

UMA CONTRIBUIÇÃO SOBRE OS MÉTODOS DE MANUFATURA ADITIVA DE METAIS E O DESAFIO DA QUALIDADE SUPERFICIAL EM SUAS APLICAÇÕES

Gabriel de Paiva Silva^a

Thalia de Souza Menna Barreto

Déborah de Oliveira

Maksym Ziberov

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil, CEP: 70.910-900

dpaivagabriel@gmail.com

thaliambbs@gmail.com

oliveira.deborah@unb.br

mziberov@unb.br

Resumo: Os processos de manufatura aditiva são utilizados para a fabricação de peças tridimensionais a partir de modelos provindos de desenho assistido por computador. Através da união de materiais camada por camada, é possível construir peças com complexidade geométrica e combinações de materiais que não poderiam ser obtidas por outros processos de fabricação. Graças ao controle da quantidade de material depositado, este processo promove redução do desperdício e pode ser utilizado em uma ampla variedade de materiais, tais como polímeros ou ligas metálicas. Além disso, essa tecnologia possui grande potencial de diminuir os impactos ambientais na indústria de manufatura. Com o grande investimento em pesquisas na área de manufatura aditiva, essa tecnologia vem alcançando progresso em diversos setores da indústria, como o automotivo, de energia, aeroespacial, biomédico, entre outros. Uma das principais técnicas usadas para ligas metálicas e com expectativa de ser empregada comercialmente em dias atuais é a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). Essa técnica se destaca por sua alta velocidade de deposição quando comparada aos processos que fazem o uso de laser ou feixe de elétrons. Porém, embora a manufatura aditiva de metais possua muitas vantagens sobre as técnicas de fabricação tradicionais, sua aplicação em escala industrial ainda está em fase de desenvolvimento, pois há muitos aspectos que precisam ser aprimorados. Peças metálicas obtidas por manufatura aditiva são submetidas a processos térmicos complexos, que envolvem rápida fusão e resfriamento de material de base, o que acaba por alterar a microestrutura e, consequentemente, as propriedades mecânicas do produto final, como dureza, ductilidade, resistência à fadiga, entre outras. Além disso, a manufatura aditiva ainda não é capaz de fornecer precisões dimensionais elevadas, de modo que as peças assim produzidas tendem a ter baixa qualidade superficial e geométrica. Por isso, existe a necessidade de se aplicar técnicas de pós-processamento nessas peças, o que se dá, principalmente, por meio da usinagem de acabamento. Tendo isso em vista, neste trabalho, propõe-se uma revisão bibliográfica sobre os processos de manufatura aditiva em metais e suas aplicações, bem como as tendências futuras de melhoramento da qualidade superficial nas peças obtidas por essa tecnologia.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Manufatura Híbrida; Usinagem; Qualidade Superficial.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva é um processo de fabricação no qual o material é depositado camada por camada, geralmente tomando como base um modelo tridimensional feito por CAD (*Computer Aided Design*). O desenvolvimento dessa tecnologia se originou na década de 1980 e, desde então, tem fornecido diversos avanços na indústria manufatureira, tais como a redução do tempo e custo de produção, a fabricação de peças com geometrias complexas e a redução do desperdício de material. Além disso, a manufatura aditiva desempenha um importante papel no atual contexto da mais recente revolução industrial, a indústria 4.0, que tem trazido a integração entre sistemas de manufatura inteligentes e tecnologias da informação (Mehrpoury et al., 2019).

Atualmente, há diversas técnicas de manufatura aditiva em metais. O processo pode ser feito por meio de laser, com certa tendência ao uso de sistemas multilaser, ou também por meio de jato ligante, que reduz o custo de impressão de metal por meio de taxas de construção mais rápidas. Entretanto, uma das técnicas mais utilizadas é a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). Este é um método de impressão 3D de metal que permite que grandes componentes sejam construídos com razoável precisão geométrica, com baixos custos e tempos de construção, tendo sido empregado para fabricar a primeira ponte metálica impressa em 3D do mundo (Herbert et al., 2020).

Para a produção de lotes de pequenas peças complexas de forma econômica e rápida, os métodos de fabricação tradicionais, como a usinagem e a conformação mecânica, apresentam limitações. Os processos de conformação precisam de ferramentas com custo considerável e não podem proporcionar uma velocidade de produção significativa quando

comparada à manufatura aditiva. Porém, a manufatura aditiva e a manufatura subtrativa, como a remoção de cavaco, são frequentemente utilizadas lado a lado em diferentes estágios de desenvolvimento do produto durante a fabricação. Máquinas híbridas que combinam manufatura aditiva e manufatura subtrativa são desenvolvidas para compensar desvantagens como precisão inadequada e rugosidade de superfície. Assim, essas duas técnicas de fabricação se complementam na produção de ferramentas, acessórios, suportes e moldes. Os processos híbridos permitem que os designers e fabricantes de produtos combinem a versatilidade da rapidez da manufatura aditiva com a resistência das peças produzidas subtrativamente (Merklein et al., 2016).

De modo geral, a manufatura aditiva estabelece a adição de sucessivas camadas de material até atingir a forma desejada, sendo uma importante tecnologia que tem revolucionado a maneira de produzir peças (Inácio et al., 2020). Dessa forma, esta é uma tecnologia emergente que possui tanto potencial para diminuir os impactos ambientais na indústria de manufatura como para alavancar significativamente alguns setores de importância, como o biomédico, aeroespacial, automotivo e no de design de ferramentas em geral (Böckin & Tillman, 2019). Os benefícios potenciais dessa tecnologia incluem a redução do número de etapas de processos na fabricação, a economia de material, de estoque de peças e ainda a possibilidade de combinação de geometrias ou materiais (Al-Makky & Mahmoud, 2016).

A manufatura subtrativa, também conhecida como usinagem, proporciona a fabricação de peças com elevados níveis de precisão, com estreitas tolerâncias dimensionais e geométricas. Já a manufatura aditiva, por sua vez, concede o desenvolvimento de peças com uma complexidade quase inalcançável por outras técnicas, ainda com a vantagem de reduzir o desperdício de matéria-prima. Nesse sentido, ao se combinar as técnicas de manufatura aditiva com manufatura subtrativa, é possível aumentar os diferenciais competitivos de uma indústria. Apesar da manufatura aditiva possuir alta velocidade de fabricação, uma de suas principais desvantagens é a baixa precisão dimensional, de modo que a maioria das peças produzidas por essa técnica necessitam passar por algum processo de usinagem de acabamento, a fim de melhorar a qualidade superficial.

Dessa forma, enquanto a manufatura aditiva possibilita o desenvolvimento de geometrias complexas, porém com limitações nas tolerâncias e acabamento superficial, a usinagem proporciona a fabricação de componentes de precisão, mas com nível de complexidade limitado (Newman et al., 2015). Portanto, combinando os métodos de manufatura aditiva e subtrativa em sistemas de manufatura híbridos, a indústria tende a se favorecer das possibilidades disponibilizadas por ambas as técnicas.

2. MANUFATURA ADITIVA DE METAIS

A primeira máquina de manufatura aditiva surgiu no Texas, EUA, no fim do século XX, e consistia em um equipamento que, através de um laser, fundia seletivamente camadas de polímeros, processo que posteriormente foi adaptado a metais (Deckard, 1990). Atualmente, a manufatura aditiva é utilizada em diversas etapas da indústria de fabricação de aeronaves, tendo participado desde o projeto inicial até os testes, fases de ferramental e, finalmente, até a produção real de um componente aeroespacial (Chua et al., 2017). Essas técnicas também têm sido usadas para reparar componentes de motores de aeronaves, para diminuir gastos financeiros e aumentar a vida útil de peças como compressores e turbinas (Guo & Leu, 2013). Na indústria automotiva, processos da manufatura aditiva estão sendo usados para fazer pequenas quantidades de peças estruturais e funcionais, como por exemplo escapamentos de motor, eixos de transmissão, componentes da caixa de engrenagens e sistemas de interrupção para veículos luxuosos e/ou de baixo volume, possibilitando produzir peças mais leves, de geometrias mais complexas e otimizadas topologicamente. A figura 1 apresenta um exemplo de peça fabricada por manufatura aditiva usada na indústria aeroespacial.



Figura 1: Exemplo de peça fabricada por manufatura aditiva: caixa de suporte do compressor de gás de turbina, produzida pela Arcam EBM (*About GE Additive | GE Additive, n.d.*).

Já na indústria biomédica, a manufatura aditiva tem sido usada para fabricação de produtos que podem atuar como implantes ortopédicos, bases estruturais para de tecidos, órgãos artificiais, dispositivos médicos, redes microvasculares e chips biológicos (Guo & Leu, 2013). Essa tecnologia já foi usada para a construção de partes de um exoesqueleto robótico, que possui a finalidade de ajudar o ser humano a efetuar determinados movimentos, como é apresentado na Figura 2.

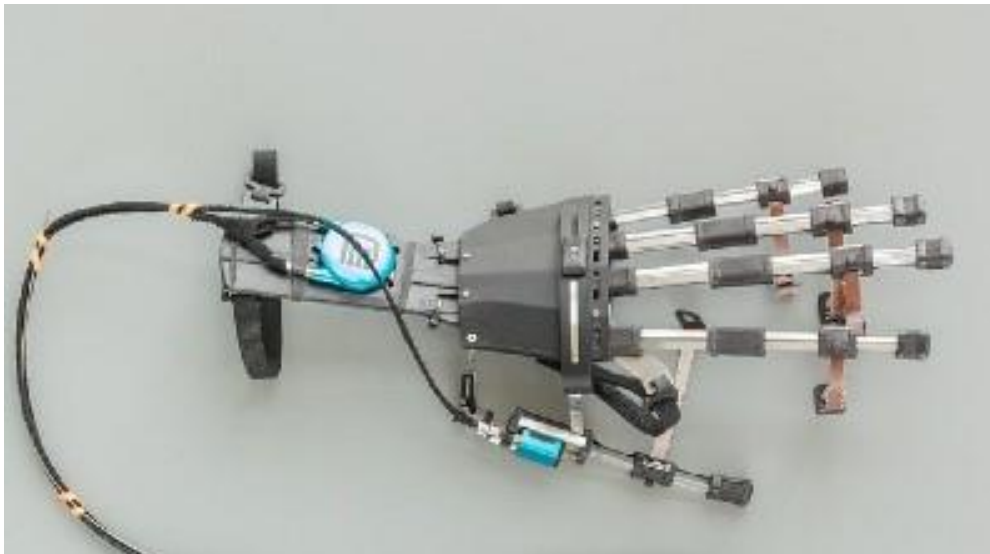


Figura 2: Exoesqueleto desenvolvido por Manufatura Aditiva (*Exoskeletal Assisted Rehabilitation Uses 3D Printing - 3Dnatives, n.d.*).

As tecnologias para manufatura aditiva de metal podem ser classificadas quanto ao tipo de matéria-prima e à fonte de energia utilizados. Algumas das principais técnicas usadas atualmente serão aqui apresentadas.

2.1. Fusão Seletiva do leito de pó (PBF – *Powder Bed Fusion*)

Esse método, esquematizado na figura 3, é altamente utilizado em diversos setores, como na indústria aeroespacial, de energia e de transporte, por exemplo. De acordo com a ASTM F42 de 2019, os três principais métodos que utilizam a técnica PBF como princípio de impressão 3D em metal são: Fusão Seletiva por Laser (SLM - *Selective Laser Melting*), Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS - *Direct Metal Laser Sintering*) e Fusão por Feixe de Elétrons (EBM - *Electron Beam Melting*) (*Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, n.d.*). No método PBF, é possível utilizar um feixe de elétrons ou fonte de laser para fundir o pó metálico. Os métodos de fusão por feixe de elétrons

necessitam de uma câmara de vácuo, mas o diferencial é que podem ser utilizados com metais e ligas na formação das peças. Quando se utiliza o laser, a sinterização ocorre camada por camada visando sinterizar o pó.

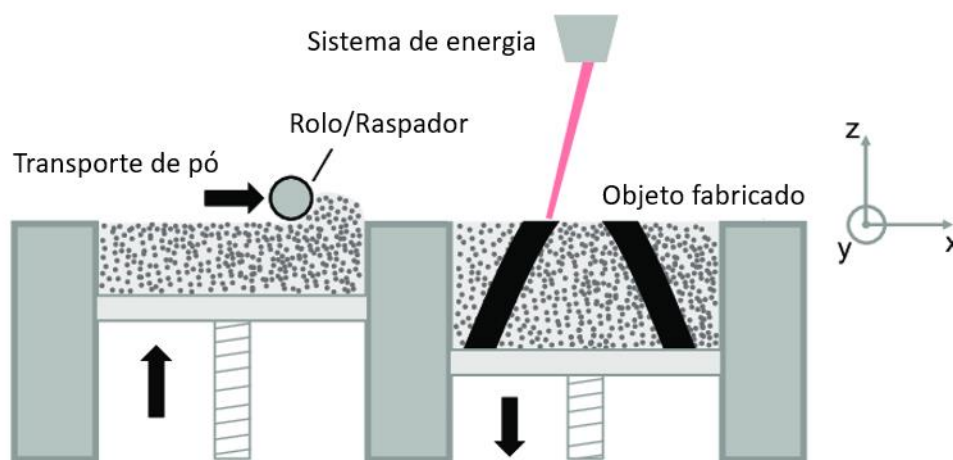


Figura 3: Esquema do processo de *Powder Bed Fusion* (Wiberg, 2019).

2.2. Fusão seletiva por laser (SLM – *Selective Laser Melting*)

A fusão seletiva por laser possibilita a fabricação de geometrias com estruturas complexas que dificilmente poderiam ser obtidas por métodos de fabricação convencionais, como fundição, metalurgia do pó, forjamento ou extrusão. Esse processo é utilizado para fundir pós metálicos por meio de um laser de alta densidade. A fundição de pó metálico possui o objetivo de alcançar propriedades mecânicas próximas às de matérias-primas utilizadas na fabricação tradicional. Uma das desvantagens da fusão seletiva por laser é a existência de diversas formas de absorção do feixe de laser para cada tipo de metal, ocasionando tensões residuais e elevando a tensão térmica, o que possibilita o aparecimento de trincas (Yakout et al., 2018).

2.3. Sinterização direta de metal por laser (DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*)

Nessa técnica, utiliza-se um laser que é aplicado diretamente sobre o pó metálico, o qual é sinterizado até que se torne parcialmente líquido. Após concluída a sinterização da camada, uma nova camada de pó é adicionada e o procedimento é repetido até a obtenção da geometria desejada. A técnica DMLS tem como característica a capacidade de produzir objetos livres de tensões residuais e defeitos internos que podem afetar os componentes de metal. Outro aspecto é a possibilidade dessa técnica ser utilizada com ligas metálicas ou metais puros sem afetar as propriedades do material. Dessa forma, este processo permite o uso de vários tipos de materiais, apesar de possuir poucas aplicações e alto custo (Castells, 2016).

2.4. Fusão por feixe de elétrons (EBM – *Electric Beam Melting*)

O processo EBM permite construir estruturas de baixo para cima através do feixe de elétrons, sendo possível fundir seletivamente áreas específicas de pó metálico. Da mesma forma que os outros processos, essa técnica acontece de camada a camada, até que a peça seja construída. O método é posto em prática em uma câmara de vácuo, objetivando eliminar as impurezas e gerar propriedades de alta resistência da peça acabada. A câmara de vácuo serve para evitar a dispersão do feixe, o que é melhor para o desenvolvimento do processo. O sistema de fusão por feixe de elétrons permite a fabricação de peças com elevada resistência mecânica graças a uma distribuição uniforme da temperatura durante a fusão (Chua et al., 2017).

2.5. Deposição direta de energia (DED – *Direct Energy Deposition*)

O processo de deposição direta de energia é uma técnica de impressão mais complexa, normalmente utilizada para reparar ou adicionar material a componentes existentes (Gibson et al., 2020). Uma máquina DED comum compõe-se de um bocal montado em um braço de múltiplos eixos, que deposita o material fundido sobre a superfície especificada, onde se solidifica. Este processo consiste na aplicação de energia térmica concentrada para fundir o material sólido enquanto é depositado, como mostra a Figura 4. Assim, o processo DED parte do uso de uma fonte de calor, como laser, feixe de elétrons ou um arco elétrico de gás-tungstênio para formar uma poça de fusão.

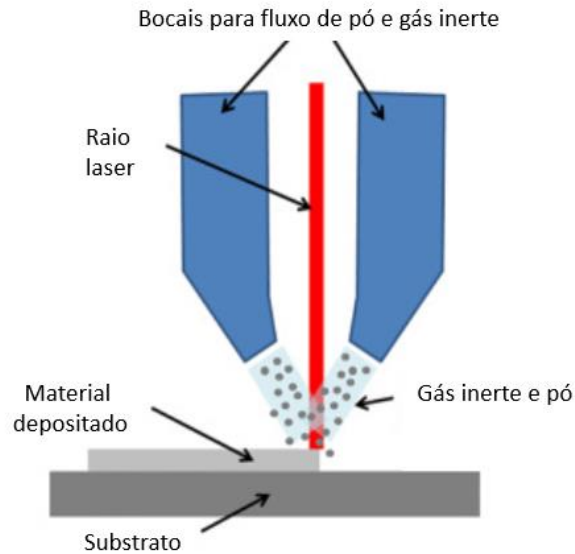


Figura 4: Esquema do processo de *Direct Energy Deposition*. Narayan, 2020.

Os sistemas DED podem ser categorizados quanto aos tipos de matérias-primas e as fontes de energia. As matérias-primas mais utilizadas são pó e arame e as principais fontes de energia costumam ser laser, feixe de elétrons e arco de plasma (Dass & Moridi, 2019). O uso de um feixe de elétrons focado em alta energia no vácuo pode fundir praticamente qualquer metal. Já o plasma, como fonte de energia, é liberado a partir de uma fonte controlada para fundir localmente as partículas de metal. O DED baseado em arco elétrico funde o arame alimentado para depositar as camadas. E por último, a deposição por energia cinética, comumente referida como pulverização a frio, é um método de deposição de revestimento em que as partículas de pó fino são aceleradas em um fluxo de gás de alta velocidade. Durante o impacto com o substrato, as partículas em velocidades supersônicas se deformam e se unem, criando uma camada na superfície (Moridi et al., 2014).

2.6. Deposição a arco

A manufatura aditiva por deposição a arco possui como fonte de energia um arco elétrico e sua matéria-prima possui o formato de arame (Vimal et al., 2021). A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é destinada, principalmente, para a produção econômica de grandes peças, uma vez que possui altas taxas de deposição em comparação com outras tecnologias de impressão 3D de metais (DebRoy et al., 2018). As taxas de deposição dos processos a laser e feixe de elétrons estão entre 2 e 10 g/min, já em processos a arco, é possível encontrar números maiores que 130 g/min (Suryakumar et al., 2011).

A fabricação de peças metálicas utilizando o método MADA a partir dos processos de soldagem MIG/MAG (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*) e TIG (GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*) tem sido uma expectativa comercial atualmente. Ambos possuem o arco elétrico como fonte de calor e proteção gasosa. O processo GMAW é a técnica de soldagem mais comum nas indústrias, uma vez que possui grande versatilidade, altas taxas de deposição, menor investimento financeiro, fácil execução e automação (Wang et al., 2016). Essa técnica de soldagem fundamenta-se na fonte de calor de um arco elétrico com alta energia que se situa em meio a uma peça que será soldada e o arame (eletrodo), que é ininterruptamente adicionado ao sistema e consumido ao decorrer do processo. A proteção da solda é feita a partir dos gases, que podem ser inertes ou ativos, ou por misturas de proteção. Os processos MIG e MAG possuem a capacidade de recorrer a misturas de gases para resguardar a solda (Scotti & Ponomarev, 2014). A Figura 5 é uma representação típica do processo de deposição de material para a formação de uma peça utilizando deposição a arco elétrico.

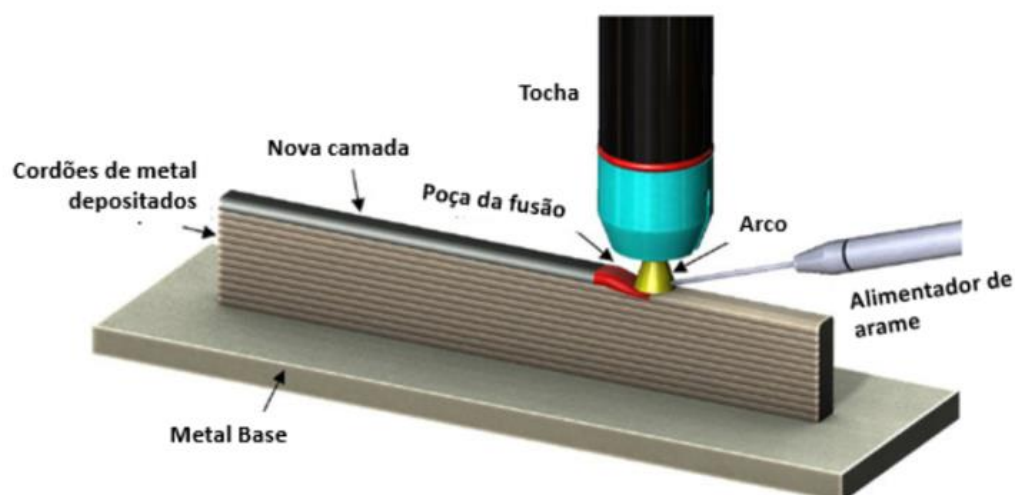


Figura 5: Esquema do processo de manufatura aditiva por deposição a arco elétrico (McAndrew et al., 2018)

Na manufatura aditiva de metais, devido ao processo de deposição camada por camada, o material é submetido a processos térmicos complexos, os quais diferem dos processos térmicos comuns da fundição, soldagem ou materiais convencionalmente tratados termicamente. Em particular, a rápida solidificação e complexos processos térmicos impactam as microestruturas, tamanhos de grãos e fases presentes dos materiais depositados, que por sua vez definem as propriedades mecânicas dos componentes, tais como dureza, resistência ao escoamento, resistência à tração final, ductilidade e propriedades de fadiga. Esses processos térmicos provocam uma microestrutura tipicamente anisotrópica e heterogênea (Lewandowski & Seifi, 2016). Assim, componentes fabricados por manufatura aditiva também costumam apresentar a ductilidade reduzida devido a uma combinação de fatores, incluindo porosidade, defeitos de construção, contaminação e tensões residuais (Sola & Nouri, 2019).

A manufatura aditiva está em seu estágio inicial de desenvolvimento, de modo que as relações entre microestruturas e propriedades mecânicas das peças assim fabricadas ainda não foram totalmente compreendidas. Dessa forma, sem parâmetros otimizados, os defeitos podem existir com frequência, potencializando tendências a falhas em peças produzidas pelo método. O surgimento de defeitos em peças desenvolvidas por manufatura aditiva é uma das mais relevantes inquietações para sistemas críticos e aplicação de cargas cíclicas (Kim & Moylan, 2018). Por isso, faz-se necessário o conhecimento sobre os mecanismos de formação de defeitos em processos baseados em fusão para estabelecer os parâmetros específicos de processo adequados para o sistema de liga e técnica de processamento escolhido (Mukherjee et al., 2016). Os defeitos resultantes nas peças geralmente podem ser porosidades ou fissuras, podendo causar a apreensão de impurezas no interior dos componentes e a deterioração de suas propriedades mecânicas (DebRoy et al., 2018).

A porosidade é um defeito habitual em peças obtidas por manufatura aditiva, pois grande parte dos mecanismos de ligação são estimulados através de alterações de temperatura, gravidade e forças capilares sem aplicação de pressão externa. A porosidade é um fenômeno comum em processos PBF e DED. Os poros se formam quando um material sofre fusão e solidificação rápidas durante os processos, o que retém gases na poça de fusão e evita sua liberação oportuna (Chen et al., 2021). A Figura 6 mostra alguns poros característicos decorrentes desse fenômeno.

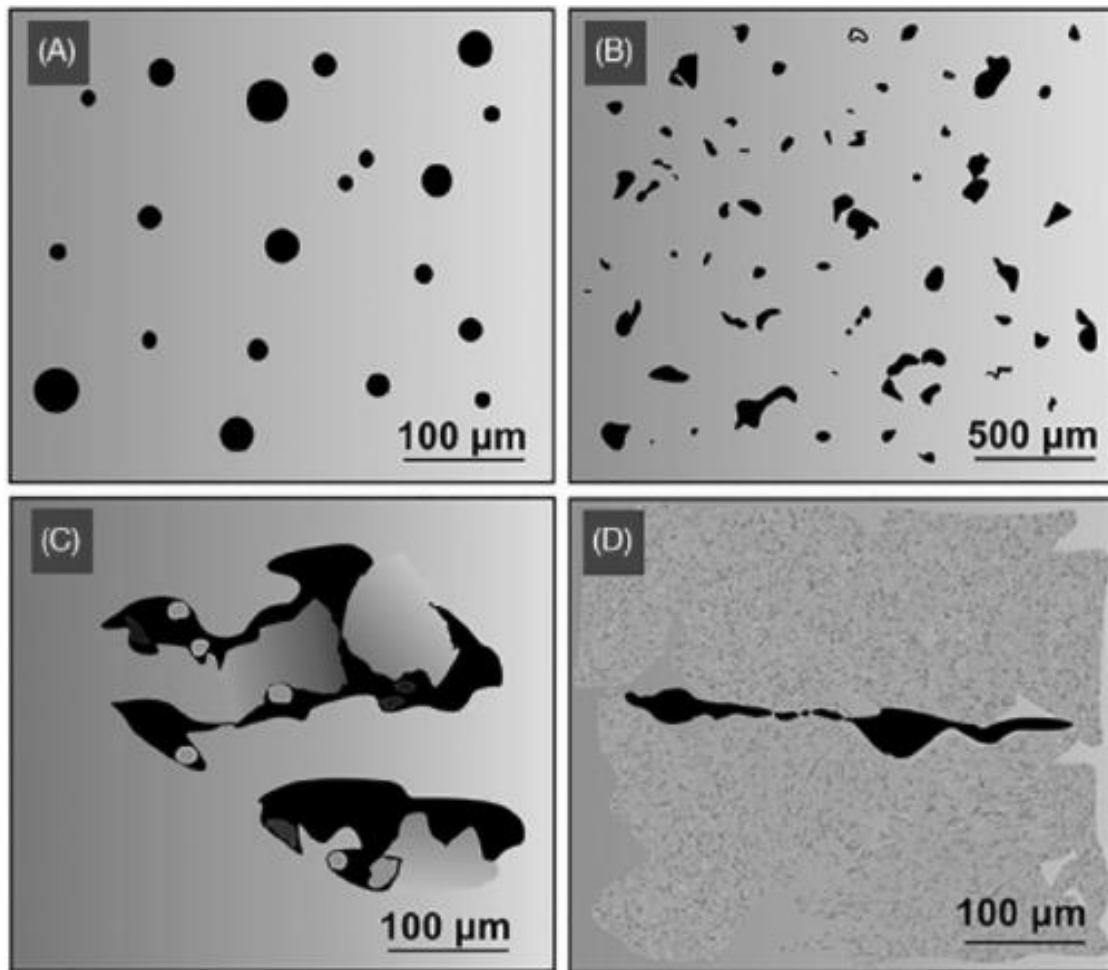


Figura 6: Poros característicos em peças de fusão de leito de pó à base de laser: (A) Porosidade por gás preso; (B) Porosidade induzida por derretimento incompleto; (C) Fusão insuficiente com partículas não derretidas dentro de poros irregulares; (D) Trincas; em Fusão Seletiva de Material em Pó (Sola & Nouri, 2019).

Embora a manufatura aditiva possibilite a fabricação de peças com geometrias complexas, uma elevada qualidade superficial, com estreitas tolerâncias dimensionais, frequentemente não pode ser obtida somente pela adição de material. A usinagem, por outro lado, permite a produção de componentes de precisão, porém com nível de complexidade geométrica limitada (Cunningham et al., 2018). Nesse contexto, evidencia-se a necessidade da união de técnicas de fabricação aditivas e subtrativas, visando melhorar as geometrias e a qualidade da superfície das peças (Guessasma et al., 2015). A necessidade de combinar diferentes tecnologias de fabricação provocou o surgimento da chamada manufatura híbrida. Esse tipo de manufatura oferece novas possibilidades para usar materiais ou formas que não poderiam ser fabricadas antes, com um menor investimento financeiro (Lauwers et al., 2014). A Figura 7 mostra algumas peças inacabadas que foram fabricadas pelo processo de manufatura aditiva, porém ainda precisam passar por técnicas de usinagem.



Figura 7: Peças metálicas obtidas por manufatura aditiva a arco elétrico: a) hélice fabricada pela Huntingdon Fusion; b) peça fabricada pela Fitnik.

3. CONCLUSÕES

Por meio deste trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica sobre os métodos de manufatura aditiva em metais e os principais desafios relacionados às suas aplicações. A partir da pesquisa realizada, é possível concluir que:

- Atualmente, há diversas técnicas de manufatura aditiva que consistem no aquecimento localizado do metal, cuja fonte de energia pode ser um laser, um feixe de elétrons ou um arco elétrico. Entretanto, o processo feito através do arco elétrico se destaca por sua alta taxa de deposição e pela possibilidade de fabricação de peças de grande dimensão.
- Os distintos processos de manufatura aditiva fornecem diferentes níveis de acabamento superficial dependendo da natureza do método, de modo que é necessário avaliar os requisitos desejados ao produto final para a seleção adequada do processo a ser utilizado.
- As propriedades mecânicas dos materiais impressos podem ser diferentes daquelas de materiais fabricados por outros processos, devido às altas taxas de aquecimento e resfriamento envolvidas nos processos de manufatura aditiva.
- Em peças impressas, é comum a ocorrência de defeitos relacionados à alta porosidade, devido à presença de gases na poça de fusão, que pode ocorrer principalmente devido à má escolha dos parâmetros de deposição ou contaminação do material de adição.
- Embora a manufatura aditiva possibilite a fabricação de peças de geometria complexa, esse processo pode não ser suficiente para fornecer estreitas tolerâncias dimensionais e geométricas, de modo que a qualidade superficial de peças impressas tende a ser baixa. Dessa forma, muitas vezes, é necessário que peças impressas passem por processos de usinagem de acabamento.
- Muitos aspectos das peças obtidas por manufatura aditiva ainda não são completamente compreendidos. Por isso, é necessário que sejam feitas novas pesquisas a respeito de seu comportamento mecânico e como melhor controlá-lo a partir dos parâmetros de deposição.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes, CNPQ e à Universidade de Brasília.

5. REFERÊNCIAS

- About GE Additive | GE Additive. (n.d.). Retrieved October 25, 2022, from <https://www.ge.com/additive/who-we-are>
- Al-Makky, M., & Mahmoud, D. (2016). THE IMPORTANCE OF ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES IN INDUSTRIAL APPLICATIONS. *The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering*, 17(17), 1–14. <https://doi.org/10.21608/AMME.2016.35288>
- Böckin, D., & Tillman, A. M. (2019). Environmental assessment of additive manufacturing in the automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, 226, 977–987. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.04.086>
- Chen, Y., Peng, X., Kong, L., Dong, G., Remani, A., & Leach, R. (2021). Defect inspection technologies for additive manufacturing. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 3(2). <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ABE0D0>
- Chua, C. K., Wong, C. H., & Yeong, W. Y. (2017). Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing. *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing*, 1–250.
- Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2018). Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 22, 672–686. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2018.06.020>
- Dass, A., & Moridi, A. (2019). State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. *Coatings*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/COATINGS9070418>
- DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2017.10.001>
- Deckard, C. R. (1990). *Method for selective laser sintering with layerwise cross-scanning*. 142(545), 104.
- DMLS vs SLM 3D Printing Additive Manufacturing of Metals | Element. (n.d.). Retrieved October 26, 2022, from <https://www.element.com/nucleus/2016/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>
- Exoskeletal Assisted Rehabilitation uses 3D Printing - 3Dnatives. (n.d.). Retrieved October 25, 2022, from <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-finger-joints-igus-110120204/>

- Gibson, B. T., Bandari, Y. K., Richardson, B. S., Henry, W. C., Vetland, E. J., Sundermann, T. W., & Love, L. J. (2020). Melt pool size control through multiple closed-loop modalities in laser-wire directed energy deposition of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 32, 100993. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.100993>
- Guessasma, S., Zhang, W., Zhu, J., Belhabib, S., & Nouri, H. (2015). Challenges of additive manufacturing technologies from an optimisation perspective. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 6, A9. <https://doi.org/10.1051/SMDO/2016001>
- Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215–243. <https://doi.org/10.1007/S11465-013-0248-8>
- Herbert, G., Buchanan, C., Gardner, L., & Kyvelou, P. (2020). Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge. *Article in Journal of Constructional Steel Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106233>
- Inácio, D., Drozda, F. O., Silva, W. de A., Marques, M. A. M., & Seleme, R. (2020). A importância da manufatura aditiva como tecnologia digital para a indústria 4.0: uma revisão sistemática. *Revista Competitividade e Sustentabilidade*, 7(3), 653–667. <https://doi.org/10.48075/COMSUS.V7I3.23861>
- Kim, F. H., & Moylan, S. P. (2018). *Literature Review of Metal Additive Manufacturing Defects*. <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-16>
- Lauwers, B., Klocke, F., Klink, A., Tekkaya, A. E., Neugebauer, R., & McIntosh, D. (2014). Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 63(2), 561–583. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2014.05.003>
- Lewandowski, J. J., & Seifi, M. (2016). Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties. *Annual Review of Materials Research*, 46, 151–186. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-MATSCI-070115-032024>
- McAndrew, A. R., Alvarez Rosales, M., Colegrove, P. A., Hönnige, J. R., Ho, A., Fayolle, R., Eyitayo, K., Stan, I., Sukrongpang, P., Crochemore, A., & Pinter, Z. (2018). Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing*, 21, 340–349. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2018.03.006>
- Mehrpouya, M., Dehghanghadikolaei, A., Fotovvati, B., Vosooghnia, A., Emamian, S. S., & Gisario, A. (2019). The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: A review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(18). <https://doi.org/10.3390/APP9183865>
- Merklein, M., Junker, D., Schaub, A., & Neubauer, F. (2016). Hybrid Additive Manufacturing Technologies – An Analysis Regarding Potentials and Applications. *Physics Procedia*, 83, 549–559. <https://doi.org/10.1016/J.PHPRO.2016.08.057>
- Moridi, A., Hassani-Gangaraj, S. M., Guagliano, M., & Dao, M. (2014). Cold spray coating: Review of material systems and future perspectives. *Surface Engineering*, 30(6), 369–395. <https://doi.org/10.1179/1743294414Y.0000000270>
- Mukherjee, T., Zuback, J. S., De, A., & DebRoy, T. (2016). Printability of alloys for additive manufacturing. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/SREP19717>
- Newman, S. T., Zhu, Z., Dhokia, V., & Shokrani, A. (2015). Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64, 467–470. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.109>
- Scotti, A., & Ponomarev, V. (2014). *SOLDAGEM MIG/MAG MELHOR ENTENDIMENTO MELHOR DESEMPENHO*. www.artliber.com.br
- Sola, A., & Nouri, A. (2019). Microstructural porosity in additive manufacturing: The formation and detection of pores in metal parts fabricated by powder bed fusion. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, 1(3), e10021. <https://doi.org/10.1002/AMP2.10021>
- Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,. (n.d.). Retrieved October 25, 2022, from <https://www.astm.org/f2792-12.html>
- Suryakumar, S., Karunakaran, K. P., Bernard, A., Chandrasekhar, U., Raghavender, N., & Sharma, D. (2011). Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing. *Computer-Aided Design*, 43(4), 331–344. <https://doi.org/10.1016/J.CAD.2011.01.006>
- Vimal, K. E. K., Naveen Srinivas, M., & Rajak, S. (2021). Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review. *Materials Today: Proceedings*, 41, 1139–1145. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.09.153>
- WAAM (Wire-Arc Additive Manufacturing) | LLC Fitnik technologies. (n.d.). Retrieved October 26, 2022, from <http://fitnik.tech/en/technologies/waam>
- Wang, L., Wu, C. S., & Gao, J. Q. (2016). Suppression of humping bead in high speed GMAW with external magnetic field. *Science and Technology of Welding and Joining*, 21(2), 131–139. <https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000074>
- Wiberg, A. (2019). *Towards Design Automation for Additive Manufacturing: A Multidisciplinary Optimization approach*. 1854. <https://doi.org/10.3384/LIC.DIVA-160888>
- WP-309 3-D Printing for the Marine Industry. (n.d.). Retrieved October 26, 2022, from <https://www.huntingdonfusion.com/index.php/it/technical-support/white-papers-40017/3156-3-d-printing-for-the-marine-industry>
- Yakout, M., Elbestawi, M. A., & Veldhuis, S. C. (2018). A review of metal additive manufacturing technologies. *Solid State Phenomena*, 278 SSP, 1–14. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/SSP.278.1>

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

A CONTRIBUTION ABOUT THE METHODS OF ADDITIVE MANUFACTURING IN METALS AND THE CHALLENGE OF SURFACE QUALITY IN THEIR APPLICATIONS

Gabriel de Paiva Silva

Thalia de Souza Menna Barreto

Déborah de Oliveira

Maksym Ziberov

University of Brasília, Mechanical Engineering Department, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil, Zip Code: 70.910-900

dpaivagabriel@gmail.com

thaliambbs@gmail.com

oliveira.deborah@unb.br

mziberov@unb.br

Abstract. Additive manufacturing processes are used for the fabrication of three-dimensional parts from models derived from computer-aided design. By joining materials layer by layer, it is possible to build parts with geometric complexity and material combinations that could not be obtained by other manufacturing processes. Thanks to the control of the amount of deposited material, this process promotes waste reduction and can be used in a wide variety of materials, such as polymers or metal alloys. In addition, this technology has great potential to reduce environmental impacts in the manufacturing industry. With the large investment in research in the area of additive manufacturing, this technology has achieved progress in several sectors of the industry, such as automotive, energy, aerospace, biomedical, among others. One of the main techniques used for metal alloys which is expected to be used commercially today is Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). This technique stands out for its high deposition speed when compared to processes that use a laser or electron beam. However, although additive manufacturing of metals has many advantages over traditional manufacturing techniques, its application on an industrial scale is still under development, as there are many aspects that need to be improved. Metallic parts obtained by additive manufacturing are subjected to complex thermal processes, which involve rapid melting and cooling of the base material, which changes the microstructure and, consequently, the mechanical properties of the final product, such as hardness, ductility, fatigue resistance, among others. Furthermore, additive manufacturing is not yet able to provide high dimensional accuracies, so the parts produced in this way tend to have low surface and geometric quality. Therefore, there is a need to apply post-processing techniques to these parts, which occurs mainly through finishing machining. Thus, this work proposes a literature review on additive manufacturing processes in metals and their applications, as well as future trends to improve the surface quality of parts obtained by this technology.

Keywords: Additive Manufacturing; Hybrid Manufacturing; Machining; Surface Quality.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.