade a realização, seja um protótipo ou modelo básico de um produto que eventualmente se tornaria o “produto final” a ser comercializado. Entretanto, hoje esses equipamentos não se limitam apenas a produção de protótipos, mas são incluídos na manufatura final de produtos comerciais. Assim, a terminologia mais usual no âmbito técnico e adotada pela ASTM (American Society for Testing and Materials) é manufatura aditiva (MA). (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015)

A manufatura aditiva consiste num processo de fabricação em que são inseridas camadas sucessivas de material de forma a proporcionar um objeto tridimensional. No campo de produção de peças metálicas, há diferentes maneiras de fabricação, com características que diferem basicamente na intensidade de energia fornecida no momento de deposição do material.

As principais características da manufatura aditiva são a redução do número de etapas e processos na fabricação de um objeto, a possibilidade de construção de geometrias complexa, e a economia de material mostrando-se cada vez mais sua importância na integração da tecnologia na cadeia produtiva. (GUO; LEU, 2013)

Este estudo visa apresentar o conceito da manufatura aditiva em materiais metálicos, seus principais processos aplicados, as vantagens e os desafios a superar dessa tecnologia no âmbito dos sistemas produtivos atuais.

## 2. Referencial Teórico

No presente referencial teórico, apresenta-se os processos de manufatura aditiva em metais, descrição dos equipamentos e tipos de tecnologias envolvidas no processo de fabricação das peças.

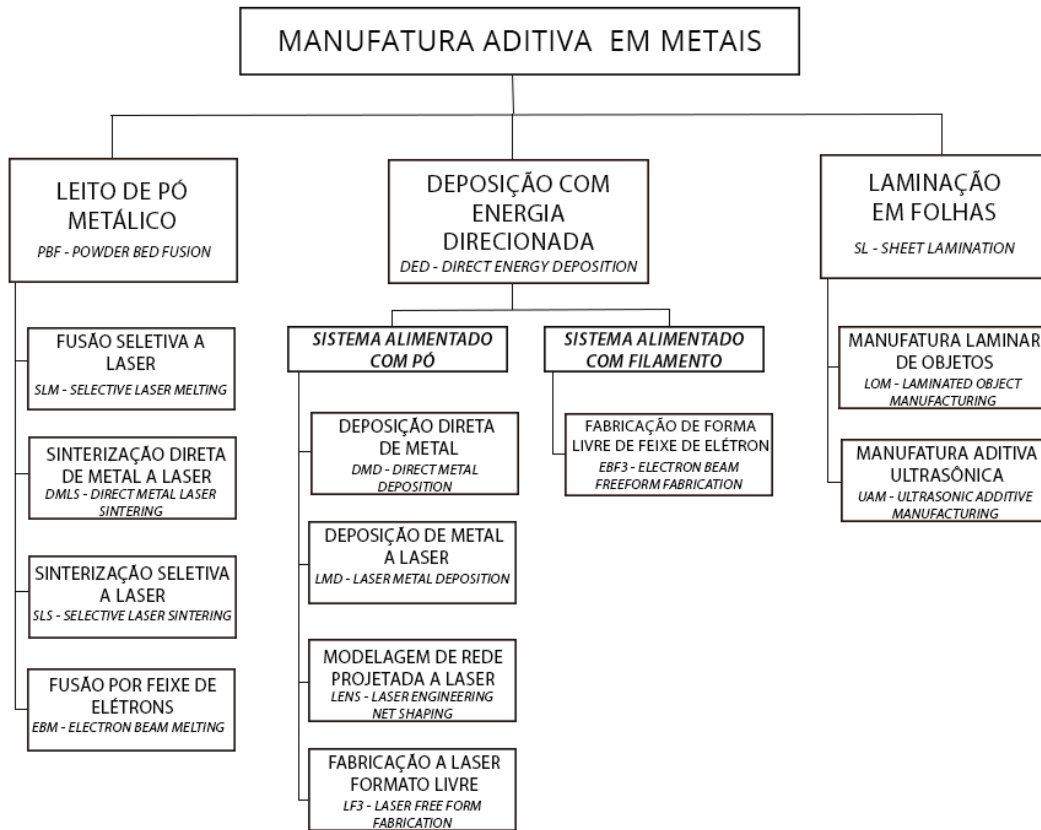
A manufatura aditiva consiste num processo de fabricação em que são inseridas camadas sucessivas de material de forma a proporcionar um objeto tridimensional. Para a realização desse processo são necessárias informações proveniente da representação geométrica computacional 3D do componente (CAD), um software para compilar esses dados e planejar o processo de fabricação (estratégias de deposição de material, definição de estruturas de suporte e etc.), o equipamento específico de manufatura aditiva e por fim, o pós-processamento que pode variar de acordo com tecnologia escolhida podendo ser necessária a limpeza, etapas adicionais de processamento e acabamento. Atualmente essa tecnologia permite a fabricação em produtos de diferentes tipos de materiais como polímeros, cerâmicos e metais (VOLPATO, 2017)

Visando classificar os diferentes princípios da tecnologia em manufatura aditiva, a ISO/ASTM 52900:2015 propõe sete categorias ou grupos: (1) fotopolimerização em cuba, (2) extrusão de material, (3) jateamento de material, (4) jateamento de aglutinante, (5) fusão em leito de pó, (6) adição de lâminas e (7) deposição com energia direcionada. (52900:2015, 2015)

- (1) Fotopolimerização em cuba: uma resina líquida é curada seletivamente por um feixe direcionado de luz ultravioleta.
- (2) Extrusão de material: o material termoplástico é alimentado por meio de um cabeçote injetor aquecido e depositado numa plataforma. O cabeçote funde o material em que ocorre o processo de extrusão para formar cada camada do objeto.
- (3) Jateamento de material: gotículas de um material base (fotopolímero) são depositadas por meio de jateamento em uma superfície para em seguida serem curadas por meio de luz ultravioleta de forma sucessiva até que se forme o objeto desejado.
- (4) Jateamento de aglutinante: as partículas de material são seletivamente unidas usando um agente aglutinador líquido. Assim que uma camada está formada, uma nova camada é criada por meio da difusão de pó sobre o topo do objeto e o processo repete-se.
- (5) Fusão em leito de pó: utiliza uma fonte de energia térmica para induzir a fusão seletiva de uma camada de partículas, insere-se uma nova camada por meio da difusão de pó sobre o topo do objeto e repete-se a operação. O material não fundido auxilia como suporte ao objeto que está sendo produzido.
- (6) Adição de lâminas: chapas finas do material são unidas usando diferentes métodos para formar o objeto. Um laser ou uma faca são utilizados para retirar o contorno do objeto desejado, removendo o material desnecessário.
- (7) Deposição com energia direcionada: energia térmica concentrada é utilizada para fundir o material enquanto simultaneamente está sendo depositado. Os sistemas de deposição direta de energia podem empregar técnicas baseadas em cama de pó ou com filamento metálico.

Dentre as categorias propostas pela ISO/ASTM 52900:2015, quatro delas contemplam a manufatura aditiva em metais, sendo elas a fusão em leito de pó, deposição com energia direcionada e laminação por camada. Para cada uma dessas categorias, há também subgrupos com suas respectivas características como apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Organograma da Manufatura aditiva em metais

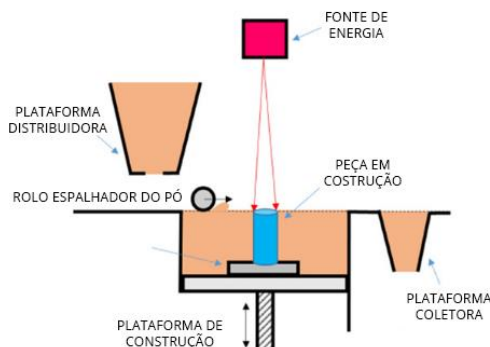


Fonte: os autores

## 2.1. Técnica de Fusão em leito de pó (PBF – Powder Bed Fusion)

Há algumas variações da tecnologia de fusão em leito de pó, embora a capacidade do processo, as condições e as características das peças fabricadas possam variar, todas compartilham o mesmo princípio de funcionamento, a tecnologia envolve um laser ou feixe de elétrons controlado por um conjunto de espelhos, o qual irradia na superfície do leito em pó, fundindo as partículas formando uma fina camada (Figura 2). Depois da camada construída, a mesa desloca-se para baixo e o ciclo se repete até que a peça seja totalmente fabricada. (KOK et al., 2018; VOLPATO, 2017; YANG et al., 2017). As subcategorias presentes nesta tecnologia são a sinterização seletiva a laser, fusão seletiva a laser, fusão por feixe de elétrons e sinterização direta de metal a laser.

Figura 2 – Técnica de fusão em leito de pó



Fonte: adaptado de (KOK et al., 2018)

A técnica de Sinterização Seletiva a Laser (SLS – Selective Laser Sintering), camada por camada, um pó fino é espalhado e sinterizado para construir uma peça. O pó é distribuído e espalhado uniformemente com um braço de revestimento para criar uma superfície nivelada e uniforme que cobre completamente a área de construção. Um feixe de laser focalizado é então direcionado com precisão para a camada de pó e faz a varredura sobre a seção transversal da peça. A plataforma de construção é abaixada e o processo é repetido até que todas as camadas tenham sido impressas. SLS pode processar uma grande variedade de materiais e, assim, pode estender seu campo de aplicações a diferentes áreas de mercado. (YAKOUT; ELBESTAWI; VELDHUIS, 2018)

A Fusão Seletiva a Laser (SLM – Selective Laser Melting), o sistema começa aplicando uma fina camada de pó material espalhado por um rolo na plataforma de construção. Um poderoso feixe de laser então funde o pó exatamente nos pontos definidos pelos dados de projeto do componente gerados por computador. A plataforma é então abaixada e outra camada de pó é aplicada. Durante o processo, camadas sucessivas de pó de metal são totalmente fundidas e consolidadas umas sobre as outras. Os tipos de materiais que podem ser processados incluem aço, aço inoxidável, cromo-cobalto, titânio e alumínio. É um processo que se diferencia pela sua precisão do laser de alta potência, até 3000W, gerando energia necessária para a capacidade de elevado ponto de fusão e de alta produtividade. (BADIRU, ADEDEJI B; VALENCIA VHANCE V.; LIU, 2017)

O processo de Fusão por Feixe de Elétrons (EBM – Electron Beam Melting) assemelha-se ao processo de fusão seletiva a laser. Sua principal diferença é que ao invés de uma fonte de laser para derreter o pó, temos um feixe de elétrons numa câmara a vácuo. Por se tratar de um feixe de elétrons de alta capacidade, o tempo de construção do objeto é mais rápido se comparado ao processo de fusão seletiva a laser. (YAKOUT; ELBESTAWI; VELDHUIS, 2018) O processo resulta em peças com bom acabamento superficial, mas possui um elevado consumo de energia.

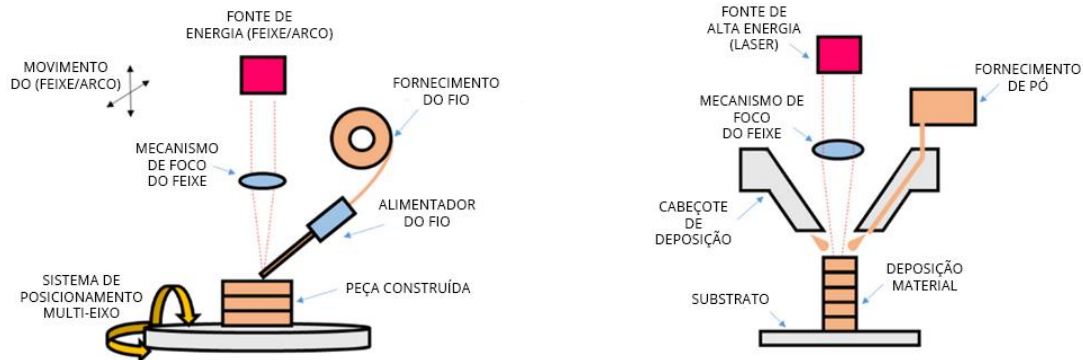
Semelhante a tecnologia de fusão seletiva a laser, na Sinterização Direta de Metal a Laser (DMLS – Direct Metal Laser Sintering), o processo consiste em fundir o pó metálico localmente usando um feixe de laser focalizado. O produto é fabricado camada por camada ao longo do eixo Z, repetindo várias vezes o processo até finalizar a produção do objeto. Geralmente esse processo é aplicado a ligas metálicas para fabricação de peças finais na indústria, incluindo aeroespacial, odontológica, médica e indústrias de pequeno e médio porte. Estruturas de suporte são necessárias para a maioria da geometria porque o pó sozinho não é suficiente para manter no lugar a fase líquida criada quando o laser está escaneando o pó. (BADIRU, ADEDEJI B; VALENCIA VHANCE V.; LIU, 2017)

## **2.2 Técnica de Deposição com Energia Direcionada (DED – *Direct Energy Deposition*)**

O processo de manufatura aditiva de deposição com energia direcionada contempla duas técnicas distintas: alimentação por pó ou filamento (Figura 3). Quando alimentado por pó o sistema consiste em um processo em que o material é projetado sobre a peça ao mesmo tempo que o laser atinge tanto o substrato como o material de adição, fundindo o material a medida em que é depositado, já quando a alimentação é por filamento, um fio de pequeno diâmetro é alimentado e fundido ligando as camadas por meio de soldagem. (GIBSON; ROSEN; STUCKER,

2015; VOLPATO, 2017; YAKOUT; ELBESTAWI; VELDHUIS, 2018) O princípio de Deposição com Energia Direcionada cobre uma extensa variedade de tecnologias, como Deposição Direta de Metal (DMD – Direct Metal Deposition), Deposição a Laser de Metal (LMD – Laser Metal Deposition), Modelagem de Rede Projetada a Laser (LENS – Laser Engineered Net Shapping), (LF3 – Laser Freeform Fabrication). Embora a abordagem geral seja a mesma, a diferença entre essas tecnologias geralmente incluem mudanças na potência do laser, métodos de distribuição de pó, métodos de distribuição de gás inerte e/ou o tipo de controle de movimento utilizado.(GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015)

**Figura 3** – Técnica de deposição com energia direcionada alimentado por filamento e alimentado por pó

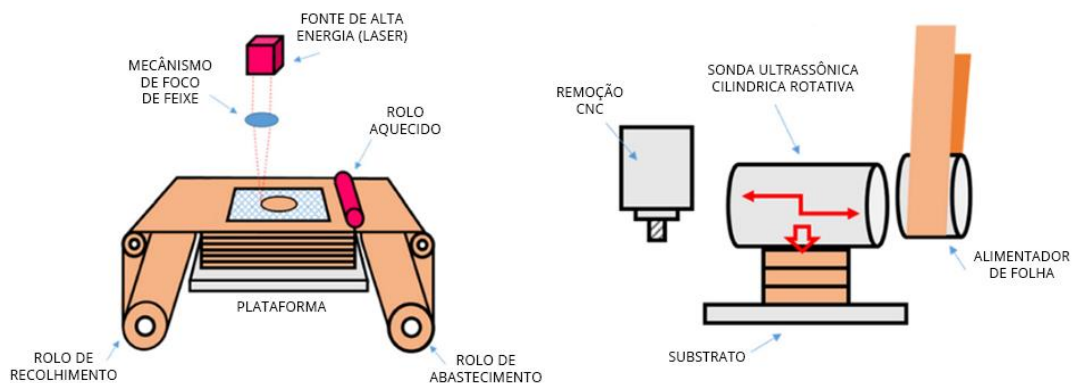


Fonte: adaptado de (KOK et al., 2018)

### 2.3 Técnica de laminação em folhas (SL – Sheet Lamination)

Os processos de laminação em folhas incluem a manufatura laminar de objetos (LOM – Laminated Object Manufacturing) e a manufatura aditiva ultrassônica (UAM – Ultrasonic additive manufacturing) (Figura 4). Nesse processo normalmente há a união de finas folhas metálicas por meio de brasagem, união por difusão, soldagem a laser ou de costura ultrassônica. Uma vantagem do processo de SL é sua capacidade de processar diferentes materiais metálicos. O processo requer pós-usinagem adicional para remover metais não ligados e para produzir recursos como canais e orifícios para obter a geometria desejada. Devido à união das folhas de metal, a anisotropia nas propriedades mecânicas prevalece neste tipo de peça. Isso se deve principalmente à ligação mais fraca formada nas interfaces da folha em comparação com a ligação intergranular dentro de cada folha. (KOK et al., 2018)

**Figura 4** – Técnica de manufatura laminar de objeto (LOM) e manufatura aditiva ultrassônica



Fonte: adaptado de (KOK et al., 2018)

## 2.4 Aplicações da manufatura aditiva em materiais metálicos

A adoção da manufatura aditiva hoje envolve setores em que seus custos de produção elevados são superados pelo valor adicional que a MA pode gerar: aprimoramento da funcionalidade do produto, maior personalização, menor tempo para inserção no mercado. Na engenharia como aeroespacial, automotiva e médica pode acelerar o desenvolvimento do produto permitindo explorar recursos de design completamente novos ou criar produtos totalmente individualizados sem nenhum custo extra. A MA permite menos desperdício de material e redução do tempo de montagem para componentes complexos. A seguir, algumas aplicações utilizadas na manufatura aditiva de metais.

A indústria aeroespacial, tradicionalmente o setor que aplica a manufatura aditiva em metais desde que foi introduzida, produzem consistentemente geometrias complexas com um número limitado de etapas de processamento e em pequenas quantidades. Esses motivos tornam opção de produção em manufatura aditiva um método eficiente para aplicações aeroespaciais. Os processos mais comuns utilizados na indústria aeroespacial são DED, SLM, EBM. Outra razão para sua crescente atratividade é a capacidade de imprimir estruturas leve usando materiais retardadores de chamas e químicos. Os materiais mais utilizados são ligas de alumínio, ligas de titânio, superligas de níquel e aços especiais. A redução no desperdícios desses materiais especiais é um fator importante na justificativa do uso de manufatura aditiva. Os principais desafios relatados na literatura incluem anisotropia mecânica, não homogeneidade microestrutural, tensões residuais, precisão dimensional e acabamento superficial. (CHUA, CHEE KAI; WONG, CHEE HOW; YEONG, 2017; MILEWSKI, 2017; YAKOUT; ELBESTAWI; VELDHUIS, 2018).

A manufatura aditiva na indústria automobilística implica em vantagens significativas na liberdade de design das peças e fabricação de peças estruturalmente mais leves. Exemplos de peças produzidas incluem componentes estruturais compostos, válvulas de motor e turbinas alimentadoras. Outro grande diferencial é a produção das peças sob demanda, reduzindo assim a necessidade de estoques, custos de transporte e aquisição de material. Os principais desafios nesse setor é garantir o desempenho das peças impressas, o acabamento superficial e as precisões dimensionais e garantir que velocidade de produção seja compatível aos volumes de produção típicos desse setor. (YAKOUT; ELBESTAWI; VELDHUIS, 2018)

A manufatura aditiva muda a forma de operação de todas as cadeias produtivas, o que inclui o segmento de saúde. Há aplicações na área odontológica, em dispositivos dentários como coroas e implantes personalizados (Figura 5) fabricados com a tecnologia de sinterização direta de metal a laser, da liga Cobalto-Cromo. Lotes pequenos de alto valor e alta precisão como esses estão tendo ampla adoção. Outra aplicação que logo será amplamente realizada são implantes médico de metal. Os benefícios da implantação da manufatura aditiva nesse setor é garantir o ajuste personalizados, ou seja, anatomicamente refinado para o paciente. Exemplos de materiais utilizados nesse setor são Cromo-Cobalto e ligas de titânio, materiais biocompatíveis e que oferecem alta resistência. (MILEWSKI, 2017)

**Figura 5** – Fabricação aditiva de coroa dentária e pontes.



Fonte: (MILEWSKI, 2017, p. 705)

### **3. Metodologia**

Este trabalho é de cunho teórico-conceitual onde foi elaborada uma pesquisa exploratória com abordagem predominantemente qualitativa e o método escolhido foi a revisão da literatura, levantando uma série de pontos relevantes para a condução do estudo. A revisão da literatura visa identificar, conhecer e acompanhar o desenvolvimento da pesquisa em determinada área do conhecimento, além de identificar algumas perspectivas para pesquisas futuras (NORONHA; FERREIRA, 2000).

Vergara (2006) caracteriza a pesquisa exploratória como uma investigação em área onde existe pouco conhecimento sistematizado, acumulado. Segundo Gil (2005) a pesquisa exploratória tem por objetivo obter maior familiaridade com o problema, visando torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses.

### **4. Resultados e Discussões**

Embora haja avanços significativos e tecnológicos na manufatura aditiva em metais, o desempenho em termos de velocidade, precisão, controle de processo e eficácia de custo ainda precisam melhorar.

A manufatura aditiva é fundamentalmente diferente da manufatura tradicional subtrativa ou formativa, pois tem em seu conceito a construção por camadas fazendo com que ela seja versátil, flexível e altamente personalizável e, como tal, adequa-se a maioria dos setores da produção industrial. A otimização do processo e a seleção de parâmetros serão os principais determinantes do sucesso da manufatura aditiva.

Outro grande trunfo dessa tecnologia é introduzir o conceito de fabricação sob demanda, ou seja, eliminar os estoques das empresas e manter apenas o armazenamento das peças em formato digital. A expectativa que os produtos possam ser fabricados em qualquer lugar por meio de personalização em massa sob demanda orientada pelo consumidor é a grande tendência com a implantação da manufatura aditiva no mercado.

A maioria das organizações estão considerando a produção em manufatura aditiva para peças de baixo volume e modelos conceituais. No entanto, o acabamento de superfície e as tolerâncias dimensionais ainda são questões importantes que precisam de mais inovação nos equipamentos de MA.

A maioria dos processos de MA começa com metais em pó, em que os tamanhos e formas do particulado variam de lote para lote, a forma de calor normalmente é um laser ou um feixe de elétrons. Esses parâmetros mencionados precisam ser amplamente pesquisados de forma a garantir um padrão no processo de fabricação já que indústrias aeroespacial, automobilística e biomédica



se baseiam em produtos que requerem certificações e validações para serem inseridas no mercado.(TOFAIL et al., 2018)

## 5. Considerações Finais

A manufatura aditiva em metais possui um nicho de mercado com um enorme potencial de crescimento, permitindo que peças metálicas possam ser construídas sem a necessidade do ferramental tradicional e com poucas limitações em sua geometria.

As indústrias de alta tecnologia, como, aeroespacial e automobilística, foram os primeiros a adotar a manufatura aditiva. Com o crescimento no uso dessa tecnologia, há um grande potencial para se tornar uma tendência principal e parte integrante no processo de produção de grande parte da indústria em geral.

Este artigo teve como objetivo revisar diferentes processos e suas aplicações. A pesquisa mostrou o potencial que a manufatura aditiva pode proporcionar no mercado industrial, oferecendo a possibilidades significativas para criação de novos produtos.

A tecnologia apresentou desafios a serem superados com pesquisa e desenvolvimento na área de materiais visando melhorar e estabelecer regras e protocolos de projetos de manufatura aditiva.

## 6. Referências

ISO/ASTM 52900:2015, I. Additive Manufacturing - General Principles - Terminology. [s.l: s.n.].

BADIRU, ADEDEJI B; VALENCIA VHANCE V.; LIU, D. Additive Manufacturing Handbook - Product Development for the Defense Industry. [s.l: s.n.].

CHUA, CHEE KAI; WONG, CHEE HOW; YEONG, W. Y. Standards , Quality Control , and Measurement Sciences in 3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING. [s.l: s.n.].

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. [s.l: s.n.].

GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo: Atlas, 2005

GUO, N.; LEU, M. C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, v. 8, n. 3, p. 215-243. 2013.

KOK, Y. et al. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review. *Materials and Design*, v. 139, p. 565–586, 2018.

MILEWSKI, J. O. Additive Manufacturing of Metals. [s.l: s.n.]. v. 2017-Octob

NORONHA, D. P.; FERREIRA, S. M. S. P. Revisões da Literatura. In: Campello, B.S., Cendón, B.v. e Kremer, J.M. Fontes de Informação para Pesquisadores e Profissionais. Belo Horizonte: Ed. UFMG, p. 191-198, 2000.

TOFAIL, S. A. M. et al. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, v. 21, n. 1, p. 22–37, 2018.

VERGARA, Sylvia Constant. Métodos de pesquisa em administração. São Paulo: Atlas, 2006.

VOLPATO, N. Manufatura Aditiva - Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D. São Paulo: Blucher, 2017.

YAKOUT, M.; ELBESTAWI, M. A.; VELDHUIS, S. C. A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies. v. 278, p. 1–14, 2018.

YANG, L. et al. Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. [s.l: s.n.].