

13º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2022

Metalurgia e a Manufatura Aditiva de Metais para a Indústria 4.0

GIAN R. C. SILVA¹, CARLOS E. CORRÊA², DIEGO R. N. CORREA³

¹⁻² Estudante do curso de Pós-graduação em Indústria 4.0, IFSP, Campus Sorocaba, gianmetals@gmail.com

³ Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico (EBTT), IFSP, Campus Sorocaba, diego.correa@ifsp.edu.br
Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.03.00.00-2 Engenharia de Materiais e Metalúrgica

RESUMO: Com os avanços da manufatura aditiva de metais, hoje são fabricados produtos personalizados, joias, dispositivos médicos para implantes, aparelhos odontológicos, componentes aeroespaciais, estruturas complexas, ferramentas, moldes, reparos de componentes de alto custo e baixo volume, utilizando materiais caros e difíceis de processar por métodos convencionais. Reconhecida como um processo avançado para a produção de componentes de engenharia em uma abordagem camada por camada, oferece uma rota de fabricação alternativa aos processos existentes, e permite desenvolver novos projetos com complexidade inatingível se comparado as técnicas convencionais. Este trabalho apresenta o estado atual da tecnologia, e explora os principais fenômenos metalúrgicos durante a manufatura aditiva de metais (MAM). Mostra particularidades entre as técnicas em termos de fusão de leito em pó (PBF), por deposição de energia direcionada (DED), alimentados por pó ou por arame, e a aplicação de diferentes metais. Características microestruturais e propriedades mecânicas de materiais avançados e de alta aplicabilidade, como os aços inoxidáveis, ligas de níquel, ligas de alumínio e ligas de titânio, são destacados juntamente com os efeitos de tratamento térmico. Para garantir os desenvolvimentos no campo da MAM e a adoção em massa, o conhecimento, a qualificação e a certificação dos materiais, produtos e processos são fundamentais.

PALAVRAS-CHAVE: impressão 3D; metalurgia; fusão de leito em pó; laser; microestrutura; deposição de energia direcionada.

ÁREA DO CONHECIMENTO: Engenharia de Materiais e Metalúrgica.

Metallurgy and Additive Metal Manufacturing for Industry 4.0

ABSTRACT: With the advances in metals additive manufacturing, today are fabricated custom products, jewelry, medical devices for implants, dental appliances, aerospace components, complex structures, tools, molds, and component repairs of high cost and low volume, using expensive and difficult materials processing by conventional methods. Recognized as an advanced process for producing engineering components in a layer-by-layer approach, it offers an alternative manufacturing route to existing processes and allows the development of new projects with unattainable complexity compared to conventional techniques. This work presents the current state of the technology and explores the main metallurgical phenomena during metal additive manufacturing (AMM). It shows particularities between powder bed melting (PBF) techniques, directed energy deposition (DED) fed by powder or wire, and applying different metals. Microstructural characteristics and mechanical properties of advanced and highly applicable materials classified as stainless steel, nickel, aluminum, and titanium alloys are highlighted, along with the heat treatment effects. To ensure developments in AMM and mass adoption, knowledge, qualification, and certification of materials, products, and processes are critical.

KEYWORDS: 3D printing; metal; powder bed fusion; laser; microstructure; directed energy deposition.

INTRODUÇÃO

A MA tem sido usada há mais de duas décadas como método de processamento de materiais, embora inicialmente limitada à prototipagem rápida de estruturas porosas. Ao longo do tempo a tecnologia tem avançado na produção de peças com densidade e qualidade aceitáveis para aplicações específicas, sendo capaz de fabricar peças confiáveis e densas de diversos materiais, incluindo aços, ligas à base de níquel ou titânio, e compósitos de matriz metálica. As técnicas de MA podem ser categorizadas com base no sistema de alimentação (leito ou cama de pó, alimentação com pó e alimentação com arame), bem como na fonte de energia (feixe de laser, feixe de elétrons, arco, plasma, etc.). A manufatura aditiva metálica (MAM) por Deposição de Energia Direcionada a Laser (L-DED), por exemplo, geralmente resulta na formação de grãos colunares orientados ao longo da direção de construção, levando a propriedades mecânicas anisotrópicas. Isso pode afetar negativamente a aplicação pretendida do produto. A anisotropia pode ser eliminada modificando o material por meio de uma exposição adicional ao ultrassom para controle da solidificação (nucleação) durante o resfriamento no processo L-DED, e/ou por meio de tratamentos térmicos pós-processamento, resultando na recuperação das propriedades mecânicas apropriadas, conforme confirmado por testes e medições. A MA de componentes metálicos pode ser considerada uma combinação avançada de ferramentas tradicionais de fabricação, por exemplo, metalurgia do pó e soldagem em termos de união, preparação e tratamento de pós, fundição com a formação de zona de fusão e revestimentos por aspersão com o empilhamento de camadas, respectivamente. Este trabalho correlaciona os principais fenômenos metalúrgicos e as tecnologias da MAM, para a compreensão das propriedades alcançadas nas peças produzidas.

MATERIAL E MÉTODOS

Uma considerável atividade de pesquisa tem sido especialmente voltada para a manufatura 3D de materiais metálicos, o que inspirou trabalhos com foco na relação entre parâmetros de processamento, características estruturais, propriedades mecânicas e desempenho funcional, como mostra a Figura 1.

The screenshot shows the Scopus search interface. At the top, it indicates '180 document results' and provides the search query: `TITLE-ABS-KEY (metal AND additive AND manufacturing) AND (LIMIT-TO (OA, 'all')) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2023) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2021)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, 'ar')) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, 'English'))`. Below the search bar, there are options to 'Refine results' and 'Limit to' (Open Access, Gold, Hybrid Gold, Bronze, Green). The search results are displayed in a table with columns: Document title, Authors, Year, Source, and Cited by. Two results are visible:

Document title	Authors	Year	Source	Cited by
1 Biological Stability of Water-Based Cutting Fluids: Progress and Application Open Access	Tang, L., Zhang, Y., Li, C., (-), Ali, H.M., Sharma, S.	2022	Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition) 35(1), 3	33
2 Metalization of polymers and composites: State-of-the-art approaches Open Access	Meteliev, R., Vuolanto, A., Tao, R., Vachkov, T., Lubineau, G.	2022	Materials and Design 221, 110656	1

FIGURA 1. Apresenta uma pesquisa de busca na plataforma SCOPUS, com refinamento por palavras-chave, período, revistas, tipos de artigos, linguagem, entre outros.

Este estudo apresenta uma revisão sistemática de artigos publicados em revistas internacionais no ano de 2022 e 2023 (disponíveis), com ênfase na estratégia de busca pelas palavras-chave em inglês, *additive and/or manufacturing and/or metal*.

Durante a pesquisa foram utilizadas as plataformas, Scopus (Figura 1), Web of Science e ScienceDirect (Elsevier), como fonte de busca dos trabalhos científicos publicados nesses 2 anos em revistas internacionais especializadas em computação, materiais, metalurgia, manufatura aditiva, projeto, automação de processo e manufatura inteligente.

Ao todo foram selecionados cerca de 106 artigos completos publicados em revistas classificadas com alto fator de impacto nas áreas especificadas, e alguns artigos de revisão publicados

internacionalmente com grande número de citações. Por isso, este artigo de revisão bibliográfica fornece uma visão geral da literatura mais recente envolvendo MA com fontes de energia de elétrons e a laser para fusão seletiva e fabricação 3D de componentes metálicos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tecnologia a laser (LAM) pode ser divididas em duas classes diferentes com base em sua matéria prima como (i) fusão em leito de pó (PBF, por exemplo, fusão seletiva a laser (SLM) e sinterização seletiva a laser (SLS)) e (ii) deposição de energia direcionada (DED, por exemplo, deposição direta de metal (DMD) e modelagem de rede projetada a laser (LENS)) (ZHANG 2022).

A alteração de parâmetros críticos pode afetar principalmente as circunstâncias/condições de processamento, por exemplo, a formação da poça de fusão, temperatura, gradiente térmico, taxa de resfriamento e outras propriedades dependentes do calor. Posteriormente, ao alterar a microestrutura da peça fabricada, características estruturais envolvendo formação de defeitos, tensões residuais, tamanho de grão, transformação de fase e textura cristalográfica dificultam as propriedades mecânicas das peças fabricadas (MORADI 2022).

A anisotropia, por exemplo, depende do sistema metálico e do comportamento de solidificação direcional, levando a uma potencial heterogeneidade na peça fabricada, que depende de parâmetros de processamento. Além disso, a geração de outros problemas/deficiências, como microporos, formação de bolas, falta de fusão, etc., também pode resultar em anisotropia e degradação das propriedades mecânicas nas peças fabricadas (PLESSIS 2022).

A norma ASTM 52900:2015 define sete categorias para tecnologias MA, principalmente com base no método de deposição. Entre eles, a fusão em leito de pó (PBF), a deposição de energia direcionada (DED) e laminação de chapas (SL) são aplicadas na fabricação aditiva de materiais metálicos. Com base na fonte de calor no processo, as técnicas de MA podem ser classificadas como sistemas baseados em laser, feixe de elétrons, arco, plasma e ultrassônico. Outra classificação típica para processos de MA é baseada no modo de matéria prima como (i) leito de pó, (ii) alimentação de pó e (iii) sistemas de alimentação de arame, conforme mostra a Figura 2 (MOEINFAR 2022). Esta importante categorização como o arranjo aceito no artigo atual também fornece uma distinção entre os processos de MAM na maneira de introduzir o material de alimentação e comparar diferentes tecnologias em termos de taxa de deposição (velocidade de produção), complexidade (tolerância dimensional, precisão), distorção da peça, tensões residuais e desempenho estrutural.

O gradiente de temperatura devido ao envolvimento do laser na fusão das matérias-primas resulta em uma estrutura de grão fino para as peças fabricadas. Além disso, a rápida solidificação leva ao desequilíbrio da microestrutura e à formação de fases, que podem variar localmente. Devido à variação nos parâmetros de processamento e método de fabricação, o fluxo de calor é geralmente anisotrópico, favorecendo a direção de construção como a direção de maior condutividade de calor. Assim, são esperadas texturas microestruturais e grãos alongados, levando a propriedades anisotrópicas nas peças fabricadas. O aquecimento e resfriamento cíclico da camada previamente solidificada devido ao processamento camada sobre camada nos métodos LAM pode atuar como tratamento térmico, o que alteraria a estrutura final do componente produzido. Esses ciclos térmicos afetam a estrutura da amostra de maneira diferente, como a decomposição de fases frágeis como a fase martensítica para graus mais dúcteis, alívio de tensões e crescimento de grãos. No entanto, o tratamento térmico pós-fabricação pode ajustar a microestrutura e as características mecânicas de maneira mais eficaz. Com base nos detalhes de microscopia relatados na literatura, as características microestruturais para metais e ligas fabricados com LAM são baseadas na solidificação, na forma de morfologia celular, dendrítica ou equiaxial, que podem afetar pela operação de transformações de fase de estado sólido, dependendo da química do material (MALAKIZADI 2022).

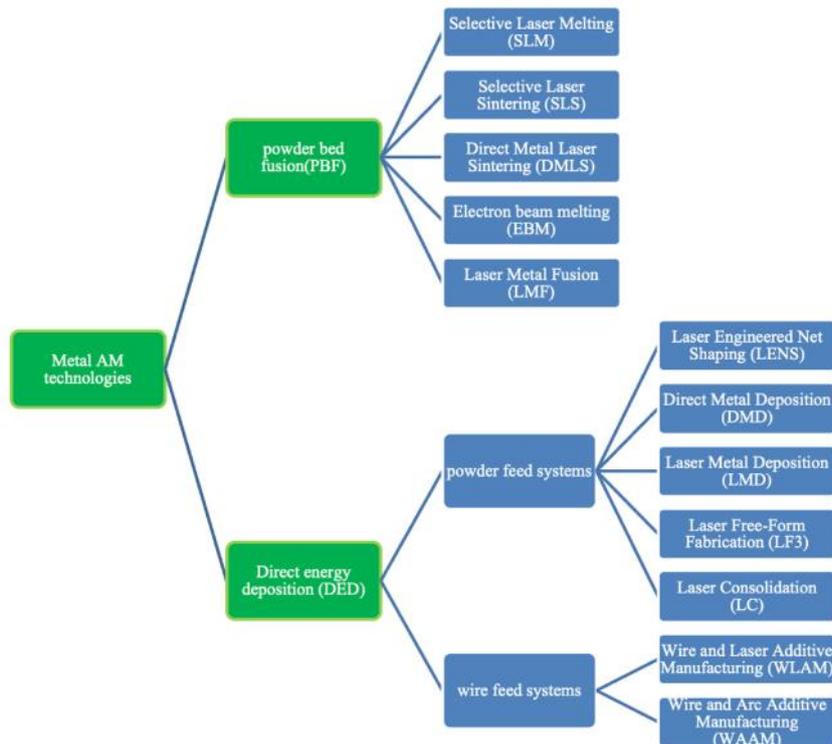


FIGURA 2. Tecnologias da manufatura aditiva de metais por fusão de pó (PBF), e por deposição de energia direta (DED) com sistemas de alimentação via pó e arame (MOEINFAR 2022).

As peças metálicas da LAM têm dificuldades em corresponder ao desempenho de carga dinâmica dos materiais convencionais devido à sensibilidade aos parâmetros e problemas de anisotropia. Os resultados das propriedades mecânicas estáticas dessas estruturas podem suprimir as dos corpos comercialmente consolidados. A resposta mecânica líder na forma de dureza de endentação e resistência à tração para componentes depositados em LAM exibiu tendências superiores em relação ao estado tradicional de fabricação em quase casos de ligas (pelo menos em comparação com a forma do produto em chapa). Isso é atribuído à formação de uma estrutura celular e grãos refinados causados pelo resfriamento rápido do tratamento LAM durante a deposição de metal camada sobre camada. Vários estudos sobre as diferentes peças metálicas fabricadas pela LAM sugerem que as propriedades de fadiga comparáveis às peças fabricadas convencionalmente são alcançáveis. Os estudos atuais sobre as propriedades de fadiga das peças LAM desenham um cenário promissor para as peças fabricadas LAM. Devido ao rápido crescimento em nossa compreensão do efeito dos parâmetros de fabricação sobre as propriedades resultantes, será possível fabricar peças altamente funcionais de várias ligas com propriedades desejadas (NARASIMHARAJU 2022).

A Figura 3, mostra as vistas ampliadas da seção transversal de 6 amostras depositadas na condição de polidas para revelar vários graus de porosidade devido às condições de fusão. O material foi depositado a laser produzido sob condições variadas de velocidade de varredura e espaçamento, resultando em diferentes graus de porosidade resultantes de uma variedade de parâmetros de processamento e vários graus de penetração. Esses resultados variam de uma microestrutura sinterizada com vazios e porosidade, a uma microestrutura fundida atingindo densidade quase total.

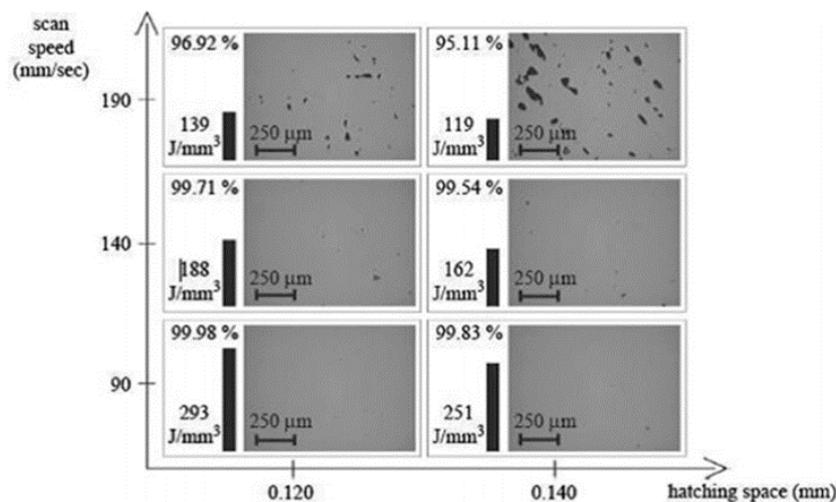


FIGURA 3. Imagens de amostras com microestruturas típicas de peças sinterizadas contendo vazios e porosidade, e com microestruturas atingindo densidade quase total. (Fonte: MILEWSKI 2017.)

CONCLUSÕES

A manufatura aditiva (AM) está sendo desenvolvida como uma nova tecnologia para produzir componentes de engenharia 3D em competição com as tecnologias tradicionais de produção em larga escala, como fundição, conformação de metais, metalurgia do pó, montagem mecânica e usinagem CNC. A MAM é definida como a fabricação de materiais camada sobre camada, incluindo impressão 3D, prototipagem rápida e fabricação digital direta.

Esta tecnologia deve desempenhar um papel significativo na 4ª revolução industrial no aspecto da fabricação digital para o campo de adição de metal à laser. A fabricação (LAM) é uma tecnologia promissora para deposição camada por camada e construção de geometrias complexas usando várias estratégias de leito de pó, alimentação de pó e alimentação de arame.

Do ponto de vista metalúrgico, com foco nas características microestruturais e propriedades de metais e ligas, a tecnologia LAM foi amplamente desenvolvida para projetar diferentes materiais avançados, incluindo aços, ligas à base de titânio, superligas à base de níquel e compósitos de matriz metálica, para implementação em indústrias de alta tecnologia, como aeroespacial e biomédica.

AGRADECIMENTOS

Ao instituto IFSP-Sorocaba, pelo Programa de Especialização em Indústria 4.0. Ao Programa Institucional de Incentivo a Participação de Discente em Eventos (PIPDE).

REFERÊNCIAS

- MALAKIZADI A.; et al. Post-processing of additively manufactured metallic alloys, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 179, p. 103908, 2022.
- MILEWSKI, J.O. **Additive Manufacturing of Metals**, ed. Springer, v.258, USA, 2017.
- MOEINFAR KH.; et al. A review on metallurgical aspects of laser additive manufacturing: Stainless steels, nickel superalloys, and titanium alloys. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 16, p. 1029-1068, 2022.
- MORADI, M.; et al. Direct laser metal deposition and additive manufacturing of Inconel 718 superalloy: Elemental, microstructural and physical properties evaluation, **International Journal for Light and Electron Optics**, v. 259, p. 169018, 2022.
- NARASIMHARAJU, S. V.; et al. A comprehensive review on laser powder bed fusion of steels: Processing, microstructure, defects and control methods, mechanical properties, current challenges and future trends. **Journal of Manufacturing Process**, v. 75, p. 375-414, 2022.
- PLESSIS A.; et al. Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials, **Progress in Materials Science**, v. 125, p. 100918, 2022.
- ZHANG, R.; et al. Review of Additive Manufacturing Techniques for Large-Scale Metal Functionally Graded Materials, **Crystals**, v. 12, p. 858-, 2022.