

ESTUDO TEÓRICO DAS DIFERENÇAS ENTRE MANUFATURA ADITIVA EM METAIS, POLÍMEROS E CERÂMICAS

André Luiz Silva da Costa, andr.luis27@hotmail.com
André Luiz Brito Novelino, andre_novelino@hotmail.com
Maksym Ziberov, mziberov@unb.br

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília-DF.

Resumo: A manufatura aditiva se tornou um processo de grande potencial, graças aos avanços tecnológicos obtidos ao longo das últimas décadas. Em razão de diferentes demandas que surgiram no mercado, novos processos/tecnologias de fabricação foram criados para trabalhar com diferentes tipos de materiais e possibilitar a realização de peças com geometrias e tamanhos diversos associados a uma precisão elevada. Devido à grande necessidade de evoluir e se adequar a demanda e padrão de qualidade da indústria, e levando em consideração também questões ambientais como a economia de material, a manufatura aditiva começou a ser mais presente em diferentes setores da indústria, como o setor automotivo e aeroespacial, bem como em pesquisas e aplicações na biomedicina, tornando-se um segmento de grande ascensão econômica. Porém, para se encaixar em cada setor, deve haver a seleção adequada do método de deposição, para que seja possível obter custo e acabamento superficial, compatíveis com a aplicação e com o material utilizado. Desta forma, é essencial a correta seleção do processo de deposição para produção aditiva de materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar os diferentes processos utilizados para a manufatura aditiva de metais, polímeros e cerâmicas, examinando seu funcionamento e exibindo um comparativo entre as tecnologias, elucidando as vantagens e limitações de cada processo, e apresentando alguns exemplos de aplicações já estabelecidos no mercado. Para as tecnologias baseadas na deposição de metal, são apresentados processos baseados na fusão do leito de pó, denominados Power Bed Fusion, processos baseados na deposição por energia direcionada (Directed Energy Deposition) com deposição de pó ou arame, e ainda processos baseados no jateamento de material, denominado Metal Binder Jetting. Para os processos de deposição de polímeros, são apresentados os processos de fabricação por filamentos fundidos, sinterização do pó e Directed Cryo Writing. Quanto aos processos de deposição de cerâmicas, processos deposição por energia direcionada também são apresentados além do processo Direct Ink Writing. Conclui-se que a manufatura aditiva de metais apresenta maior evolução quanto a qualidade de fabricação, com métodos permitindo a precisão em uma faixa de até 6 μm . Quanto aos polímeros, uma grande diversidade de materiais podem ser utilizados no processo com equipamentos mais acessíveis, além de permitir filamentos provenientes de materiais reciclados. Para as cerâmicas, a manufatura aditiva amplia as possibilidades de geometrias para fabricação e reduz custos, uma vez que a usinagem deste tipo de material é restrito a ferramentas de elevado custo. Um destaque dentre os processos analisados vai para o processo Binder Jetting (BJ), cujo conceito permite aplicação para as três classes de materiais.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Power Bed Fusion, Directed Energy Deposition, Metal Binder Jetting, Directed Cryo Writing.

1. INTRODUÇÃO

A incessante busca da indústria pela otimização de tempo e recursos no processo de fabricação de produtos mostra o quão importante é a busca por processos novos e otimizados. Com isso, diferentes soluções surgiram ao longo dos anos, e uma das alternativas que apresenta maior interesse devido ao potencial de evolução é a Manufatura Aditiva (MA). A norma ISO/ASTM (ISO, 2015) estabelece os termos usados na MA, logo, segundo essa norma, há sete tecnologias MA utilizadas no desenvolvimento de componentes: Jato de Aglutinante (Binder Jetting - BJ), Fusão em Leito de Pó (Power Bed Fusion - PBF), Laminação de Folhas (Sheet Lamination - SL), Deposição por Energia Direcionada (Directed Energy Deposition - DED), Extrusão do Material (Material Extrusion - ME), Jateamento de Material (Material Jetting - MJ) e Fotopolimerização em Cuba (Vat Photopolymerization - VP).

A manufatura aditiva permite a fabricação de peças complexas, que podem ser feitas sob encomenda em configurações exclusivas para atender aplicações específicas, com redução dos custos de produção, e processo automatizado, atendendo requisitos de precisão e acabamento necessários e reduzindo desperdícios de material (Hwa *et al.*, 2017).

O leque de possibilidades para a fabricação de produtos, a partir de diferentes materiais, permitido pela manufatura aditiva favorece diversos setores, como o automotivo e aeroespacial, com a possibilidade de fabricação de peças leves e com perfis aerodinâmicos, promovendo menor gasto de combustível, ou ainda no setor biomédico, cujas aplicações incluem fabricação de ferramentas cirúrgicas customizadas, próteses específicas para pacientes, *scaffolds* e próteses dentárias (Hwa *et al.*, 2017).

O mercado global para a manufatura aditiva, incluindo sistemas, material e fornecedores de peças, de acordo com um relatório publicado pela AMPOWER GmbH & Co. (2021), apresentou um crescimento de 32,2 % de 2016 até 2020, onde foi avaliado um mercado de 2,03 milhões de euros. O relatório também apresenta uma previsão de crescimento de 29,2% até 2025. Quanto aos setores da indústria que utilizam aplicações para a manufatura aditiva, Vafadar, *et al.* (2021) apresentam os dados do mercado para as diferentes áreas de aplicação, representado na Fig. 1. Os segmentos da indústria automotiva e de maquinários industriais apresentam a maior fatia as aplicações, seguido pelo setor aeroespacial.

Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar as diferentes tecnologias utilizadas para a manufatura aditiva de peças fabricadas em metais, polímeros ou cerâmicas, identificando as características e particularidades de cada processo. Além disso, serão apresentados exemplos de produtos e pesquisas feitas no âmbito acadêmico e industrial, exibindo os resultados e comparando os diferentes processos.

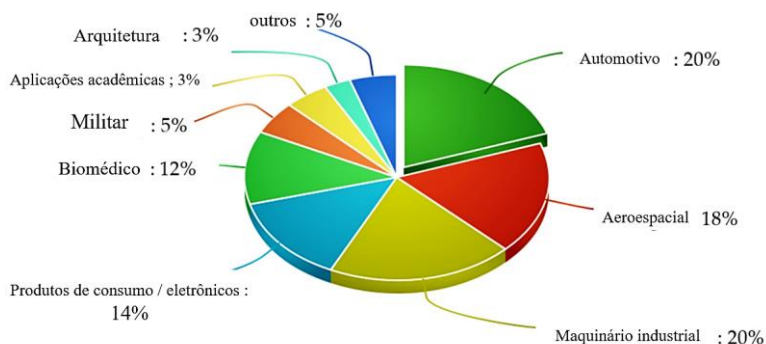


Figura 1. Taxa dos segmentos da indústria que adotam processos de fabricação por MA (adaptado de Vafadar, *et al.*, 2021).

1.1 Metodologia de pesquisa

A metodologia de pesquisa consistiu em uma pesquisa na base de dados *ScienceDirect*, promovida pela *Elsevier*, no livro “Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D”, e no *Google Scholar*. Artigos *review* foram retirados através de uma pesquisa seletiva utilizando palavras-chaves que envolvem o assunto central de manufatura aditiva (*Additive Manufacturing, Polymers AM, Ceramics AM etc.*), além dos diferentes métodos de deposição (*Direct Energy Deposition, Power Bed Fusion, Binder Jetting etc.*). A partir desses artigos bases, foi selecionado os artigos relevantes citados por tais autores para o aprofundamento do assunto abordado. Em complementar a esta pesquisa, uma busca foi realizada por relatórios da área da manufatura aditiva e empresas que pesquisam e/ou trabalham no setor com o desenvolvimento de produtos para os diversos tipos de materiais.

2. MANUFATURA ADITIVA DE METAIS

A manufatura aditiva de metais envolve crescente interesse na indústria atualmente, uma vez que novas tecnologias implementadas aumentam cada vez mais a viabilidade econômica na fabricação de peças complexas em aço. Sistemas de controle, automação de processos e o auxílio de simulações computacionais complementam e expandem o leque de possibilidades neste processo, otimizando a fabricação das peças com alto grau de precisão (Vafadar, *et al.*, 2021).

Quanto às tecnologias de deposição para o metal, há atualmente diferentes métodos de deposição que podem ser utilizados. O primeiro deles abordado é o método de deposição por fusão em leito do pó ou PBF (*Powder Bed Fusion*), cujo conceito está presente na Fig. 2, onde uma fonte de energia é direcionada na região desejada de uma camada de material, ocasionando a fusão das partículas de pó e a solidificação em seguida gera a geometria daquela camada, repetindo o processo para a formação das demais camadas da geometria fabricada. Esse método engloba diferentes sistemas como o L-PBF (*Laser Powder Bed Fusion*), conhecido também como SLM (*Selective Laser Melting*), e o EB PBF ou EBM (*Electron Beam Powder Bed Fusion / Melting*). (Volpato, *et al.*, 2017; Svetlisky, *et al.*, 2021). De acordo com Jiménez, *et al.* (2021), em 2019, 48% das publicações realizadas foram baseados em estudos para PBF, onde 31% foram baseados no SLM e 17% para o EBM.

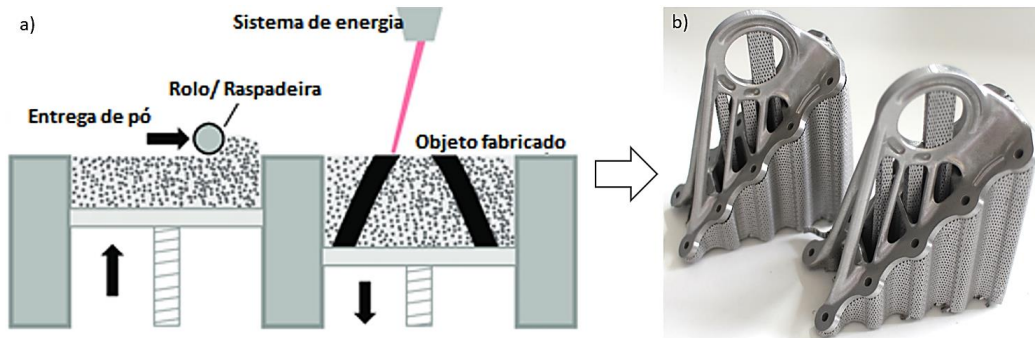


Figura 2. (a) Resumo do processo de Fabricação pelo Leito do pó (adaptado de Wiberg 2019) e (b) Exemplo de peça fabricada pelo processo SLM (Childerhouse e Jackson, 2019).

Uma das ligas metálicas que são utilizados na fabricação por PBF são as ligas de magnésio. Kurzynowski, *et al.* (2020) aborda o uso dessa liga na fabricação de componentes na indústria aeroespacial, como os exemplos apresentados na Fig. 3, utilizando o processo SLM. Os autores mencionam entre as vantagens de utilização desse processo, o baixo tempo de fabricação e gasto de material para a fabricação de geometrias e a possibilidade de fabricação de peças com otimização do peso, um fator crítico para o consumo de combustível no setor aeroespacial abordado no trabalho.

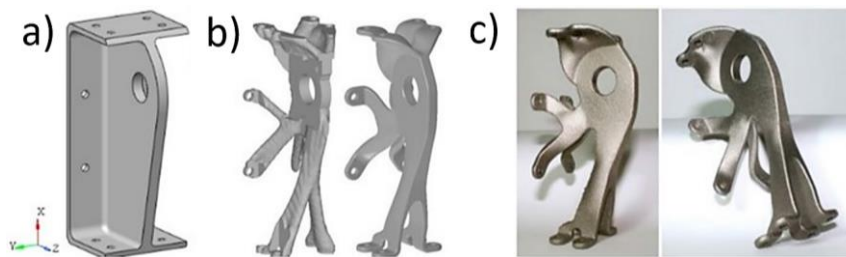


Figura 3. Modelo original (a); modelo otimizado topologicamente (b) e peça final (c) de um suporte (adaptado de Seabra, *et al.*, 2016).

Outro método utilizado é o de deposição direta de energia, nomeado como DED (*Direct Energy Deposition*). Este método envolve sistemas de deposição por arame, como o WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*), presente na Fig. 4a, e o WLAM (*Wire Laser Metal Manufacturing*), e sistemas que depositam pó, como o LENS (*Lens Energy Net-Shaping*), representado na Fig. 4b, e LC (*Laser Cladding*). (Saboori, *et al.*, 2019; Rosli, *et al.*, 2021).

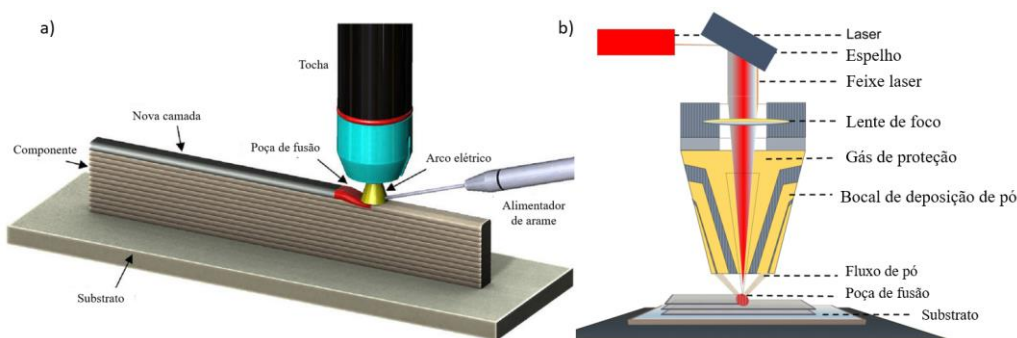


Figura 4. Processo de deposição (a) WAAM (Adaptado de McAndrew, *et al.*, 2018) e (b) LENS (adaptado de Gudatti, *et al.*, 2019).

Um exemplo de aplicação do DED para fabricação de componentes é a MX3D *bridge*, uma ponte de pedestres fabricada em aço inoxidável pela empresa MX3D, presente na Fig. 5. A ponte, que teve o projeto iniciado em 2017, foi instalada e aberta em 2021 em Amsterdã, na Holanda. (MX3D, 2021).

Os dois métodos de deposição apresentados (PBF e DED), realizam a fusão do material durante a deposição e formação da geometria, podendo ocasionar distorções devido ao aporte térmico durante a deposição. Porém, um terceiro método pode ser utilizado para contornar esse efeito, denominado *Metal Binder Jetting* (MBJ). Esse processo consiste no jateamento de material em forma de pó, assim como o PBF, porém realizando a união inicial utilizando uma cola.

Essa cola é depositada precisamente na região onde delimitada a camada da geometria, permitindo assim que a geometria seja formada em temperatura ambiente (Hubs, 2022).



Figura 5. Ponte fabricada pela MX3D e instalada em Amsterdã, Holanda (MX3D, 2021).

Após esse processo, como elucidado na Fig. 6 as peças produzidas passam pela etapa de cura da cola, e posteriormente submetidas aos processos de sinterização e/ou um tratamento térmico em um forno para que haja a união e fusão das partículas do pó, a fim de garantir as propriedades mecânicas desejáveis em peças fabricadas em metal (Huang, *et al.*, 2019).

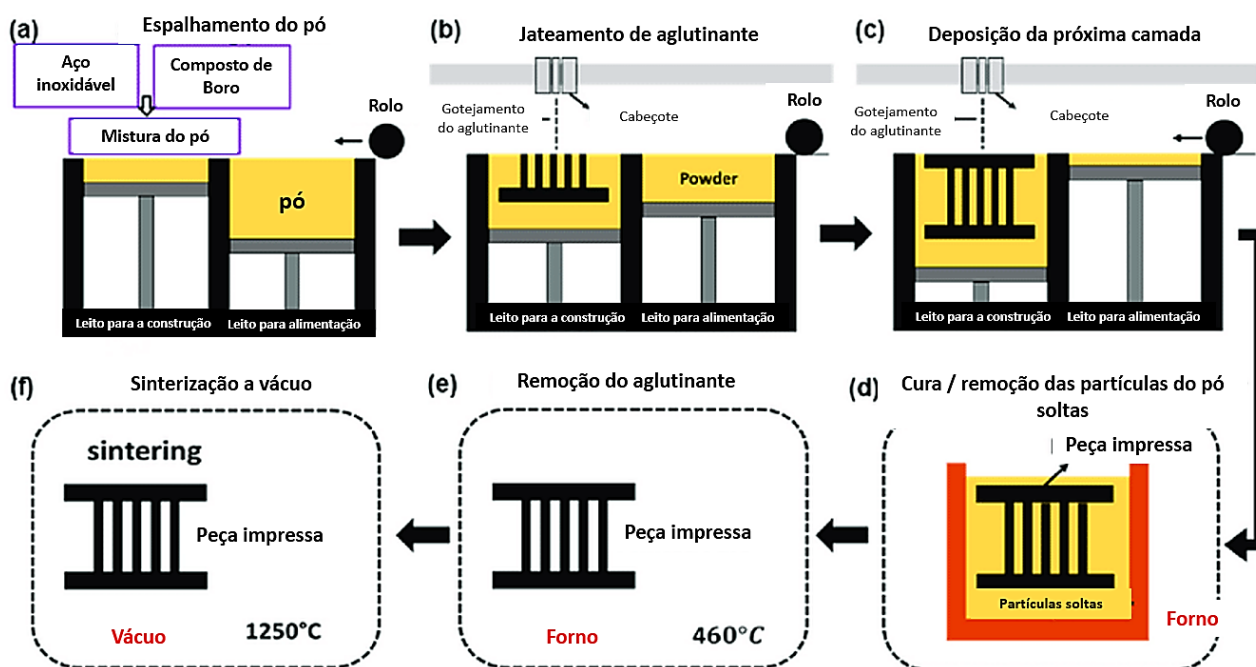


Figura 6. Esquemático do processo de jateamento de metal (*Metal Binder Jetting*) (adaptado de Huang, *et al.*, 2019).

Aplicações utilizando o MBJ já são amplamente encontradas em pesquisas e aplicações industriais de peças de tamanho pequeno/médio que necessitam de alta precisão dimensional, sendo uma vantagem da utilização do método. Os exemplos da Fig. 7 mostram o grau de qualidade superficial e a precisão de manufatura de uma peça o processo MBJ, na fabricação de peças com grau elevado de detalhes, ou ainda componentes que possuem canais de comunicação. De acordo com a fabricante Digital Metal Tech., é possível atingir uma precisão de 6 μm , podendo fabricar peças em aço inoxidável (316L e 17-4PH), Titânio, Inconel 625 e MAR M247 (Digital Metal Tech., 2019a).

3. MANUFATURA ADITIVA DE POLÍMEROS

Apesar dos materiais poliméricos oferecerem uma variedade de propriedade químicas e mecânicas que são úteis em uma ampla gama de aplicações, surgem, no início deste século, preocupações a respeito da poluição lixo plástico que representa uma grande ameaça à questão da baixa degradabilidade, o que afeta o meio ambiente. Assim, a MA tem se

tornado um processo industrial chave que pode desempenhar um papel relevante na transição de uma economia linear para a circular, uma vez que MA pode ser vista como uma ferramenta de reciclagem para reutilizar um material residual termoplástico e, então, influenciar a estrutura de fornecimento do material para melhorar a eficiência do consumo de recursos (Sanchez *et al.*, 2020).

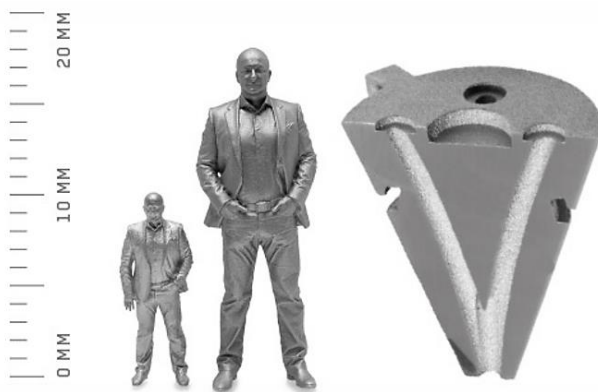


Figura 7. Componentes fabricados pela Digital Metal Tech utilizando o processo MBJ (adaptado de Digital Metal Tech, 2019b).

Para a fabricação desses componentes poliméricos pode-se utilizar estes processos: fabricação de filamentos fundidos (FFF), sinterização seletiva a laser (SLS), processamento digital de luz, estereolitografia e fusão multijato (MJF) (Pandelidi *et al.*, 2021), na Fig. 8 apresenta-se uma visão geral desses processos (Sanchez *et al.*, 2020). Ademais, os materiais usados são os termoplásticos, termofixos, elastômeros, hidrogéis, polímeros funcionais, misturas de polímeros, compostos e sistemas biológicos. O processo FFF é a técnica mais popular em sistemas de extrusão de material devido à sua prontidão no mercado e ao baixo custo do equipamento, bem como à disponibilidade de plataformas de construção em grande escala de sistemas de manufatura aditiva de grande área.

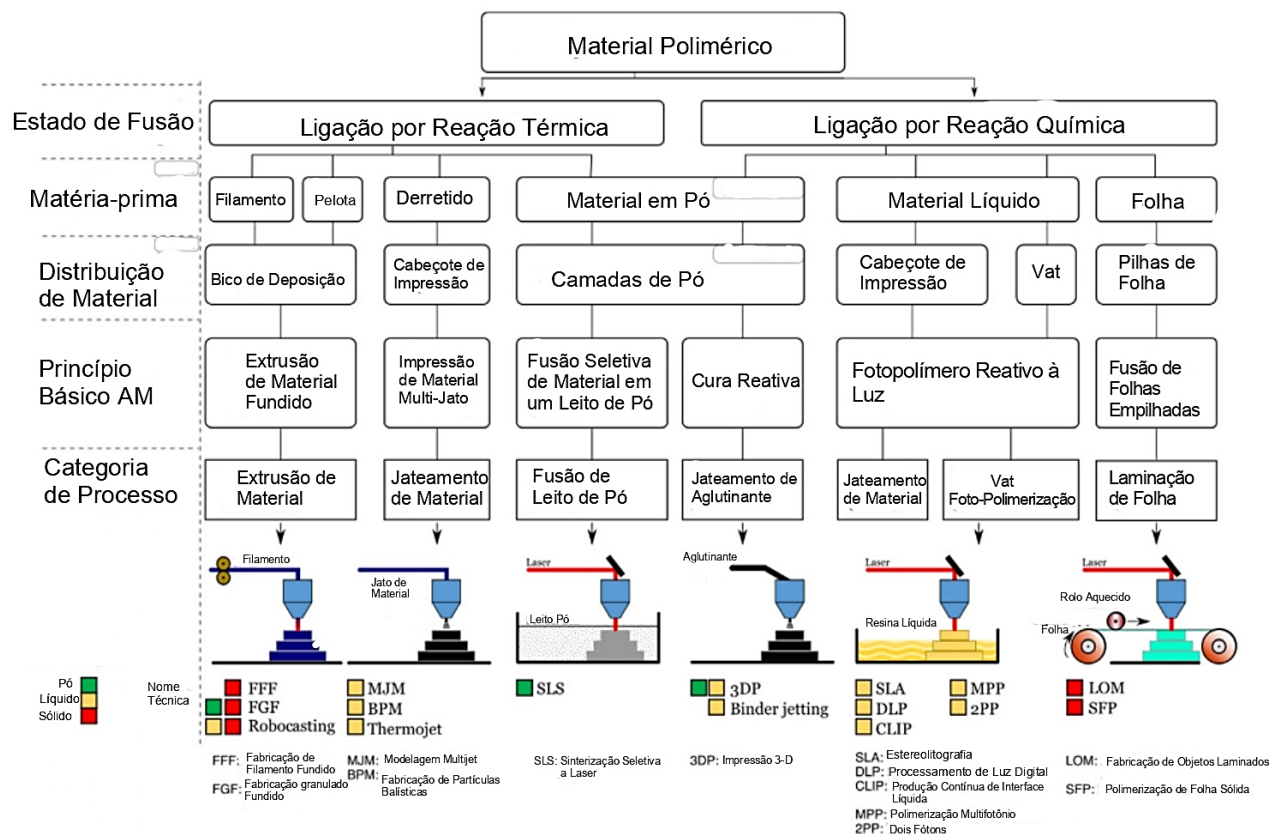


Figura 8. Visão geral dos processos de manufatura aditiva que usa materiais poliméricos (Sanchez *et al.*, 2020).

A competitividade desse método de fabricação, em relação aos demais, está relacionada à funcionalidade do objeto impresso, evoluindo desde protótipos rápidos ou ferramentais até o produto final do usuário. Assim, as propriedades mecânicas são um fator importante, então, na execução da fabricação, a anisotropia tem que ser reduzida ao máximo (Sanchez *et al.*, 2020). Segundo Collado *et al.* (2022), para aumentar a resistência mecânica e a rigidez das peças impressas, utiliza-se materiais de reforço com fibra contínua, que é um processo FFF. Os filamentos contínuos podem ser vidro, Kevlar ou fibra de carbono. Além disso, outra solução que os autores citam para a adesão de multimateriais seria a criação de intertravamento mecânico nas interfaces.

Dentre os processos baseados na extrusão de material, o processo *Robocasting*, também intitulado como *Direct Ink Writing* (DIW), pode ser utilizado em diversos tipos de materiais, incluindo os polímeros. O processo se baseia na deposição a temperatura ambiente de uma pasta constituída por uma mistura do material de adição com aglutinante, seguido pelo processo de sinterização (Shahzad e Lazoglu, 2021). No trabalho de Tang, *et al.* (2022), os autores realizaram a deposição de um polímero de alta densidade utilizando DIW. O material utilizado foi um polímero de alta densidade baseado em um composto de éster de cianato de Bisfenol-A (BACE) e resina epóxi (GE36). Avaliando 4 composições diferentes na deposição, foi possível fabricar uma geometria de malha, presente na Fig. 9a, utilizando uma composição de 50% BACE-20% GE36.

Um processo variante da DIW explorado por Kam, *et al.* (2020) intitula-se *Direct Cryo Writing* (DCW), onde consiste na deposição de material em uma plataforma resfriada. Nesse trabalho, os autores utilizaram um aerogel baseado em uma mistura aquosa de nanocristais de celulose e Xyloglucan, um composto presente nas paredes celulares de plantas. A tecnologia pode ser utilizada para formação de geometrias diversas e deposição com ângulos próximos a 120°, como presente na Fig. 9e. Tais resultados mostram o potencial da tecnologia para formação de estruturas 3D baseadas em polímeros naturais.

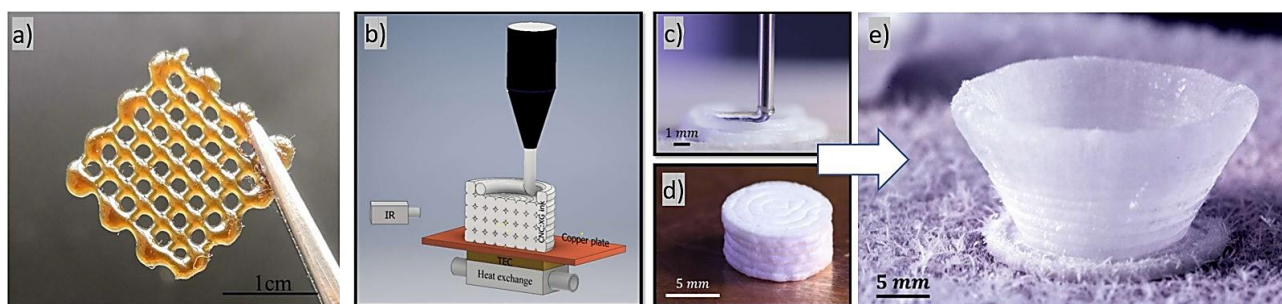


Figura 9. (a) Estrutura fabricada pelo processo DIW (adaptado de Tang, *et al.*, 2022) (b) Processo variante DCW; (c, d) Deposição do aerogel e (e) Geometria cônica fabricada pelo DCW (adaptado de Kam *et al.*, 2020).

4. MANUFATURA ADITIVA DE CERÂMICAS

Os materiais cerâmicos, devido às suas várias propriedades específicas, são usadas em uma ampla gama de aplicações, incluindo a indústria química, maquinários, eletrônicos, aeroespacial e engenharia biomédica (Galante *et al.*, 2019). Desta forma, as propriedades que os tornam materiais versáteis incluem alta resistência mecânica e dureza, boa estabilidade térmica e química e desempenho térmico, óptico, elétrico e magnético viável. Além disso, as técnicas de conformação podem ser moldagem, prensagem, fundição de fita, fundição de gel. Esses materiais apresentam limitações em termos de longos períodos de tempos de processamento e alto custo das técnicas convencionais. Ademais, geometrias altamente complexas e orifícios interconectados são impossíveis de produzir; somado a isto, a usinagem de componentes cerâmicos tende a ser extremamente difícil devido à sua elevada dureza e fragilidade, desta forma, não só as ferramentas de corte estão sujeitas a forte desgaste, mas também podem ser gerados defeitos como fissuras nas peças cerâmicas (Chen *et al.*, 2019). Assim, por apresentar alta dureza e alto ponto de fusão, o que torna os materiais cerâmicos difíceis de serem processados pelos métodos convencionais de fabricação, surge a necessidade de outra forma de confecção desse material, ou seja, a manufatura aditiva (Galante *et al.*, 2019), podendo ser utilizada em aplicações como mostrado na Fig. 10.

Então, há uma variedade de técnicas de manufatura aditiva que são usadas para criar peças cerâmicas, incluindo sinterização seletiva a laser (SLS), estereolitografia (SLA), fusão seletiva a laser (SLM) e modelagem por deposição fundida (FDM). No processo SLS, Fig. 11 (a), utiliza-se lasers de alta energia para fundir seletivamente as finas camadas de partículas cerâmicas, portanto há uma deposição de uma fina camada de pó espalhada sobre o leito e, em seguida, a fonte de laser move-se pelo leito fundindo seletivamente a primeira camada, e assim segue sucessivamente o processo até o modelo 3D do material estiver totalmente moldado. SLA, Fig. 11 (b), usa um sistema de cura ultravioleta, ou seja, usa feixe de luz concentrada de UV ocasionando cura da camada inferior até a camada superior. O processo SLM, Fig. 11 (c), é semelhante ao SLS a única diferença é que este funde completamente o pó cerâmico. E por último, o FDM, Fig. 11 (d), que utiliza uma técnica de extrusão para descarregar material em filamentos, os quais são feitos com uma mistura de cerâmica e aglutinante, quentes depositados camada por camada (Hwa *et al.*, 2017).

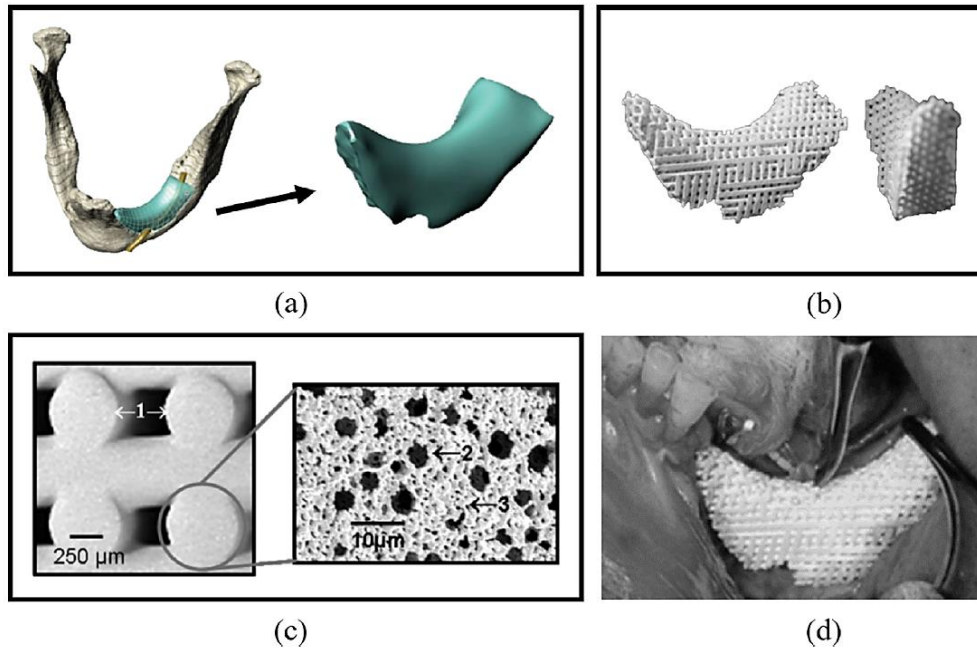


Figura 10. (a) Mandíbula e região impressa; (b) Rede de implante ósseo; (c) vários níveis de porosidades presentes na rede sinterizada e (d) Encaixe do implante ósseo na região do defeito (Chen *et al.*, 2019).

As biocerâmicas utilizadas na indústria médica que podem ser sintetizadas usando MA são divididas em 4 categorias (Galante *et al.*, 2019): sistemas baseados em vidro, principalmente sílica; sistemas baseados em vidro com cargas (leucite ou dissilicato de lítio); sistemas de base cristalina com cargas de vidro (alumina) e sólidos policristalinos (alumina e zircônia).

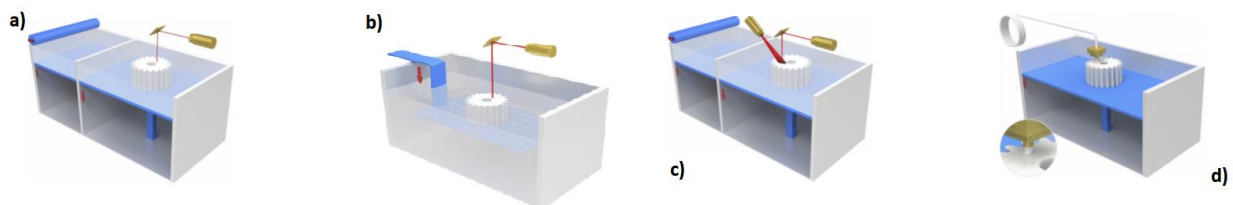


Figura 11. (a) Esquema do processo SLS; (b) Esquema do processo SLA; (c) Esquema do processo SLM e (d) Esquema do processo FDM defeito (Chen *et al.*, 2019).

Quanto aos processos, o SLA apresenta excelente acabamento superficial, porém possui um custo mais elevado, além da necessidade de um longo tempo de pós-processamento para a remoção de resina não processada e cura adicional. No processo SLS há altas taxas de aquecimento e resfriamento, o que pode levar ao choque térmico ocasionando rachaduras na estrutura cerâmica, além de formar superfícies ásperas. Por último, o processo SLM é adequado na confecção de peças cerâmicas, pois os pós são completamente fundidos, o que cria peças com propriedades mecânicas aprimoradas e densidades maiores (Galante *et al.*, 2019).

O processo DIW também possui grande variedade de aplicações utilizando cerâmicas, e foi desenvolvido inicialmente no complexo *Sandia National Laboratories* para a deposição de pastas cerâmicas com aglutinante naturais (Shahzad e Lazoglu, 2021). Ordoñez, *et al.* (2019) realizou um estudo de deposição com DIW utilizando uma pasta de alumina, variando os aditivos entre o silicato de sódio e poliácrito de sódio, com estudos para as concentrações de 0,2 e 0,8 wt%, frações de volume de 50, 53 e 56%, além de dois tamanhos para o bocal de deposição: 1,5 e 2,5 mm. Foram obtidas 12 amostras circulares e avaliadas quanto às propriedades reológicas e microestrutura das amostras. A amostra utilizando uma fração de volume de 53% e utilizando como aditivo o poliácrito de sódio na concentração de 0,8 %wt apresentou a maior densidade entre as amostras. Esta amostra, juntamente com a amostra com o silicato de sódio a 0,8 wt% e fração de volume de 50%, também apresentaram maior estabilidade dimensional, apresentando uma variação dimensional para a altura de 6,5% e 2,5% e diâmetro de 3,0% e 1,0% respectivamente.

Shahzad e Lazoglu, (2021) citam também que, além da alumina, outros materiais podem ser depositados pelo processo DIW, como a titânia e zircônia, usadas para aplicações biomédicas, como construção de ossos e tecidos artificiais. Carbonetos de silicone, utilizados para isolamento de eletrônicos, e Chamotte (CH), utilizados em tratamento de água, também podem ser depositados pelo processo.

5. COMPARATIVO ENTRE PROCESSOS

Os diferentes processos de deposição de material apresentam diferentes metodologias de acordo com o material de adição, a forma de deposição e o aporte térmico requerido ao processo. As tecnologias utilizadas também podem ser compatíveis com procedimentos de deposição e pós processamento, além de apresentarem diferentes faixas de preço. Já alguns processos, como a deposição aerogel por DCW, ainda estão em desenvolvimento e no momento ainda apresentam aplicações mais limitadas.

Quanto a qualidade superficial obtida nas peças, os processos baseados na deposição do pó apresentam a maior eficiência, com deposição precisa de material. Nesta categoria, o processo *Binder Jetting* é o que possui maior versatilidade, com variações do processo para metais, polímeros e cerâmicas.

Quanto a acessibilidade de materiais, os processos com alimentação de arame DED-WAAM e DED-WLAM são os que apresentam maior disponibilidade para os processos em metal, porém o mercado para os processos na deposição do pó apresenta grande crescimento e investimento em equipamentos, materiais e pesquisa (Jiménez, *et al.*, 2021). Os filamentos para os polímeros também possuem grande disponibilidade, com uma ampla gama de materiais poliméricos. Os processos baseados em cerâmicas também se expandiram nos últimos anos, possibilitando uma grande variedade de materiais, tanto em forma de pó quanto em pastas.

Quanto ao investimento financeiro, os processos baseados na deposição de arame e arco elétrico são os mais acessíveis dentre os processos para metais, devido a compatibilidade com diferentes equipamentos e grande variedade de materiais, podendo ser desenvolvido utilizando diversos tipos de fonte. Os processos baseados no pó ainda dependem de equipamentos específicos de alto custo, além do fornecimento de matéria prima ser mais seletiva e cara quando comparado ao arame/filamento. Na área das cerâmicas, especificamente, por se tratar de materiais baixa usinabilidade, a manufatura aditiva é a solução para fabricação de formatos diferentes, tornando a fabricação bem viável em comparação aos outros métodos.

6. CONCLUSÕES

Personalização em massa, capacidade de imprimir estruturas complexas com o mínimo de desperdício e liberdade de design são os benefícios da manufatura aditiva que têm atraído bastante a atenção das indústrias. Sendo assim, diferentes materiais metálicos, poliméricos e cerâmicos podem ser produzidos por diferentes processos que possuem especificidades. Considerando o universo de processos apresentados, pode-se concluir que:

- Os metais já apresentam aplicações bem estabelecidas em diversos segmentos e com uma grande variedade de tecnologias desenvolvidas. Os processos DED com alimentação por arame permitem maior taxa de deposição de material, capacidade de fabricação de peças de maior porte e equipamento mais acessível economicamente. Os processos PBF e MBJ já se mostram limitados quanto ao tamanho de fabricação das peças, porém permitem uma qualidade superficial superior.
- Resíduos poliméricos podem ser reciclados e transformados em filamentos de impressoras 3D. Além disso, na manufatura de polímeros o processo que mais se destaca pela viabilidade econômica é a fabricação de filamentos fundidos. Fibras contínuas inseridas ao longo da matriz polimérica e intertravamento mecânico nas interfaces aumentam as propriedades mecânicas.
- A manufatura de materiais cerâmicos traz grandes vantagens para a manipulação do material, dadas as dificuldades quanto a usinagem para essa classe de material. Dentre as tecnologias de deposição, o processo DIW apresenta boa compatibilidade de materiais, devido à presença de diferentes tipos de aglutinantes, e ao equipamento acessível, quando comparado aos demais processos.
- Em um comparativo entre os processos, é notório que a evolução da manufatura aditiva em peças metálicas foi maior ao longo dos anos quando comparado aos polímeros e cerâmicas. A maior disponibilidade de materiais e o investimento da tecnologia em diferentes projetos. As tecnologias para os polímeros apresentaram grandes avanços quanto a resistência mecânica das peças fabricadas e qualidade superficial. Já as cerâmicas apresentam grande potencial de aplicabilidade com a manufatura aditiva viabilizando o seu uso onde anteriormente o material era de difícil adaptação.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento da Engenharia Mecânica (ENM), Faculdade de Tecnologia (FT), Decanato de Ensino de Graduação (DEG), Programa de Iniciação Científica (ProIC), Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas (PCMEC) da UnB e CAPES pelo apoio e suporte laboratorial/financeiro para participação do congresso.

8. REFERÊNCIAS

AMPOWER *gmbh* & Co., 2021. “Metal additive suppliers predict a market growth of 29,2%”. Acessado em 13 Jan- 2022. Disponível em: <https://additive-manufacturing-report.com/metal-additive-manufacturing-market-2021/>.

- Chen, Zhangwei, Li, Ziyong, Li, Junjie, Liu, Chengbo, Lao, Changshi, Fu, Yuelong, Liu, Changyong, Li, Yang, Wang, Pei and He, Yi, 2019, "3D printing of ceramics: A review", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 39(4), pp. 661-687.
- Childerhouse, T and Jackson, M, 2019, "Near Net Shape Manufacture of Titanium Alloy Components from Powder and Wire: A Review of State-of-the-Art Process Routes". *Metals*, Vol. 9, pp. 689.
- Collado, A. G., Blanco, J.M., Gupta, M. K. and Vicente, R. D., 2022, "Advances in polymers based Multi-Material Additive-Manufacturing Techniques: State-of-art review on properties and applications", *Additive Manufacturing*, Vol. 50, pp. 102577.
- Digital Metal Tech, 2019a. "Digital Metal DM P2500". Acessado em 07 Jan.-2022. Disponível em: <https://48qrdkj4t6l418691q9oyl1b-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2019/09/Additive-manufacturing.pdf>
- Digital Metal Tech, 2019b. "Additive Manufacturing of small and complex metal parts". Acessado em 07 Jan- 2022. Disponível em: <https://48qrdkj4t6l418691q9oyl1b-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2019/09/Digital-metal-DM-P250.pdf>
- Frazier, W. E., 2014, "Metal Additive Manufacturing: A Review". *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 23, pp. 1917-1928.
- Galante, Raquel, Figueiredo-Pina, Celio G and Serro, Ana Paula, 2019, "Additive manufacturing of ceramics for dental applications: A review", *Dental materials*, Vol. 35(6), pp. 825-846.
- Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F. and Mehrpouya, M., 2019, "Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review". *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 53, pp. 124-129.
- Guddati, S., Kiran, A S., Leavy, M. and Ramakrishna, S., 2019, "Recent advancements in additive manufacturing technologies for porous material applications". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 105, pp. 193-215.
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. and Emmelmann, C., 2016, "Additive manufacturing of metals". *Acta Materialia*, Vol. 117, pp. 371-392.
- Huang, X., Bauder, T., Do, T., Suen, H., Boss, C., Kwon, P. and Yeom, J., 2019, "A Binder Jet Printed, Stainless Steel Preconcentrator as an In-Line Injector of Volatile Organic Compounds". *Sensors*, Vol. 19, pp. 2748.
- HUBS COMPANY, 2022. Introduction to Binder Jetting 3D printing. <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/>
- Hwa, Lim Chin, Rajoo, Sritha, Noor, Alias Mohd, Ahmad, Norhayati and Uday, M.B., 2017, "Recent advances in 3D printing of porous ceramics: A review", *Current opinion in solid state & materials science*, Vol. 21(6), pp. 323-347.
- ISO/ASTM 52900, 2015. "Additive manufacturing, General principles, Terminology". *International Standard*, pp. 1-19.
- Jiménez, A., Bidare, P., Hassanin, H., Tarlochan, F., Dimov, S. and Essa, K., 2021, "Powder-based laser hybrid additive manufacturing of metals: a review", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 114, pp. 63–96.
- Kam, D., Chasnitsky, M., Nowogrodski, C., Braslavsky, I., Abitbol, T., Magdassi, S. and Shoseyov, O., 2019, "Direct Cryo Writing of Aerogels via 3D Printing of Aligned Cellulose Nanocrystals Inspired by the Plant Cell Wall". *Colloids Interfaces*, Vol. 3, pp. 46.
- Kurzynowski, T., Pawlak, A. and Smolina, I., 2020, "The potential of SLM technology for processing magnesium alloys in aerospace industry". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 20, article 23.
- McAndrew, A., Rosales, M., Colegrove, P., Honnige, J., Ho, A., Fayolle, R., Eyitayo, K., Stan, L., Sukrongpang, P., Crochemore, A. and Pinter, Z., 2018, "Interpass Rolling of Ti-6Al-4V Wire + Arc Additively Manufactured Features for Microstructural Refinement", *Additive Manufacturing*, Vol. 21, pp. 340-349.
- Mohan, Denesh, Teong, Zee K., Bakir, A. N., Sajab, M. S. and Kaco, H., 2020, "Extending Cellulose-Based Polymers Application in Additive Manufacturing Technology: A Review of Recent Approaches", *Polymers*, Vol. 12, pp. 1876.
- MX3D, MX3d bridge, 2020. Disponível em <<https://mx3d.com/industries/infrastructure/mx3d-bridge/>>. Acesso em 23 de Março de 2022.
- Ordoñez, E., Gallego, J.M. and Colorado, H.A., 2019. "3D printing via the direct ink writing technique of ceramic pastes from typical formulations used in traditional ceramics industry", *Applid Clay Science*, Vol. 182, pp. 105285.
- Pandelidi, Chrysoula, Bateman, Stuart, Piegert, Sebastian, Hoehner, Rene, Kelbassa, Ingomar, e Brandt, Milan, 2021, "The technology of continuous fibre-reinforced polymers: a review on extrusion additive manufacturing methods", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 113, pp. 3057.
- Paterlini, A., Grill, S. Le, Brouillet, F., Combes, C., Grossin, D. and Bertrand G., 2021. "Robocasting of self-setting bioceramics: from paste formulation to 3D part characteristics", *Open Ceramics*, Vol. 5, pp. 100070.
- Rosli, N.A., Alkahari, M.R., bin Abdollah, M.F., Maidin, S., Ramli, F.R. and Herawan, S.G., 2021, "Review on effect of hat input for wire arc additive manufacturing process", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 11, pp. 2127-2145.
- Saabori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S. and Lombardi, M. F. P., 2019, "Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair", *Applied Sciences*. Vol. 9, pp. 3316.

- Sanchez, Fabio C. A., Boudaoud, Hakim, Camargo, Mauricio and Pearce, Joshua M., 2020, "Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy", *Journal of cleaner production*, Vol. 264, pp. 121602.
- Seabra, M., Azevedo, J., Araújo, A., Reis, L., Pinto, E., Alves, N., Santos, R. and Mortágua, J. P., 2016, "Selective laser melting and topology optimization for lighter aerospace componentes", *Procedia Structural Integrity*, Vol.1, p. 289.
- Shahzad, A. and Lazoglu, I, 2021, "Direct ink writing (DIW) of structural and functional ceramics: Recent achievements and future challenges", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 225, pp. 109249.
- Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A.L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J.M., Lavernia, E.J. and Eliaz, M., 2021, "Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications", *Materials Today*, Vol. 49, pp. 271-295.
- Tang, Z., Gong, J., Cao, P., Tao, L., Pei, X., Wang, T., Zhang, Y., Wang, Q. and Zhang, J., 2022, "3D printing of a versatile applicability shape memory polymer with high strength and high transition temperature", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 431, Parte 2, pp. 134211.
- Vafadar, A, Guzzomi, F., Rassau, A. and Hayward, K., 2021, "Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges", *Applied Sciences*, Vol. 11, 1213.
- Volpato, N., 2017, "Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D". Blucher, São Paulo, Brazil, 400 p.
- Wiberg, A., 2019, "Towards Design Automation for Additive Manufacturing: A Multidisciplinary Optimization approach", *Studies in Science and Technology*. doi: 10.3384/lic.diva-160888.
- Wong, Kaufui V. and Hernandez, Aldo, 2012, "A Review of Additive Manufacturing", *ISRN Mechanical Engineering*, Vol. 2012, pp. 1-10.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

A THEORICAL STUDY ON THE DIFFERENCES BETWEEN ADDITIVE MANUFACTURING OF METALS, POLYMERS AND CERAMICS

André Luis Silva da Costa, andr.luis27@hotmail.com

André Luiz Brito Novelino, andre_novelino@hotmail.com

Maksym Ziberov, mziberov@unb.br

University of Brasilia, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Zip code 70910-900, Brasília-DF, Brazil

Abstract. Additive manufacturing has become a process with great potential, thanks to the technological advances obtained over the last few decades. Due to different demands that have arisen in the market, new manufacturing processes/technologies have been created to work with different types of materials and enable the realization of parts with different geometries and sizes associated with high precision. Due to the great need to evolve and adapt to the demand and quality standard of the industry, and also taking into account environmental issues such as material savings, additive manufacturing began to be more present in different sectors of the industry, such as the automotive and aerospace, as well as in research and applications in biomedicine, making it a segment of great economic growth. However, to fit into each sector, there must be an adequate selection of the deposition method, so that it is possible to obtain cost and surface finish, compatible with the application and the material used. Thus, the correct selection of the deposition process for the additive production of metallic, ceramic, and polymeric materials is essential. In this sense, this work aims to evaluate the different processes used for the additive manufacturing of metals, polymers, and ceramics, examining their operation and showing a comparison between the technologies, elucidating the advantages and limitations of each process, and presenting some examples of applications already established in the market. For technologies based on metal deposition, processes based on powder bed fusion, processes based on Directed Energy Deposition with powder or wire deposition, and processes based on blasting are presented. of material, called Metal Binder Jetting. For the polymer deposition processes, the manufacturing processes using melted filaments, powder sintering and Directed Cryo Writing are presented. As for the ceramic deposition processes, directed energy deposition processes are also presented in addition to the Direct Ink Writing process. It is concluded that the additive manufacturing of metals present greater evolution in terms of manufacturing quality, with methods allowing precision of up to 6 μm . As for polymers, a wide variety of materials can be used in the process with more affordable equipment, in addition to allowing filaments from recycled materials. For ceramics, additive manufacturing expands the possibilities of geometries for manufacturing and reduces costs, since the machining of this type of material is restricted to high-cost tools. A highlight among the analyzed processes goes to the Binder Jetting (BJ) process, whose concept allows application to the three classes of materials.

Keywords: Additive Manufacturing, Power Bed Fusion, Directed Energy Deposition, Metal Binder Jetting, Directed Cryo Writing.