

## UMA REVISÃO DAS OPORTUNIDADES NA MANUFATURA ADITIVA COM TITÂNIO EM PÓ PELO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO POR ENERGIA DIRIGIDA A LASER

**Guilherme Rosati Mecelis**

**Cleiton Lazaro Fazolo de Assis**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus Votuporanga  
Guilherme.mecelis@ifsp.edu.br; fazolocla@ifsp.edu.br

**Reginaldo Teixeira Coelho**

**Eraldo Jannone da Silva**

Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo  
rtcoelho@sc.usp.br; eraldojs@sc.usp.br

**Resumo.** *O uso da manufatura aditiva (MA) cresceu nos últimos anos, principalmente pelos avanços tecnológicos desenvolvidos nessa área, e cada vez mais o processo tem sido utilizado para aplicações amadoras e profissionais. Dentre os processos de MA, o de Deposição por Energia Dirigida a Laser (L-DED) ganha destaque por sua maior produtividade em comparação a outros métodos, depositando maior quantidade de material e apresentando um excelente controle das propriedades finais das peças. Em especial, o uso de materiais como o titânio ganha destaque, pois tem importante aplicação na indústria química, marinha, aeroespacial, e, principalmente, como biomaterial em implantes médicos. Este trabalho reúne os recentes desenvolvimentos na MA por L-DED usando ligas de titânio em pó, investigando as oportunidades de pesquisa na área. Duas principais oportunidades são elencadas, o controle do gás de proteção e a combinação do processo L-DED com a microusinagem, levantando também questões secundárias que são oportunidades de estudo: o aperfeiçoamento de sistemas que possibilitem um controle dinâmico da composição do gás de proteção e do pó metálico durante o processo de L-DED e o avanço em estudos que analisem a influência dos parâmetros de manufatura na peça final.*

**Palavras chave:** *Manufatura Aditiva. Deposição por Energia Dirigida a Laser. Titânio. Manufatura Híbrida.*

### 1. INTRODUÇÃO

Desde o seu surgimento em meados de 1987 (Thompson, 2016), a Manufatura Aditiva (MA) vem ganhando crescente atenção, tanto no mercado quanto na pesquisa científica (Sames *et al.*, 2016), principalmente pela vasta gama de aplicações, que podem variar de baixo a alto custo, por usuários domésticos a indústrias de ponta, além de utilizar diversos tipos de materiais (Debroy *et al.*, 2018). Nesse tempo, tanto as propriedades mecânicas quanto a repetibilidade e confiabilidade do processo de MA melhoraram significativamente (Wohlers, 2014).

Esse tipo de processo é ideal para fabricação de protótipos devido à grande flexibilidade e capacidade de fabricar peças com estruturas complexas com relativa facilidade (Karar *et al.*, 2020). Este se baseia em fabricar uma peça a partir de um modelo tridimensional, e progressivamente ir adicionando material até que o componente esteja pronto (Debroy *et al.*, 2018). Dentre as técnicas de MA, ganha destaque a de Deposição por Energia Dirigida (DED), que consiste em depositar material num percurso específico através de sua fusão a partir de uma fonte de energia que, no caso dos metais, pode ser um laser de alta potência. Essa técnica ganha destaque principalmente pela alta produtividade em comparação com outros processos (Sidambe, 2014).

A flexibilidade da MA é evidenciada pela possibilidade de utilização de diversos tipos de materiais, desde polímeros até ligas metálicas nobres, e o titânio desperta especial interesse pelo alto grau de biocompatibilidade (Tasenchuk *et al.*, 2020), favorecendo sua aplicação em implantes médicos que podem ser altamente personalizados pelo processo de MA (Wang *et al.*, 2016a).

A partir de outras revisões sobre o assunto da MA (Debroy *et al.*, 2018; Sames *et al.* 2016) e sobre a MA de titânio (Attar *et al.* 2018; Fang *et al.* 2018), este trabalho tem por objetivo explorar de forma mais específica o tema e identificar lacunas ou oportunidades de pesquisa nos trabalhos mais recentes dentro desse campo.

### 2. TITÂNIO

As ligas de titânio são utilizadas na fabricação de equipamentos biomédicos, militares, eletrônicos e petroquímicos, e na fabricação de aeronaves e espaçonaves. Desde o início da produção industrial de titânio em 1948, suas aplicações se desenvolveram e aumentaram substancialmente nas últimas décadas (Wang *et al.*, 2016b).

Como o nono elemento mais abundante na Terra e o quarto entre os metais estruturais, o titânio e suas ligas têm sido de grande interesse para a humanidade por mais de meio século (Fang *et al.*, 2018). Nas últimas duas décadas, a produção de ligas de titânio amadureceram mais rapidamente do que talvez qualquer material estrutural na história da metalurgia (Banerjee, 2013).

Devido às propriedades mecânicas e excelente resistência à corrosão, o titânio se tornou um elemento chave para melhorar diversos tipos de sistemas, sendo utilizado, por exemplo, em pás de turbinas (Loria, 2000) ou em próteses ósseas (Bandyopadhyay *et al.*, 2019) e dentárias (Jemat *et al.*, 2015), sendo que nessas duas aplicações podem ser utilizadas técnicas de MA tanto para reparo (Saboori *et al.*, 2019) quanto para a fabricação das peças (Dinda *et al.*, 2008), exemplos ilustrados na Fig. 1.

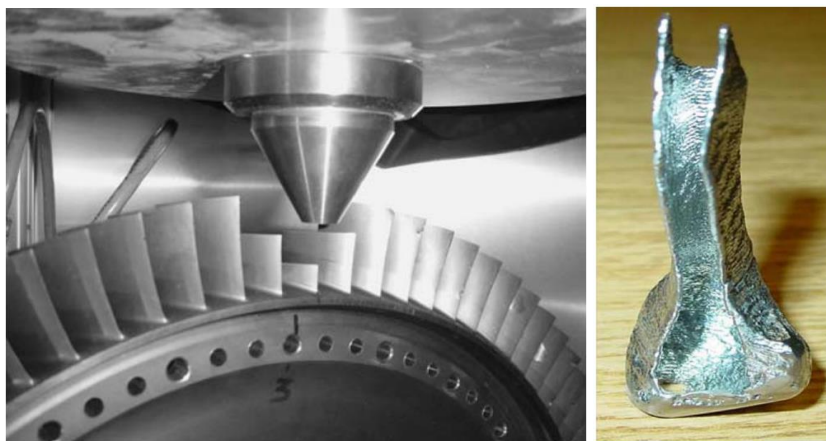


Figura 1. À esquerda: Blinks de titânio sendo reparados (Nowotny *et al.*, 2007). À direita: Estrutura semelhante ao osso humano (Dinda *et al.*, 2008). Ambas realizadas por L-DED em titânio.

A liga de titânio mais utilizada geralmente, inclusive na MA, é a Ti-6Al-4V (Ti-6-4), mas diversas ligas são estudadas investigando os efeitos dos elementos de liga adicionados. No caso da MA essas ligas podem ser fornecidas em pó, arames ou chapas, e vale ressaltar que a utilização de pó ocasiona uma menor taxa de deposição quando comparados a arames e chapas (Karar *et al.*, 2020). Estudos mostraram ser possível misturar outros elementos de liga diretamente no pó metálico da liga de titânio, levando a diferentes propriedades mecânicas finais, sendo que as quantidades desses ligantes ainda devem ser melhor estudadas para evitar o acontecimento de fenômenos adversos como a blindagem, que pode impedir a fusão de parte do pó utilizado (Byun *et al.*, 2018). Além disso, existe a possibilidade de utilizar diferentes composições dos pós metálicos, variando em quantidade de elementos de liga em diferentes camadas durante o processo por Deposição por Energia Dirigida (DED), abrindo caminho para explorar novas aplicações (Shishkovsky *et al.*, 2018), ou ainda a utilização de ligas de diferentes metais para formar um material compósito (Davis *et al.*, 2019). Nesse sentido, existe a oportunidade de estudar diferentes ligas e combinações entre elas a fim de entender os mecanismos que podem ser melhor explorados no caso da MA.

### 3. PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA

A norma ISO/ASTM 52900:2015 divide a MA em sete principais categorias: jato aglutinante, deposição por energia dirigida, extrusão de material, jato de material, fusão em leito de pó, laminação em chapas e foto-polimerização em cuba. Essa classificação foi feita considerando a fonte de energia. Entretanto, essa norma deveria ser atualizada para adequação das classificações, pois a evolução da tecnologia devido às diversas e constantes pesquisas avança rapidamente.

Seguindo a classificação já consolidada pela norma, os processos mais utilizados comercialmente em metais atualmente, e consequentemente para as ligas de titânio, são os de Deposição por Energia Dirigida (*Directed Energy Deposition* – DED) e fusão em leito de pó (*Powder Bed Fusion* – PBF) (Qian, 2016). A técnica de PBF favorece a fabricação de componentes complexos, com vazios, tendo alta precisão e sendo compostos por uma única peça. Já o DED favorece uma alta taxa de deposição de material, utilização de múltiplos materiais e adição de material a peças prontas (Sidambe, 2014). Os processos de DED englobam diferentes processos dependendo da forma de alimentação do material e fonte de energia, e no caso específico da utilização do laser, pode ser chamado de Fabricação de Forma Final a Laser (*Laser Engineered Net Shaping* – LENS), que tem se mostrado mais vantajoso por apresentar bom efeito de resfriamento e ser mais eficiente na reconstrução de componentes (Li *et al.*, 2017), e também por apresentar melhores resultados na fabricação de peças com geometrias complexas (Balla *et al.*, 2016). Esse processo LENS, por utilizar laser, pode ser referido como um processo de Deposição por Energia Dirigida a Laser (L-DED).

O processo de L-DED se mostra bastante adequado para utilização com titânio, e vem sendo estudado de diversas formas, a fim de definir melhores parâmetros de MA, bem como o efeito de alguns métodos como o recobrimento de

peças prontas (Ryu *et al.*, 2020), a restauração ou personalização de peças prontas (Rittinghaus *et al.*, 2020) ou a confecção de peças integrais, variando também a porosidade que pode ser atingida variando os parâmetros de manufatura (Bandyopahyay *et al.*, 2019).

Este processo consiste na alimentação material metálico que será fundido por um laser, adicionando material passo a passo até formar a peça pronta. As tecnologias de MA que utilizam pós como matéria-prima ainda são as mais comuns quando se utilizam materiais metálicos (Attar *et al.*, 2018). Um diagrama esquemático de processos de L-DED utilizando pó metálico é mostrado na Fig. 2.

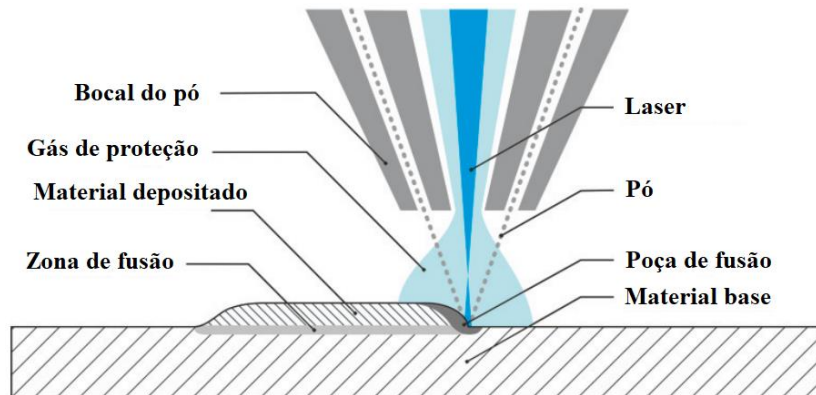


Figura 2. Representação esquemática de um processo de L-DED (Adaptado de Graf *et al.*, 2013).

O laser cria uma poça de fusão e, em seguida, o bico de pó injeta o pó metálico na poça de fusão em um ambiente controlado com algum gás inerte, como gás de proteção e como mecanismo de transporte para o pó metálico. Quando dois pós diferentes são usados, o mecanismo de transporte mescla os pós para que a mistura desejada chegue ao bico (Erinosho *et al.*, 2016).

Em relação aos parâmetros de MA por L-DED, Attar *et al.* (2019) mostram que maiores velocidades de resfriamento favorecem uma maior resistência devido ao refinamento de grão, demonstrando ainda que o processo LENS parece ser o mais benéfico nesse sentido. Esse refino de grão, também estudado por Zhang *et al.* (2019), ocorre, pois é possível controlar em certo ponto a nucleação no titânio, afetando a morfologia dos grãos, ao controlar a temperatura e resfriamento da poça de fusão (Birmingham *et al.*, 2019). Esse mecanismo foi também confirmado por Narayana *et al.* (2019) ao estudarem a resposta microestrutural de peças de titânio fabricadas por L-DED.

Apesar disso, uma configuração de parâmetros ideais para a fabricação por L-DED dependerá da liga de titânio utilizada, necessitando uma definição de parâmetros diferentes para cada liga, pois os elementos ligantes influenciam na morfologia dos grãos formados durante a solidificação (Zhu, 2019), e para auxiliar na definição de parâmetros, modelos digitais para simulação computacional da solidificação de ligas de titânio já estão em desenvolvimento e apresentando boa aproximação aos dados experimentais (Shimono *et al.*, 2019).

A partir da literatura constata-se ainda que as variáveis do processo de MA mais adequadas dependerão do material, pelas propriedades do pó utilizado (composição, formato e tamanho das partículas, densidade, escoamento, etc) e do processo, pelos critérios de fabricação (tipo de laser, potência, espessura de camada, etc) (Karar *et al.*, 2020).

Assim, um campo de estudo que continua em evidência é a investigação de parâmetros da MA que sejam ideais para cada aplicação, ou ainda a busca por uma generalização que atenda de forma geral às necessidades específicas de cada projeto. Como foi apontado, resistência mecânica, acabamento, porosidade, entre outras propriedades, variam de acordo com o projeto e, portanto, também dependem da seleção de parâmetros adequados para a MA, o que é um campo amplo e, possivelmente, sempre estará em aperfeiçoamento.

Embora a MA não seja indicada para produção em larga escala, a integração com outros processos pode ser bastante vantajosa (Merklein *et al.*, 2016), como a utilização do processo de refusão de superfície, que torna possível atingir diferentes níveis de dureza superficial de acordo com o gás de proteção utilizado no processo (Hwang *et al.* 2018), demonstrando um processo que pode ser realizado no mesmo equipamento da realização do processo de L-DED para obtenção de peças funcionais. A partir do controle da concentração de Nitrogênio na composição do gás de proteção, controla-se a formação de Nitretos de Titânio e, portanto, a dureza (Fig. 3), mas apresenta um resultado negativo, pois uma maior concentração de Nitrogênio favorece a formação de trincas superficiais no processo de refusão.

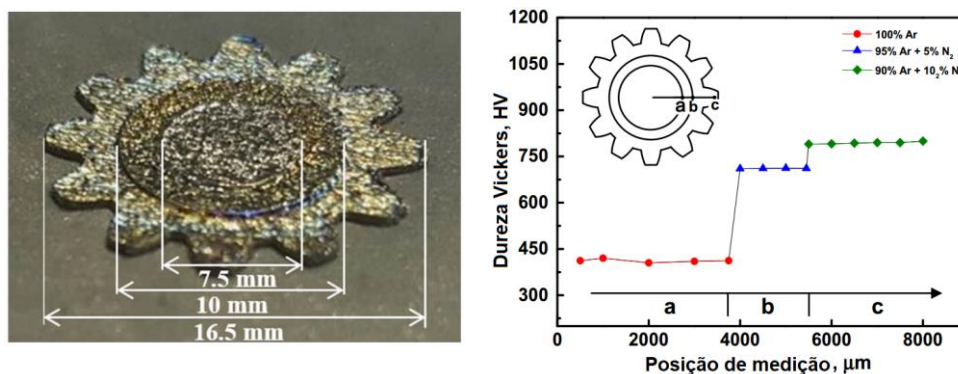


Figura 3. Engrenagem produzida por L-DED (à esquerda) e a distribuição de dureza na seção transversal da engrenagem (à direita). (Traduzido de Hwang *et al.*, 2018)

Esses resultados mostram a importância da interação entre o gás e o material formado, mas investigou somente essa interação durante um processo de refusão. Observa-se então a necessidade de analisar a possibilidade de usar esse princípio durante todo o processo de MA, verificando sua viabilidade, bem como a investigação de outros gases que possam interagir com as ligas metálicas utilizadas. A utilização desse tipo de controle poderia resultar na obtenção de uma peça com diferentes propriedades em diferentes partes, o que pode ser vantajoso em diversas aplicações. Esse tipo de estudo já começa a ser explorado por Siwal *et al.* (2020), que investigam a efetividade do gás Ar-CO<sub>2</sub> no processo de MA por arco elétrico (*Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM*), um outro processo de MA por DED, ou pelo estudo de Eo *et al.* (2020), que estudam o controle de inclusões pelo controle de fluxo do gás de proteção no processo L-DED do aço Inox 316L, um outro material. Apesar disso, é escassa a literatura sobre esse tipo de investigação para o processo de L-DED em titânio.

Pensando ainda na integração da MA com outros processos, é possível relacionar processos subtrativos à MA como o de fresamento, muito utilizado para dar acabamento e exatidão de medidas na recuperação de peças através da MA (Veiga *et al.*, 2020). Oyelola *et al.* (2020) estudaram a usinagem em material produzido por L-DED, e obteve bons resultados de rugosidade e tensão residual utilizando um método adaptativo para fresamento e furação, que consiste basicamente em utilizar um feedback em tempo real para ajustar os parâmetros de usinagem, mostrando que o método adaptativo apresentou menores rugosidade superficiais ( $R_a$  e  $R_z$ ) em comparação aos métodos convencionais. A microusinagem também é estudada em peças produzidas por MA, como o estudo de De Assis *et al.* (2020) que estudam a formação de rebarbas e a rugosidade produzidas pela microusinagem de corpos de prova em aço inox 316L produzidos por PBF, mostrando que há anisotropia em relação à direção de usinagem, e também que a região de corte central e concordante do fresamento apresentam menor rugosidade em comparação com a região de corte discordante. Assim, estudos de microusinagem semelhantes podem ser explorados em peças produzidas por L-DED de titânio para melhorar o entendimento dos fenômenos envolvidos.

Nessa vertente, a microusinagem de peças produzidas por MA se mostra em evidência principalmente por suas aplicações. De Oliveira Campos *et al.* (2020) elaboram um estudo comparativo da microusinagem de peças de titânio (Ti6Al4V) comerciais contra produzidas por MA, demonstrando que além de apresentar uma maior resistência, as peças produzidas por MA possuem melhor usinabilidade, tendo uma dureza 16% maior, mas com forças de corte 9.3% menores quando em comparação com peças comerciais, além das peças produzidas por MA também apresentarem menos rebarba. Os autores ainda apontam que esse efeito ocorre devido ao refinamento de grão na microestrutura gerada por MA.

Outro estudo comprova as afirmações anteriores, mostrando que, quando comparadas com o material convencional produzido por extrusão, peças produzidas por MA e posteriormente submetidas à microusinagem apresentam menores forças de corte e melhor acabamento superficial (Hojati *et al.*, 2020), comprovando que essa combinação entre MA e microusinagem tende a ser muito vantajosa.

Considerando essas vantagens, estudar a microusinagem em peças de titânio fabricadas por MA pode ser muito promissor, pois existem aplicações como a busca por uma texturização da superfície através desse processo, como o demonstrado por Pratap *et al.* (2018), que utilizaram a microusinagem em peças de titânio para melhorar a molhabilidade, utilizando o trajeto da ferramenta a fim de produzir uma textura que atingisse este objetivo. Um outro estudo propõe como método de texturização a indução de uma vibração na ferramenta durante a microusinagem, e que através desse método é possível controlar a molhabilidade da superfície através dos parâmetros de usinagem utilizados (Chen *et al.*, 2018).

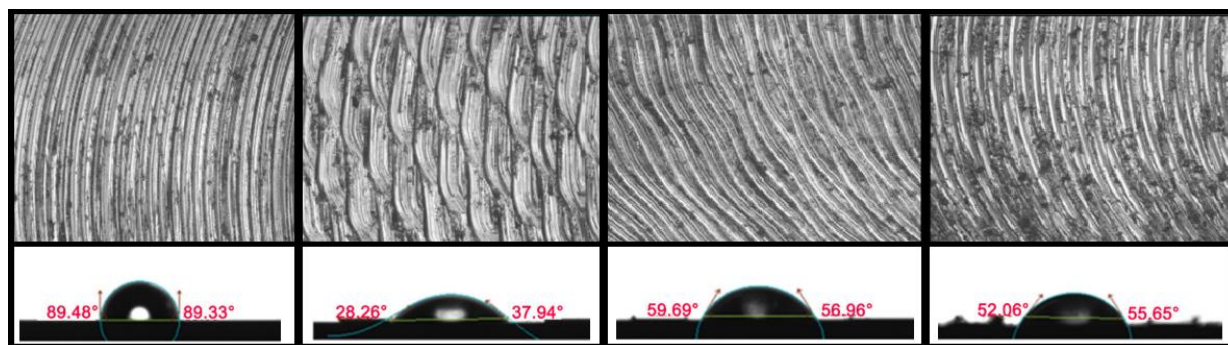


Figura 4. Exemplos de texturas obtidas pela microusinagem (acima) e a molhabilidade testada de cada uma (abaixo). (Chen *et al.*, 2018)

Cabe aqui ressaltar que essa molhabilidade é muito importante para a utilização do titânio em implantes, pois essa característica, quando bem controlada, pode favorecer a adesão celular e, conseqüentemente, melhorar a biocompatibilidade do implante, como implantes ósseos (Rosales-Leal *et al.*, 2010) ou dentários (Rupp *et al.*, 2014).

Assim, investigar essa combinação de microusinagem com a MA oferece diversas oportunidades, como as de atingir os mesmos efeitos já atingidos pelos autores citados com um menor custo, pois com menores forças de usinagem, há menos desgaste de ferramental, ou ainda chegar a melhores resultados por conta das possibilidades de alcançar diferentes estruturas e propriedades mecânicas com o titânio produzido por MA, o que pode influenciar na interação com a microusinagem.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A MA pelo processo de L-DED, utilizando ligas de titânio, desperta grande interesse da comunidade científica em diversas frentes, principalmente pela flexibilidade em fornecer peças complexas e personalizadas, favorecendo o uso em diversas áreas. É evidente que ainda há muito a ser estudado nesse assunto, como a investigação de parâmetros e configurações da MA por L-DED para possibilitar o controle das propriedades mecânicas na peça pronta, bem como o acabamento, ou tipo de superfície, a ser atingido, e também a utilização de outros processos complementares junto ao de MA para chegar às especificações desejadas. Sendo assim, é possível apontar algumas oportunidades de pesquisa para o avanço da técnica de MA por L-DED utilizando pó de ligas de titânio:

- Estudar a influência de diferentes combinações de gases de proteção durante o processo de MA a fim de favorecer a formação de compostos que possam influenciar as propriedades mecânicas das peças fabricadas por esse método, principalmente influenciando na dureza e acabamento superficial;
- Investigar a micro texturização superficial de peças de Titânio fabricadas por L-DED, estudando o efeito do processo de MA na microusinabilidade dessas peças.

Considerando essas oportunidades, propostas secundárias podem ser elencadas como complementação desses estudos, tornando práticas suas aplicações:

- Aperfeiçoar os sistemas de fornecimento do gás de proteção e de alimentação de pó metálico para que possam ser controladas a composição do gás e a mistura de ligas dos pós de forma dinâmica durante o processo de MA por L-DED, levando à formação de diferentes estruturas internas ou superficiais durante o processo, resultando num melhor controle das características da peça final obtida. A ideia é que esses sistemas sejam capazes de controlar as proporções de diferentes gases e materiais de acordo com a programação do processo, viabilizando que sejam alteradas dinamicamente durante o processo.
- Avançar os estudos dos parâmetros de configuração do processo de MA por L-DED utilizando titânio, contribuindo para o entendimento de como essas variáveis influenciam as características da peça final.

Assim, seria possível avançar a tecnologia de MA de forma que fosse possível produzir peças por L-DED com as características microestruturais desejadas, controlando também as camadas mais superficiais para que se favoreça a microusinagem como processo complementar, expandindo a aplicabilidade e interação destes processos de fabricação.

#### 7. REFERÊNCIAS

- Attar, H., Ehtemam-Haghighi, S., Kent, D. e Dargusch, M. S., 2018. Recent developments and opportunities in additive manufacturing of titanium-based matrix composites: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 133, p. 85-102.
- Attar, H., Bermingham, M.J., Ehteman-Haghighi, S., Dehghan-Manshadi, A., Kent, D. e Dargusch, M.S., 2019. Evaluation of the mechanical and wear properties of titanium produced by three different additive manufacturing methods for biomedical application. *Materials Science and Engineering: A*, v. 760, p. 339-345.

- Balla, V.K., Das, M., Mohammad, A. e Al-Ahmari, A.M., 2016. Additive Manufacturing of  $\gamma$ -TiAl: Processing, Microstructure, and Properties. *Advanced Engineering Materials*, v. 18, n. 7, p. 1208-1215.
- Bandyopadhyay, A., Mitra, I., Shivaram, A., Dasgupta, N. e Bose, S., 2019. Direct comparison of additively manufactured porous titanium and tantalum implants towards in vivo osseointegration. *Additive manufacturing*, v. 28, p. 259-266.
- Banerjee, D. e Williams, J. C., 2013. Perspectives on titanium science and technology. *Acta Materialia*, v. 61, n. 3, p. 844-879.
- Birmingham, M.J., StJohn, D.H., Krynen, J., Tedman-Jones, S. e Dargusch, M.S., 2019. Promoting the columnar to equiaxed transition and grain refinement of titanium alloys during additive manufacturing. *Acta Materialia*, v. 168, p. 261-274.
- Byun, Y., Lee, S., Seo, S.-M., Yeom, J.-T., Kim, S.E., Kang, N., e Hong, J., 2018. Effects of Cr and Fe addition on microstructure and tensile properties of Ti-6Al-4V prepared by direct energy deposition. *Metals and Materials International*, v. 24, n. 6, p. 1213-1220.
- Chen, W., Zheng, L., Huo, D. e Chen, Y., 2018. Surface texture formation by non-resonant vibration assisted micro milling. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, v. 28, n. 2, p. 025006.
- de Assis, C.L.F., Mecelis, G.R. e Coelho, R.T., 2020. An investigation of stainless steel 316L parts produced by powder bed fusion submitted to micro-endmilling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 109, n. 7, p. 1867-1880.
- DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Bees, A.M., Wilson-Heid, A., De, A. e Zhang, W., 2018. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, v. 92, p. 112-224.
- de Oliveira Campos, F., Araujo, A.C., Munhoz, A.L.J. e Kapoor, S.G., 2020. The influence of additive manufacturing on the micromilling machinability of Ti6Al4V: A comparison of SLM and commercial workpieces. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 60, p. 299-307.
- Dinda, G. P., Song, L. e Mazumder, J., 2008. Fabrication of Ti-6Al-4V scaffolds by direct metal deposition. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 39, n. 12, p. 2914-2922.
- Eo, D.-R., Park, S.-H. e Cho, J.-W., 2020. Controlling inclusion evolution behavior by adjusting flow rate of shielding gas during direct energy deposition of AISI 316 L. *Additive Manufacturing*, v. 33, p. 101119.
- Erinosho, M.F., Akinlabi, E.T. e Pityana, S., 2016. Effect of scanning speed and powder flow rate on the evolving properties of laser metal deposited Ti-6Al-4V/Cu composites. *International Journal of Surface Science and Engineering*, v. 10, n. 3, p. 207-223.
- Fang, Z.Z., Paramore, J.D., Sun, P., Chandran, K.R., Zhang, Y., Xia, Y., Cao, F., Koopman, M. e Free, M., 2018. Powder metallurgy of titanium—past, present, and future. *International Materials Reviews*, v. 63, n. 7, p. 407-459.
- Graf, B., Ammer, S., Gumenyuk, A. e Rethmeier, M., 2013. Design of experiments for laser metal deposition in maintenance, repair and overhaul applications. *Procedia CIRP*, v. 11, p. 245-248.
- Hojati, F., Daneshi, A., Soltani, B., Azarhoushang, B. e Biermann, D., 2020. Study on machinability of additively manufactured and conventional titanium alloys in micro-milling process. *Precision Engineering*, v. 62, p. 1-9.
- Hwang, T., Woo, Y.Y., Han, S.W. e Moon, Y.H., 2018. Functionally graded properties in directed-energy-deposition titanium parts. *Optics & Laser Technology*, v. 105, p. 80-88.
- Jemat, A., Ghazali, M.J., Razali, M. e Otsuka, Y., 2015. Surface modifications and their effects on titanium dental implants. *BioMed research international*, v. 2015.
- Karar, G.C., Kumar, R. e Chattopadhyaya, S., 2020. An Analysis on the Advanced Research in Additive Manufacturing. In: *Advances in Production and Industrial Engineering*. Springer, Singapore, p. 229-277.
- Li, Y., Hu, Y., Cong, W., Zhi, L. e Guo, Z., 2017. Additive manufacturing of alumina using laser engineered net shaping: Effects of deposition variables. *Ceramics International*, v. 43, n. 10, p. 7768-7775.
- Loria, E.A., 2000. Gamma titanium aluminides as prospective structural materials. *Intermetallics*, v. 8, n. 9-11, p. 1339-1345.
- Merklein, M., Junker, D., Schaub, A. e Neubauer, F., 2016. Hybrid additive manufacturing technologies—an analysis regarding potentials and applications. *Physics procedia*, v. 83, p. 549-559.
- Nowotny, S., Scharek, S., Beyer, E. e Richter, K.H., 2007. Laser beam build-up welding: precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition. *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 16, n. 3, p. 344-348.
- Oyelola, O., Jackson-Crisp, A., Crawforth, P., Pieris, D.M., Smith, R.J., M'Saoubi, R. e Clare, A.T., 2020. Machining of directed energy deposited Ti6Al4V using adaptive control. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 54, p. 240-250.
- Pratap, T. e Patra, K., 2018. Fabrication of micro-textured surfaces using ball-end micromilling for wettability enhancement of Ti-6Al-4V. *Journal of materials processing technology*, v. 262, p. 168-181.
- Qian, M., Xu, W., Brandt, M. e Tang, H.P., 2016. Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties. *MRS Bulletin*, v. 41, n. 10, p. 775-784.
- Rittinghaus, S.-K., Schmelzer, J., Rackel, M.W., Hemes, S., Vogelpoth, A., Hecht, U., e Weisheit, A., 2020. Direct Energy Deposition of TiAl for Hybrid Manufacturing and Repair of Turbine Blades. *Materials*, v. 13, n. 19, p. 4392.
- Rosales-Leal, J.I., Rodríguez-Valverde, M.A., Mazzaglia, G., Ramón-Torregrosa, P.J., Díaz-Rodríguez, L., García-Martínez, O., Vallecillo-Capilla, M., Ruiz, C. e Cabrerizo-Vílchez, M.A., 2010. Effect of roughness, wettability and

- morphology of engineered titanium surfaces on osteoblast-like cell adhesion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 365, n. 1-3, p. 222-229.
- Ryu, D. J., Sonn, C.-H., Hong, D.H., Kwon, K.B., Park, S.J., Ban, H.Y., Kwak, T.Y., Lim, D., e Wang, J.H., 2020. Titanium Porous Coating Using 3D Direct Energy Deposition (DED) Printing for Cementless TKA Implants: Does It Induce Chronic Inflammation?. *Materials*, v. 13, n. 2, p. 472.
- Rupp, F., Gittens, R.A., Scheideler, L., Marmur, A., Boyan, B.D., Schwartz, Z., e Geis-Gerstorfer, J., 2014. A review on the wettability of dental implant surfaces I: theoretical and experimental aspects. *Acta biomaterialia*, v. 10, n. 7, p. 2894-2906.
- Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M. e Fino, P., 2019. Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair. *Applied Sciences*, v. 9, n. 16, p. 3316.
- Sames, W.J., List, F.A., Pannala, S., Dehoff, R.R. e Babu, S.S., 2016. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International materials reviews*, v. 61, n. 5, p. 315-360.
- Shimono, Y., Oba, M. e Nomoto, S., 2019. Solidification simulation of direct energy deposition process by multi-phase field method coupled with thermal analysis. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, v. 27, n. 7, p. 074006.
- Shishkovsky, I., Missemer, F. e Smurov, I., 2018. Metal matrix composites with ternary intermetallic inclusions fabricated by laser direct energy deposition. *Composite Structures*, v. 183, p. 663-670.
- Sidambe, A.T., 2014. Biocompatibility of advanced manufactured titanium implants—A review. *Materials*, v. 7, n. 12, p. 8168-8188.
- Silwal, B., Nycz, A., Masuo, C.J., Noakes, M.W., Marsh, D. e Vaughan, D., 2020. An experimental investigation of the effectiveness of Ar-CO<sub>2</sub> shielding gas mixture for the wire arc additive process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 108, p. 1285-1296.
- Veiga, F., Del Val, A.G., Suárez, A. e Alonso, U., 2020. Analysis of the machining process of titanium Ti6Al-4V parts manufactured by wire arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, v. 13, n. 3, p. 766.
- Wang, M., Lin, X. e Huang, W., 2016b. Laser additive manufacture of titanium alloys. *Materials Technology*, v. 31, n. 2, p. 90-97.
- Wang, X., Xu, S., Zhou, S., Xu, W., Leary, M., Choong, P., Qian, M., Brandt, M., e Xie, Y. M., 2016a. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. *Biomaterials*, v. 83, p. 127-141.
- Wohlers, T. Wohlers report. Wohlers Associates Inc, 2014.
- Yasenchuk, Y., Marchenko, E., Baigonakova, G., Gunther, S., Kokorev, O., Gunter, V., Chekalkin, T., Topolnitskiy, E., Obrosov, A. e Kang, J.-H., 2020. Study on tensile, bending, fatigue, and in-vivo behavior of porous SHS-TiNi alloy used as a bone substitute. *Biomedical Materials*.
- Zhu, Y.-Y., Tang, H.-B., Li, Z., Xu, C. e He, B., 2019. Solidification behavior and grain morphology of laser additive manufacturing titanium alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 777, p. 712-716.
- Zhang, D., Qiu, D., Gibson, M.A., Zheng, Y., Fraser, H.L., StJohn, D.H. e Easton, M.A., 2019. Additive manufacturing of ultrafine-grained high-strength titanium alloys. *Nature*, v. 576, n. 7785, p. 91-95.

## 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

# A REVIEW OF OPPORTUNITIES IN ADDITIVE MANUFACTURING BY TITANIUM POWDER IN LASER DIRECTED ENERGY DEPOSITION PROCESS

**Guilherme Rosati Mecelis**

**Cleiton Lazaro Fazolo de Assis**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus Votuporanga  
Guilherme.mecelis@ifsp.edu.br; fazolocla@ifsp.edu.br

**Reginaldo Teixeira Coelho**

**Eraldo Jannone da Silva**

Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo  
rtcoelho@sc.usp.br; eraldojs@sc.usp.br

***Abstract:** The use of additive manufacturing (AM) has grown in recent years, mainly due to technological advances developed in this area, and the process has been increasingly used for amateur and professional applications. Among the AM processes, the Laser Directed Energy Deposition (L-DED) stands out for its greater productivity compared to other methods, depositing a greater amount of material and presenting an excellent control of the part's final properties. In particular, the use of materials such as titanium is highlighted, as it has an important application in the chemical, marine, aerospace industries, and as biomaterial in implants. This work brings together the recent developments in MA by L-DED using powdered titanium alloys, investigating what has been done and highlighting research opportunities in the area. Two main opportunities are listed, the control of the shielding gas and the combination of the L-DED process with micromachining, also raising secondary issues that are opportunities for study: the improvement of systems that allow a dynamic control of the composition of the shielding gas and the metallic powder during the L-DED process, and advances in studies that analyze the influence of final piece's manufacturing parameters.*

***Keywords:** Additive Manufacturing, 3D printing, Laser Directed Energy Deposition (L-DED), Titanium.*

## RESPONSIBILITY NOTICE

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