

MANUFATURA ADITIVA DE MATERIAIS METÁLICOS: MÉTODOS, PROCEDIMENTOS E PRODUTOS

Igor José Dester Ladeira – ij.ladeira@uol.com.br

Leonardo Callicchio – lcalicchio@gmail.com

RESUMO

O avanço das tecnologias de impressão 3D adentrou a área de materiais metálicos e tem se desenvolvido na última década. A capacidade de manufaturar aditivamente partes metálicas permite a elaboração de produtos com formas complexas, impossíveis de se obter com processamentos convencionais, e propriedades inéditas. Mais ainda, a manufatura aditiva de materiais metálicos permite a flexibilidade do *design*, o encurtamento do estágio de desenvolvimento de produtos e a redução de resíduos durante o processamento, tornando-a interessante no contexto de Indústria 4.0. Através da aquisição e análise de publicações científicas, reuniu-se a informação acerca das características deste método de produção. Esse trabalho revisa a literatura sobre a área de manufatura aditiva (ou impressão 3D), tratando dos principais métodos de impressão de materiais metálicos, especificamente as tecnologias de *Powder Bed Fusion*, *Directed Energy Deposition* e *Binder Jetting*, das características destes processos e impacto dos parâmetros na conformação da matéria-prima, dos principais produtos obtidos, e estabelecendo, também, uma comparação com os métodos convencionais.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Metais. Impressão 3D.

ADDITIVE MANUFACTURING OF METALLIC MATERIALS: METHODS, PROCEDURES AND PRODUCTS

ABSTRACT

The advancement of 3D printing technologies entered the area of metallic materials and has developed in the last decade. The capacity of manufacturing metallic parts additively allows the elaboration of products with complex shapes, impossible to acquire through conventional methods, and unprecedented properties. More even, the additive manufacturing of metallic materials allows design flexibility, shortening of the product development process and the reduction of residue from processing, making it interest in the context of Industry 4.0. Through the acquirement and analysis of scientific publications, information about the subject was gathered regarding the characteristics of this production method. This work reviews the literature about the area of additive manufacturing (or 3D printing) of metallic materials, addressing the main methods of metallic materials printing, specifically the technologies of *Powder Bed Fusion*, *Directed Energy Deposition* and *Binder Jetting*,

the characteristics of processing and the impact of parameters in shaping the raw material, the main products obtained, and establishing, as well, a comparison with conventional methods.

Keywords: Additive manufacturing. Metals. 3D printing.

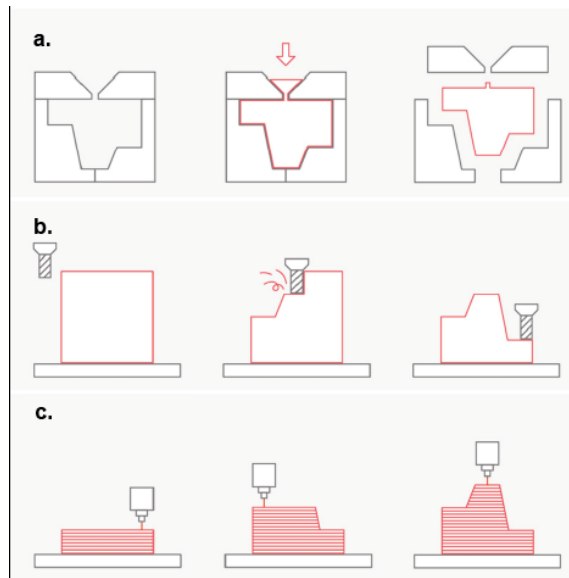
1 INTRODUÇÃO

Define-se *Additive Manufacturing* (Manufatura Aditiva) ou impressão 3D como o termo utilizado para referir-se a tecnologias baseadas na adição sucessiva de material, em camada após camada, para produzir um objeto físico com uma determinada representação geométrica (ISO, 2015). A impressão 3D faz utilização de softwares de design tridimensional para criar modelos posteriormente divididos digitalmente em planos 2D que guiarão o processo de impressão (WOHLERS REPORT, 2013 *apud* ATTARAN, 2017). A integração de modelos digitais 3D com métodos automatizados de produção por adição de material permite a elaboração de diversos produtos de geometria complexa.

Embora a tecnologia de manufatura aditiva tenha se mantido no estágio de protótipo desde sua emergência em 1980, na última década tem-se obtido grandes avanços na área a ponto de permitir sua adaptação para produção industrial. Entretanto, o potencial industrial da impressão 3D ainda é limitado pela tecnologia da área, as habilidades da força de trabalho, e pelos custos dos métodos de impressão (QUINLAN; HART, 2020). Outro fator limitante para a aplicação da impressão 3D em escala industrial encontra-se no processo relativamente lento de impressão, que ainda encontra grande concorrência em métodos de processamento mais comuns, como fundição e usinagem (THOMAS; GILBERT, 2014).

A manufatura aditiva difere fundamentalmente dos métodos mais disseminados de processamento de materiais. Enquanto a usinagem conforma através da utilização de ferramentas diversas para fazer a subtração de partes do material, esculpindo-o em sua forma final, e a fundição depende da utilização de moldes que conformam o material derretido no formato do espaço vazio da forma, a impressão 3D trabalha a partir da adição de partes para a formação de um todo (Figura 1). Diferente dos processos tradicionais, a impressão 3D é geralmente pouco afetada economicamente pela complexidade da peça a ser produzida (QUINLAN; HART, 2020). Contudo, a manufatura aditiva não produz peças com propriedades mecânicas iguais aos processos formativos ou subtrativos, e apresenta inconsistência em performance de partes repetidas (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017).

Figura 1 – Exemplo visual dos sistemas de manufatura. (a) Manufatura formativa, ex.: fundição. (b) Manufatura subtrativa, ex.: usinagem. (c) Manufatura aditiva, ex.: impressão 3D.

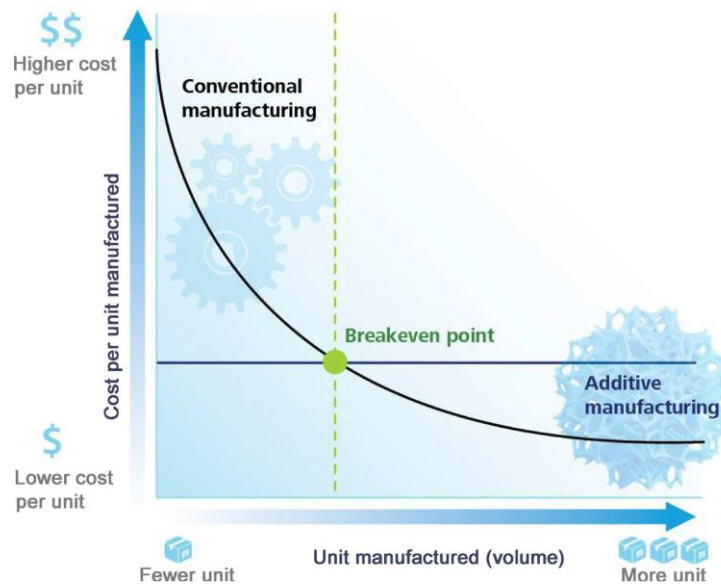


Fonte: Quinlan e Hart (2020), adaptado de *The 3D Printing Handbook* (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017)

A manufatura aditiva também não depende de moldes para a produção. Suas limitações produtivas são restritas ao tamanho da impressora e a utilização de um material por impressão (WELLER; KLEER; PILLER, 2015). O processo ser aditivo ao invés de subtrativo também reduz desperdícios materiais, especialmente na manufatura aditiva de materiais metálicos (PETROVIC *et al.*, 2011).

Mesmo com as limitações de produção em larga escala devido ao custo e tempo de produção quando comparado com métodos convencionas, a manufatura aditiva se destaca no atendimento a mercados menores, específicos, ou de demanda personalizada. Assim como a digitalização dos livros alterou seu respectivo mercado, a manufatura aditiva e impressão 3D devem apresentar semelhante impacto no cenário industrial, reduzindo ou extinguindo a necessidade de estoque para certos produtos, uma vez que o usuário os pode produzir em uma impressora própria. Mais ainda, a disponibilidade de softwares de modelamento 3D e o barateamento de impressoras 3D para uso doméstico cria uma dinâmica única na relação produtor-consumidor, permitindo que usuários sejam produtores de modelos disponibilizados por terceiros e desenvolvedores de seus próprios modelos 3D (BERMAN, 2012).

Figura 2 – Relação de custos entre manufatura convencional e manufatura aditiva.



Fonte: Janssen (2014, *apud* ATTARAN; 2017, p. 192)

A manufatura aditiva pode ser resumida em três estágios de processo: preparação e instalação do modelo 3D, impressão camada por camada do objeto, e o acabamento (KOHLHUBER *et al.*, 2017). Embora inicialmente limitada à utilização com materiais poliméricos, a tecnologia evoluiu, e hoje é aplicada na área de materiais cerâmicos, metálicos e na obtenção de compósitos.

1.1 MANUFATURA ADITIVA DE METAIS

A manufatura aditiva de metais, diferente dos polímeros, utiliza majoritariamente pó metálico como matéria prima. Os produtos da impressão 3D de peças metálicas apresentam boa qualidade, funcionalidade e propriedades mecânicas satisfatórias (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017). O tipo de matéria-prima e a fonte de energia utilizados para formar a peça são os fatores que definem o processo de manufatura aditiva dos metais. A matéria-prima utilizada pode ser em pó ou fio metálico, e a fonte de energia pode vir de laser ou feixe de elétrons. (HARRIS, 2017).

Os métodos de processamento de materiais metálicos a partir de manufatura aditiva podem ser separados em processos de *Powder Bed Fusion* (PBF) e em processos de *Directed Energy Deposition* (DED), classificados com relação à fonte de energia utilizada. (BHAVAR *et al.*, 2014) Segundo a ASTM (2015), o PBF é um processo de manufatura aditiva no qual energia térmica é utilizada para fundir seções específicas de uma cama de pó metálico. Também pela mesma norma, define-se DED como um processo de manufatura aditiva que utiliza energia térmica focalizada para fundir o material durante a sua deposição.

Tecnologias da classe PBF:

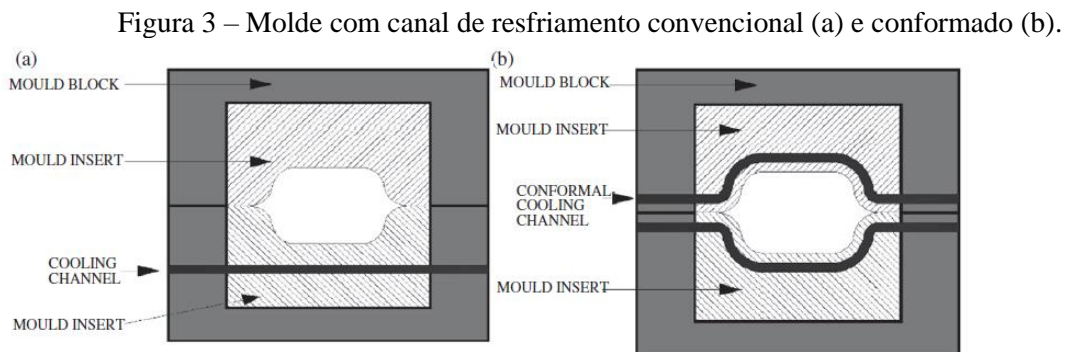
- Selective Laser Sintering/Melting (SLS/SLM)
- Direct Metal Laser Sintering (DMLS)
- Laser Cusing

- Electron Beam Melting (EBM)

Tecnologias da classe DED:

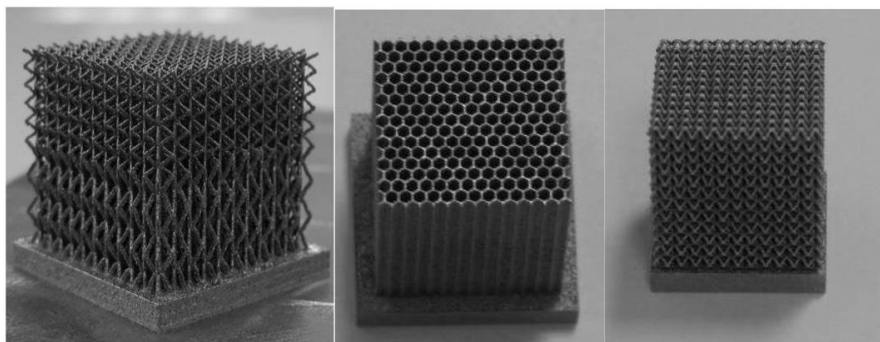
- Laser Engineered Net Shaping (LENS)
- Direct Metal Deposition (DMD)
- Electron Beam Free Form Fabrication (EBFFF ou EBF³)
- Manufatura Aditiva a base de arco elétrico

Algumas aplicações de destaque para produtos obtidos através da impressão 3D de metais estão na fabricação de estruturas de baixo peso para a indústria automotiva e aeroespacial, na confecção de moldes com canais de resfriamento conformados para troca de calor homogênea, e em biomateriais, devido a capacidade da manufatura aditiva de reproduzir superfícies e formas semelhantes ao de tecidos e órgãos (PETROVIC *et al.*, 2011).



Fonte: Petrovic *et al.* (2011)

Figura 4 – Tipos diferentes de estruturas reticuladas (célula cúbica, célula colmeia e célula cúbica de única célula, da esquerda para a direita) fabricadas por *laser cusing*.



Fonte: Petrovic *et al.* (2011)

As propriedades mecânicas dos produtos obtidos pela impressão 3D de metais podem variar dependendo do processo utilizado, da direção de carregamento imposto sobre o produto, da orientação de impressão, gradiente de temperatura durante e após o processo, e tratamentos de superfície (HARRIS, 2017).

A manufatura aditiva de metais ainda é uma tecnologia nova, e se faz necessário o estudo dos seus diferentes processos para se melhor entender as variáveis que afetam o produto. Para Harris

(2017) é preciso entender a microestrutura do material resultante de cada ciclo de processamento térmico. Tem-se feito muitos estudos contemplando processos individuais e as propriedades resultantes, mas não existem metodologias específicas para a avaliação de produtos de manufatura aditiva, nem materiais que agregam a literatura em um banco de dados.

Embora a impressão 3D ainda não seja algo comum no Brasil, trabalhos acadêmicos nesse seguimento e a compra de impressoras 3D de polímeros para uso individual e para o desenvolvimento de empresas já são uma realidade. As características da manufatura aditiva de integração com softwares, alta capacidade de customização, redução de desperdício e aperfeiçoamento de *supply chains* torna a tecnologia muito atraente no conceito de Indústria 4.0. No caso da manufatura aditiva de materiais metálicos, os preços elevados de maquinário especialmente em um cenário de recessão mediante a pandemia de COVID-19 tornam sua disseminação pelo Brasil ainda mais limitada. Entretanto, o desenvolvimento de uma literatura nacional com base na análise de artigos e estudos estrangeiros permitirá a dispersão desse conhecimento em território nacional, dando uma base para futuros investidores e pesquisadores interessados nesse tipo de processamento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar e reunir informação acerca dos principais métodos de manufatura aditiva de metais.

1.2.2 Objetivo Específico

Estudar os principais métodos de manufatura aditiva de metais, definindo principais impressoras 3D utilizadas, seu método de funcionamento, matérias-primas utilizadas, parâmetros do processo, vantagens e desvantagens, e características dos produtos obtidos.

Expor principais aplicações de peças metálicas obtidas através de manufatura aditiva e as vantagens conferidas através deste processo.

Fazer um comparativo entre as propriedades dos produtos e o custo de processamentos convencionais (manufatura subtrativa, manufatura formativa) com os obtidos através da manufatura aditiva.

Apontar estudos de caso no qual a substituição da manufatura subtrativa ou formativa por manufatura aditiva resultou em lucro ou melhor qualidade de produto.

1.3 JUSTIFICATIVA

A manufatura aditiva de metais é uma tecnologia recente que tende a se desenvolver e baratear frente as pressões por melhor eficiência produtiva, maior customização de produtos e menor tempo de inserção destes no mercado (THOMAS; GILBERT, 2014). Por meio deste trabalho, almeja-se

obter um apanhado de informação que permita o melhor entendimento dos processos, parâmetros e particularidades das tecnologias de impressão 3D de metais, fornecendo assim uma referência para futuros estudos e trabalhos acadêmicos na área.

2 METODOLOGIA

Para a revisão da literatura do processamento de materiais metálicos por manufatura aditiva, pesquisou-se em plataformas online de artigos e outras publicações científicas SciELO, Google Scholar, ScienceDirect e ResearchGate. Os critérios de busca utilizados foram publicações de no máximo uma década que abordavam tipos e características de processos de manufatura aditiva de materiais metálicos. Para trabalhos que destrinchavam em referências mais antigas que continham informação para a elaboração deste artigo, incluiu-se também os trabalhos acadêmicos mais antigos, independente do ano de publicação.

As combinações de palavras-chave de busca utilizadas para a obtenção dos trabalhos acadêmicos envolvidos na síntese foram: *additive manufacturing metals, 3d printing metals, powder bed fusion metals, selective laser melting, electron beam melting, material jetting metals, binder jetting metals, direct energy deposition* e *powder metallurgy additive manufacturing*.

Dos artigos adquiridos, destacaram-se aqueles que explicavam processos ou parâmetros que aprofundavam o entendimento sobre a manufatura aditiva de materiais metálicos. Dos principais métodos de impressão 3D de metais, selecionou-se os métodos de *Powder Bed Fusion* com a utilização de laser ou feixe de elétrons, *Binder Jetting* e *Directed Energy Deposition* com a utilização de laser ou feixe de elétrons.

Com o interesse de firmar o conhecimento acerca do tema de revisão, também fez-se uso de referências provenientes dos livros *Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing Handbook, Metalurgia do Pó, Powder Metallurgy Technology, Advances in Powder Metallurgy* e *Additive Manufacturing Handbook* na síntese do artigo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 ATOMIZAÇÃO

A manufatura aditiva depende de regularidade nas características de sua matéria-prima para que os produtos obtidos no processo mantenham um padrão de propriedades. A atomização é um dos principais métodos de produção de pós metálicos destinados a manufatura aditiva, pois produz partículas com distribuição de tamanhos e morfologia que facilitam o empacotamento do pó e seu processamento na manufatura aditiva.

A atomização consiste na pulverização de metal fundido em partículas finas. O metal líquido precipita através de uma pequena passagem, sendo imediatamente resfriado em particulado fino por um jato de água ou gás (CHIAVERINI, 1992).

Embora a atomização por jato de água seja simples e de baixo custo, o perfil das partículas geradas não favorece o empacotamento denso do pó, e, portanto, não são apropriadas para o processamento na metalurgia aditiva. A atomização por água também disponibiliza oxigênio para o metal líquido, favorecendo a formação de óxidos que podem afetar as propriedades mecânicas do material (HERZOG *et al*, 2016).

A atomização por gás, especialmente a utilização de gases inertes como o argônio ou nitrogênio, facilita a formação de partículas esféricas (UPADHYAYA, 2002) e desfavorece a oxidação durante a atomização. Entretanto, a utilização de gases inertes é um custo extra na manufatura aditiva que pode inviabilizar um projeto.

3.2 SINTERIZAÇÃO

Segundo Upadhyaya (2002), “sinterização pode ser considerado o processo pelo qual um conglomerado de partículas, compactados sob pressão ou simplesmente confinados em um container, ligam-se quimicamente em um corpo único coerente sob alta temperatura”. A temperatura de sinterização de um material é normalmente abaixo da temperatura de fusão, devido a maior energia de superfície

O sequenciamento dos estágios do processo de sinterização são:

- Ligação entre as partículas e formação de pescoços
- Crescimento do pescoço
- Fechamento dos canais dos poros
- Arredondamento dos poros
- Densificação ou contração dos poros
- Crescimento eventual dos poros

Na sinterização, existem diversos parâmetros que afetam o processamento, e consequentemente, que influenciam nas características do produto obtido. Tamanhos menores de partícula favorecem o processo de sinterização através da melhor difusão de material devido ao maior contato entre partículas, facilidade de formação de pescoços, e maior área superficial.

A forma e topografia que favorece o contato entre as partículas também facilita o processo de sinterização. Maiores temperaturas de processamento também aceleram o processo de sinterização. Outros fatores complementares são a densidade a verde, a composição da partícula e o tempo de sinterização (CHIAVERINI, 1992).

3.3 POWDER BED FUSION (PBF)

O Powder Bed Fusion (PBF) é um dos meios de processamento por manufatura aditiva mais versáteis e antigos, sendo utilizado para a produção de peças obtidas por materiais poliméricos, compósitos, cerâmicos e metálicos, e sendo capaz de utilizar diferentes fontes energéticas na

manufatura. Em respeito aos materiais metálicos, qualquer metal que pode ser soldado é considerado um bom candidato para processamento por PBF. Metais nobres como ouro e prata, e ligas de titânio e níquel também tem visto aplicação por este meio. (GIBSON *et al.*, 2021).

No método por PBF, a matéria-prima de pó metálico é deposta em camadas finas sobre uma “cama” e dispersa por uma lâmina ou rolamento móvel. Após a deposição, sobre o pó é incidido uma fonte de energia, geralmente laser ou feixe de elétrons, que funde ou sinteriza as partículas de metal (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017), consolidando os planos que sobrepostos vão formar a peça desejada.

A divisão do PBF se dá pelo tipo de energia utilizado na tecnologia. Os métodos dominantes na manufatura aditiva de metais são Selective Laser Melting (SLM) e Electron Beam Melting (EBM), que usam, respectivamente, laser de alta intensidade, e feixe de elétrons (ZHANG *et al.*, 2017).

É importante ressaltar que na literatura sobre o PBF, especialmente em respeito a procedimentos com o uso de laser, existem diversas designações para o mesmo processo, como por exemplo, *Selective Laser Melting* (SLM), *Selective Laser Sintering* (SLS) *Direct Laser Metal Sintering* (DLMS), *Direct Metal Printing* (DMP), *LaserCUSING*, entre outros. Isso se dá devido a pequenas variações de parâmetros, matérias-primas utilizadas e o nome designado pelas próprias empresas produtoras. A tecnologia permanece a mesma em todos esses processos.

3.3.1 Selective Laser Melting/Sintering (SLM/SLS)

Selective Laser Melting (SLM) é a designação da rota de processamento de PBF onde o pó metálico é totalmente fundido, enquanto *Selective Laser Sintering* (SLS) refere-se a ao processamento em que ocorre derretimento parcial do pó metálico (KRUTH *et al.*, 2010).

Comparativamente, o método por SLM é mais vantajoso do que o SLS pois obtém melhor homogeneidade microestrutural, melhor taxa de densificação, acabamento superficial e melhor processabilidade de metais puros não-ferrosos. Entretanto, o SLM apresenta como desvantagem maior custo e tempo de processamento (GU *et al.*, 2012).

O processamento por SLM é um dos mais versáteis para a manufatura aditiva de materiais metálicos devido a ampla gama de materiais que podem ser utilizados, como as ligas de Al, Ti, Fe, Ni, Co, Cu e seus compósitos. É caracterizado também, pelo alto gradiente de temperatura das partículas, elevado tempo de impressão, capacidade de reciclagem da matéria-prima não utilizada (GOKULDOSS; KOLLA; ECKERT, 2017), alta tensão residual nas peças produzidas, bom acabamento superficial, e baixa espessura de camada (FROES; DUTTA, 2014).

A conformação da matéria-prima ocorre em uma câmara preenchida com gases inertes como o nitrogênio e o argônio, para evitar contaminação do metal com impurezas atmosféricas e proteger a poça de fusão (HERZOG *et al.*, 2016). A utilização de suportes para condução térmica e redução

de deformações causadas por tensões residuais durante a impressão, também são uma necessidade dos processos por PBF que encarecem sua aplicação. O aspecto final da peça e a precisão dimensional também são dependentes da granulometria do pó metálico utilizado, com partículas mais finas gerando produtos de acabamento mais liso e melhor precisão dimensional ao custo de maior dificuldade de operação com o pó em si, enquanto partículas maiores permitem melhor dispersão do pó pela impressora, com a desvantagem de peças de menor precisão dimensional e de superfícies mais rugosas (GIBSON *et al.*, 2021).

3.3.2 Electron Beam Melting (EBM)

Electron Beam Melting (EBM), ou Electron Beam Powder Bed Fusion (EB-PBF) é um sistema de manufatura aditiva dependente de feixe de elétron de alta energia para fundir o pó metálico. Desenvolvido na *Chalmers University of Technology*, Suécia, foi comercializado pela Arcam, Suécia, e hoje pertence a General Electric. Como nos outros sistemas de PBF, o feixe de elétrons é incidido sobre a matéria-prima causando fusão localizada e posterior solidificação da poça de fusão com o movimento do feixe, produzindo a peça plano por plano (GIBSON *et al.*, 2021).

As impressoras de EBM utilizam uma câmara de vácuo com uma coluna sobreposta onde os cátodos e filamentos que produzem o feixe de elétrons estão localizados. O pó metálico é fornecido para a câmara de vácuo através de alimentadores, e o feixe de elétrons é controlado através do uso de lentes eletromagnéticas. Com o término da manufatura de cada camada, a plataforma de construção móvel da câmara de vácuo é abaixada automaticamente, mais matéria-prima é homogeneizada mecanicamente na câmara de vácuo, e o processo se repete até a peça estar pronta.

A manufatura aditiva de metais por EBM possui diversas vantagens que podem ser destacadas. O processamento sob vácuo possibilita a produção de peças com alto rigor de especificidade química. Possíveis poros inclusos na peça também são mais facilmente tratados através de prensagem isostática a quente (HIP), pois os poros detêm vácuo ao invés de moléculas de gás. O uso de feixe de elétrons também resulta em menor consumo de energia, pois a transmissão de calor penetra melhor no pó metálico e é menos influenciada pela reflexividade do metal trabalhado. Outro diferencial é a rápida velocidade de escaneamento do feixe de elétrons, e a possibilidade de se trabalhar com partículas de pó metálico maiores (GE, c2020).

O feixe de elétrons também ajuda a manter a câmara de vácuo e o pó metálico em temperaturas elevadas, reduzindo tensões residuais. A boa transmissão de calor do método e as altas temperaturas também conferem um crescimento de grão contíguo, mais semelhante ao observado em peças fundidas. (GIBSON *et al.*, 2021).

No que diz respeito a matéria-prima utilizada em EBM, Biamino *et al.* (2010, p.776) afirma que: “[...] o processo EBM tem potencial de trabalhar com várias classes de materiais, como por

exemplo, aço inox, aço para ferramentas, superligas de níquel, superligas de cobalto, metais duros, compostos intermetálicos, alumínio, cobre, berílio e nióbio”. Entretanto, o foco da tecnologia permanece na conformação de titânio e suas ligas em implantes médicos, aplicações aeroespaciais e automotivas.

O titânio, por ser um material que apresenta alta temperatura de fusão, baixa fluidez e alta reatividade, traz dificuldades para métodos usuais (forjaria, extrusão e fundição) de processamento (MITCHELL, 1998). Ligas como γ -TiAl, de baixa densidade e alta resistência específica, resistência a fadiga, oxidação e corrosão em alta temperatura são visadas para a aplicação de pás de turbinas na aviação (BIAMINO *et al.*, 2010). Contudo, a aplicabilidade das ligas γ -TiAl é cerceada pela baixa ductilidade, dificuldade de conformação, e baixa homogeneidade de constituintes ao longo de peças fundidas (WU, 2006). A manufatura de peças complexas de liga Ti-48Al-2Cr-2Nb através de EBM, porém, apontou resultados promissores, como baixíssima impureza, baixa microporosidade residual, microestrutura fina e homogênea, e baixíssimo nível de defeitos internos (BIAMINO *et al.*, 2010).

3.4 BINDER JETTING (BJT)

Similar ao processo por PBF, no método de manufatura aditiva por Binder Jetting a matéria prima de particulado metálico é depositada em uma cama e então dispersada mecanicamente para homogeneização. Bicos na impressora derramam gotículas do agente ligante de acordo com o formato da peça, fazendo a união das partículas em contato com o ligante e das camadas impressas entre elas mesmas. Efetuado o gotejamento, dispersa-se outra camada de pó e o processo se reinicia até que a conformação do produto verde esteja completa. (BAI; WAGNER; WILLIAMS, 2017).

Normalmente, a parte impressa é deixada na cama de pó por um tempo para que haja a ação total do agente ligante e para elevar as propriedades mecânicas da parte verde. O pós-processamento consiste na remoção da peça, do sopro de pó residual com ar comprimido, e no caso dos materiais metálicos, aquece-se a peça em forno ou se faz a infiltração com metal de menor ponto de fusão para remover o agente polimérico (GIBSON *et al.*, 2021).

O processamento por BJT compreende uma série de vantagens. Primeiramente, o maquinário é mais barato que os outros processos. Em segundo lugar, o BJT pode ser aplicado em diversos materiais metálicos, e não apresenta desvantagens quando trabalhado com metais de alta refletividade óptica, alta condutividade térmica ou baixa estabilidade térmica. O processo também tem alta escalabilidade diretamente ligada ao número de bicos da impressora, e não necessita do uso de ancoragem ou estruturas de suporte. Entretanto, a densidade final da maioria das peças obtidas através de BJT é mais baixa do que a de peças obtidas por metalurgia do pó ou por outros processos de manufatura aditiva (LI *et al.*, 2020).

Outra vantagem do processo de BJT é que como o aquecimento ocorre apenas no pós-processamento, com a peça já pronta, não existem elevados gradientes de temperatura que criem tensões residuais. Entretanto, como o processo de consolidação depende de sinterização, é comum a geração de porosidade, com o tamanho e formato dos poros sendo variável entre peças iguais produzidas na mesma impressora. A microestrutura obtida é grosseira, fruto dos tratamentos térmicos de cura, sinterização e recozimento, e por isso os produtos de BJT são, no geral, menos resistentes mecanicamente do que os obtidos por PBF ou DED (GOKULDOSS; KOLLA; ECKERT, 2017).

No que diz respeito a matéria-prima, Loes *et al.* (2019) aponta que a processabilidade do material por BJT depende da fluência das partículas metálicas depositadas na cama de pó. De modo a conferir maior densidade para as partes obtidas, BJT utiliza primariamente pós finos, aditivos de sinterização e misturas. Dentre os elementos, composições e ligas trabalhadas, incluem-se ligas de aço, aços inox e tungstênio. Outros materiais como Inconels, e ligas de cobalto, cromo e tungstênio estão em desenvolvimento (GIBSON *et al.*, 2021).

3.5 DIRECTED ENERGY DEPOSITION (DED)

Enquanto os métodos anteriores faziam uso de uma cama de pó metálico que era seletivamente fundida ou sinterizada no formato da peça, na tecnologia de DED, o pó ou fio metálico é depositado e ao mesmo tempo fundido por uma fonte de energia, que pode ser laser, arco voltaico, feixe de elétrons ou fricção. Dentre estes, o laser e o feixe de elétron são os mais utilizados, e no sistema de DED, são focalizados na direção onde o pó ou fio alimentado faz contato com o substrato, derretendo-o e aplicando a camada de material derretido da qual será feita a peça, construindo assim, camada por camada, um produto tridimensional definido pelo modelo em CAD (GIBSON *et al.*, 2021).

Para o sistema DED que utiliza matéria-prima em pó, tem-se cabeças ou bicos de deposição que são responsáveis por adicionar pó metálico no sistema. O pó é derretido pelo laser focalizado para formar as camadas da peça desejada. O sistema por fio substitui apenas a matéria-prima do processo, porém com o efeito de melhores taxas e maior eficiência de deposição, menor precisão dimensional e baixa qualidade superficial da peça (FRAZIER, 2014). Para processamento de metais menos reativos, utiliza-se sistema de *gas shielding* acoplado ao bico de deposição. Já para metais mais reativos, faz-se necessário a utilização de câmara fechada com atmosfera inerte (GIBSON *et al.*, 2021).

DED é um processo menos amplo na manufatura aditiva de partes inteiras devido a baixa precisão, resolução e da necessidade de usinagem pós-processo para a correção de defeitos superficiais. Entretanto, essa tecnologia tem a capacidade de promover reparos de peças de engenharia danificadas, ou a modificação destas (DUDA; RAGHAVAN, 2016). Isso é possível pois

DED é uma tecnologia que pode fazer uso da própria superfície de, por exemplo, uma peça danificada para a deposição de material.

O método por DED apresenta vantagens características em relação a outros processos de manufatura aditiva de materiais metálicos, como altas taxas de deposição de material, capacidade de produzir peças substancialmente maiores (DUDA; RAGHAVAN, 2016), de produzir peças totalmente densas e com alto controle de característica microestruturais (GIBSON *et al.*, 2021), e para algumas ligas metálicas como Ti6-Al4-V, de conformar produtos com propriedades mecânicas superiores aos métodos convencionais (LI; WANG; ZENG, 2017, apud OH *et al.*, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Atualmente, como apontado por Quinlan e Hart (2020), o preço da AM de metais ainda é muito proibitivo para pequenas e médias empresas, e mesmo para as grandes que podem arcar com os gastos de impressão 3D de metais, ainda é um investimento de risco. Isso torna a compreensão e estudo dos métodos de manufatura aditiva essencial para a viabilização econômica, desenvolvimento da tecnologia, e adaptação desta na indústria.

Após constatada a vantagem de se utilizar um processo de manufatura aditiva para a produção de determinado produto, é importante avaliar as características de cada método de impressão para atingir-se eficácia e eficiência produtiva. Baseado nas informações adquiridas pela literatura, resume-se alguns aspectos dos métodos no seguinte quadro:

Quadro 1 – Comparação dos processos de AM de metais

Característica	SLM	EBM	DED	BJT
Volume de construção (L)	~ 160	~ 7,2	Elevado e flexível	~ 300
Taxa de construção (cm ³ /h)	1-120	55-80	16-2500	225-12000
Energia	Laser	Feixe de Elétrons	Laser/Feixe de Elétrons	Sinterização Pós- Impressão
Tensões residuais	Elevado	Baixo	Elevado	Baixo
Espessura de camada (µm)	20-100	100-200	100-4000	50-150

Fonte: elaborado a partir de dados adquiridos de Gibson *et al.* (2021), MIT (2021), General Electric (c2021), Digital Metal (2021), Desktop Metal (c2020) e Froes e Dutta (2021).

Além dessas características, deve ser considerado também o elemento que será processado. Como indicado por Gokuldoss, Kolla e Eckert (2017), os processos com feixes de elétron, especialmente EBM, não são recomendados para metais de baixo ponto de fusão como Zn, Mg e Al,

pois a energia do feixe é capaz de vaporizar esses materiais e dispersá-los pela câmara de impressão. Da mesma forma, SLM é um processo de taxas de resfriamento elevadíssimas, que dificultam sua aplicação com intermetálicos e materiais suscetíveis a trincar por tensões residuais.

Gibson *et al.* (2021), porém, aponta que esses altos gradientes de temperatura, comuns de processos de SLM e DED, podem ser benéficos para obtenção de produtos com microestruturas metaestáveis de maior dureza e resistência mecânica. Também se observou que DED é uma tecnologia promissora para reparo de produtos danificados (OH *et al.*, 2019) e para deposição de revestimento sobre peças já conformadas (GIBSON *et al.*, 2021).

A tecnologia de DED desenvolvido pela NASA, denominado *Electron Beam Freeform Fabrication* (EBF³), também traz altas flexibilidades de parametrização. Fazendo uso de fios metálicos como matéria-prima, o EBF³ permite modos de alta deposição, aumentando o tempo de produção ao custo de detalhamento e precisão da peça, ou o contrário em modos de baixa deposição. Mais ainda, os estudos conduzidos com EBF³ revelaram que o processamento de 2219 Al e Ti-Al6-V4 por esse processo tem potencial de produção de peças comparáveis, em resistência a tração, com as obtidas por forjamento (TAMINGER; HAFLEY, 2006).

O interesse atribuído a este método em aplicações espaciais se dá pela maior eficiência energética do feixe de elétrons quando comparado ao laser e pela vantagem do processo ao ser utilizado em meio vácuo. A manufatura aditiva também é vantajosa nesse meio pois corta a necessidade de se enviar partes prontas em foguetes (NASA, 2021). Entretanto, o EBF³ peca também em má qualidade superficial das peças obtidas, demandando usinagem e outros métodos para regularizar a superfície (TAMINGER *et al.*, 2004).

Para as ligas de titânio, os métodos de manufatura aditiva obtêm peças comparáveis em propriedades mecânicas às peças obtidas por métodos convencionais, como apontado por Froes e Dutta (2021). A manufatura aditiva também permite o processamento de ligas cujos métodos convencionais encontram limitações (BIAMINO *et al.*, 2010).

Quando o foco do processamento são produtos que não necessitam de propriedades mecânicas muito elevadas e sim complexidade geométrica e porosidade, como é o caso de próteses biomédicas, processos como o BJT são mais indicados pois proporcionam essas características a preços mais acessíveis. O BJT também apresenta vantagens na produção de peças maiores e maior volume de peças quando comparado aos processos de PBF (GOKULDOSS; KOLLA; ECKERT, 2017).

Comum a todos os métodos, porém, é a necessidade de pós-processamentos, seja para a separação da peça e da plataforma de construção, redução de microporosidades e tensões residuais, correções de dimensionamento e de aspecto da peça (GIBSON *et al.*, 2021).

Muitos dos parâmetros de processo também são controláveis, como diâmetro do feixe de elétrons ou laser, tamanho das partículas de pó a serem fundidas ou sinterizadas, tempo de incidência

do laser sobre as partículas, entre outros. Como a característica final das peças obtidas pelos processos de manufatura aditiva aqui estudados depende muito destes parâmetros, o estudo do efeito dessas alterações pode trazer melhor controle de processamento, e assim, maior regularidade nas características dos produtos obtidos e melhor eficiência e eficácia aos métodos de manufatura aditiva de metais no geral.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora seja um método inovador, a manufatura aditiva de materiais metálicos dificilmente substituirá os métodos usuais de manufatura formativa e subtrativa. Entretanto, a manufatura aditiva, mesmo com seus fatores inibidores como alto valor de matéria-prima e maquinário, baixa capacidade produtiva, inconstância nas propriedades de produtos produzidos, dependência de mão-de-obra especializada e pós-processamentos, entre outros, tem grande potencial para expandir. Isso é devido a características únicas estudadas e citadas nesse trabalho, como: a complexidade de forma, a processabilidade de ligas dificilmente trabalháveis por outros métodos, o pouco desperdício de material, a capacidade de adaptação e aperfeiçoamento do produto sem grandes pausas na cadeia produtiva, entre outros.

Sendo uma tecnologia relativamente recente, ainda é necessário muito estudo na área, especialmente no que diz respeito a influência dos parâmetros de processo (diâmetro do feixe, velocidade do feixe, tamanho das partículas, temperatura do processamento etc.) nas propriedades dos produtos obtidos. O melhor controle destas pode elevar a manufatura aditiva de metais como uma forma de processamento mais concorrente aos métodos usuais.

Atualmente, a aplicação dos métodos discutidos nesse trabalho ainda é limitada, concentrando-se em algumas peças da indústria automotiva, aeroespacial, biomedicina, prototipagem, além de reparos e recobrimento. Contudo, com o interesse na manufatura aditiva de materiais metálicos crescendo, tal como o aumento de concorrência e oferta de matéria-prima, é possível que no futuro as impressoras 3D de materiais metálicos sejam um artigo tão comum quanto as impressoras 3D de materiais poliméricos são atualmente.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F2792-12A**: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. West Conshohocken, Pennsylvania: Astm International, 2015. 3 p. Disponível em: astm.org. Acesso em: 15 maio 2021.

ATTARAN, M. Additive Manufacturing: The Most Promising Technology to Alter the Supply Chain and Logistics. **Journal of Service Science and Management**, [S. l.], ano 2017, v. 10, n. 3, 30 abr. 2017. Disponível em: <https://www.scirp.org>. Acessado em: 1 maio 2021.

BAI, Y.; WAGNER, G.; WILLIAMS, C. B. Effect of Particle Size Distribution on Powder Packing and Sintering in Binder Jetting Additive Manufacturing of Metals. **Manufacturing Science And**

Engineering. [S. l.], p. 1-6. 1 jul. 2017. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/>. Acesso em: 20 set. 2021.

BERMAN, B. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business Horizon**, Indiana, USA, ano 2012, v. 55, ed. 2, p. 155-162, mar./abr. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acessado em: 1 maio 2021.

BHAVAR, V. *et al.* A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing. In: BADIRU, A. B.; VALENCIA, V. V.; LIU, D. **Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry.** [S. l.]: CRC Press, 2014. cap. 15, p. 251-252.

BIAMINO, S. *et al.* Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation. **Intermetallics.** [S. l.], p. 776-781. 14 dez. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 10 out. 2021.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó: Técnica e Produtos.** 3. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1992. 352 p.

DESKTOP METAL. **Desktop Metal: Define the future. Make it real.** c2020. Disponível em: <https://www.desktopmetal.com>. Acesso em: 21 out. 2021.

DIGITAL METAL. **DM P2500 – 3D metal printing at its best.** Disponível em: <https://digitalmetal.tech/>. Acesso em: 21 out. 2021.

DUDA, T.; RAGHAVAN, L. V. 3D Metal Printing Technology. **IFAC: Papers Online**, Durrës, Albania, ano 2016, v. 49, n. 29, p. 103-110, 2016. 17th IFAC Conference on International Stability, Technology and Culture TECIS 2016: Durrës, Albania, 26-28 October 2016.

FRAZIER, W. E.; WANG, Z.; ZENG, X. Metal Additive Manufacturing: A Review. **Journal Of Materials Engineering And Performance.** [S. l.], p. 1917-1928. 08 abr. 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/>. Acesso em: 25 out. 2021.

FROES, F. H.; DUTTA, B. The Additive Manufacturing (AM) of Titanium Alloys. **Advanced Materials Research.** [S. l.], p. 19-25. 20 set. 2021. Disponível em: <https://www.scientific.net/>. Acesso em: 8 out. 2021.

GENERAL ELECTRIC. **Arcam EBM Q20plus.** c2021. Disponível em: https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020-07/EBM_QPlus20_Bro_A4_EN_v1.pdf. Acesso em: 20 out. 2021.

GENERAL ELECTRIC. **Concept Laser X Line 2000R.** c2021. Disponível em: https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020-04/DMLM_X%20Line_Bro_8_US_EN_v1.pdf. Acesso em: 21 out. 2021.

GIBSON, I. *et al.* **Additive Manufacturing Technologies.** 3. ed. Cham: Springer, 2021. 685 p.

GOKULDOSS, K.; KOLLA, S.; ECKERT, J. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. **Materials.** [S. l.], p. 672-684. 19 jun. 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>. Acesso em: 15 set. 2021.

GU, D. D. *et al.* Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. **International Materials Reviews**. [S. l.], p. 133-164. 12 nov. 2013. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/>. Acesso em: 15 out. 2021.

HARRIS, I. D. Development and implementation of metals additive manufacturing. Separata de: BADIRU, A. B.; VALENCIA, V. V.; LIU, D. **Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry**. [S. l.]: CRC Press, 2017. cap. 13, p. 215-224.

HERZOG, D. *et al.* Additive manufacturing of metals. **Acta Materialia**, [S. l.], ano 2016, v. 117, p. 371-392, 15 set. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 21 maio 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/ASTM 52900:2015** – Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. 2015.

KOHLHUBER, M. *et al.* **Additive Manufacturing**. Munich: Acatech - National Academy of Science and Engineering, jun. 2017. 64 p.

KRUTH, J-P. *et al.* Part and material properties in selective laser melting of metals. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMACHINING, 16., 2010, Shanghai. **Proceedings [...]**. Shanghai: ISEM, 2010. p. 1-12. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 5 set. 2021.

LI, M. *et al.* Metal Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review. **Journal Of Manufacturing Science And Engineering** 1. [S. l.], p. 1-45. 01 set. 2020. Disponível em: <https://par.nsf.gov/>. Acesso em: 22 out. 2021.

LORES, A. *et al.* A review on recent developments in binder jetting metal additive manufacturing: materials and process characteristics. **Powder Metallurgy**. [S. l.], p. 267-296. 24 set. 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/>. Acesso em: 14 out. 2021.

MITCHELL, A. Melting, casting and forging problems in titanium alloys. **Materials Science & Engineering**. [S. l.], p. 257-262. 15 mar. 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 6 set. 2021.

MIT. **Center for Additive and Digital Advanced Production Technologies (APT)**. Comparing AM Processes. Disponível em: <http://apt.mit.edu/>. Acesso em: 13 nov. 2021.

NASA. **Electron Beam Freeform Fabrication**. 2021. Disponível em: <https://www.nasa.gov/topics/technology/features/ebf3.html>. Acesso em: 12 nov. 2021.

OH, W. J. Repairing additive-manufactured 316L stainless steel using direct energy deposition. **Optics & Laser Technology**. [S. l.], p. 6-17. set. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 20 out. 2021.

PETROVIC, V. *et al.* Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies. **International Journal of Production Research**, [S. l.], ano 2011, v. 49, ed. 4, p. 1061-1079, 15 fev. 2011. DOI:10.1080/00207540903479786 . Disponível em: <https://www.tandfonline.com> . Acesso em: 3 maio 2021.

QUINLAN, H.; HART, J. Additive Manufacturing: Implications for Technological Change, Workforce Development, and the Product Lifecycle. **Work of the Future**, [S. l.], ano 2020, nov. 2020. Disponível em: <https://workofthefuture.mit.edu> . Acessado em: 29 abr. 2021.

REDWOOD, B.; SCHÖFFER, F.; GARRET, B. **The 3D Printing Handbook**: Technologies, design and applications. [S. l.]: 3D Hubs, 2017. 304 p. ISBN 9789082748505.

TAMINGER, K. M.; HAFLEY, R. A. **Electron Beam Freeform Fabrication for Cost Effective Near-Net Shape Manufacturing**. 2006. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20080013538/downloads/20080013538.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2021.

TAMINGER, K. M. *et al.* Effect of Surface Treatments on Electron Beam Freeform Fabricated Aluminum Structures. In: INTERNATIONAL SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM, 15., 2004, [S. l.]. **Proceedings [...]**. [S. l.]: [S. n.], 2004. p. 1-11.

THOMAS, D. S.; GILBERT, S. W. Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing: A Literature Review and Discussion. **National Institute of Standards and Technology Technical Series Publications**, [S. l.], ano 2014, dez. 2014. Disponível em: <https://www.nist.gov>. Acessado em: 2 maio 2021.

UPADHYAYA, G. S. **Powder Metallurgy Technology**. Cambridge: Cambridge International Science Publishing, ago. 2002. 170 p.

WELLER, C.; KLEER, R.; PILLER, F. T. Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. **Int. J. Production Economics**, [S. l.], ano 2015, v. 164, p. 43-56, jun. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acessado em: 2 maio 2021.

WU, X. Review of alloy and process development of TiAl alloys. **Intermetallics**. [S. l.], p. 1114-1122. 2 maio 2006. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: 5 out. 2021.

ZHANG, Y. *et al.* Additive manufacturing of metallic materials – a review. **Journal Of Materials Engineering And Performance**. [S. l.], p. 1-13. 24 maio 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/>. Acesso em: 14 out. 2021.