

TÉCNICAS DE MANUFATURA ADITIVA DE PEÇAS METÁLICAS

Ana Laura Nascimento de Oliveira^{1,2}; Erika Peterson Gonçalves¹; Guilherme de A. H. C. C. Lima²

1 Universidade do Vale do Paraíba – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IP&D), Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, 12244-000, São José dos Campos-SP, Brasil. (ana.laura@bizu.space; erika@univap.br).

2 Bizu Space, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, 12244-000, São José dos Campos-SP, Brasil. (ana.laura@bizu.space; guilherme@bizu.space).

Resumo: A manufatura aditiva metálica (Metal AM) tem se consolidado como alternativa e complemento a processos convencionais — como usinagem subtrativa e fundição — ao permitir elevada liberdade geométrica, potencial redução de desperdício e possibilidade de ajuste microestrutural por meio de parâmetros de processamento. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica crítica das principais rotas de impressão 3D de metais, com foco em Powder Bed Fusion (PBF), Directed Energy Deposition (DED) e extrusão de material com ligante seguida de debinding e sinterização (frequentemente comercializada como “metal FFF” ou Bound Metal Deposition). A revisão teve como objetivo comparar princípios de funcionamento, requisitos de matéria-prima, desempenho típico reportado (densidade, resolução, acabamento e propriedades mecânicas), limitações recorrentes e tendências de desenvolvimento, de modo a apoiar a seleção tecnológica em função de requisitos de projeto e de produção. Foi conduzida uma revisão sistemática em bases indexadas (ScienceDirect, Scopus, Web of Science e Google Scholar), contemplando publicações entre 2005 e 2024; os estudos foram selecionados por triagem de títulos e resumos, leitura integral e análise comparativa, priorizando revisões e artigos com métricas quantitativas, além de trabalhos sobre defeitos, pós-processamentos, monitoramento e qualificação. Os resultados indicam que o PBF (incluindo variantes a laser e a feixe de elétrons) apresenta maior maturidade industrial e melhor capacidade de obtenção de alta densificação e qualidade dimensional, tipicamente com densidades superiores a 99%, porém é sensível a parâmetros de varredura, estratégias de suporte e controle de atmosfera; tensões residuais, distorções e anisotropia microestrutural são frequentes e costumam demandar tratamentos térmicos e, em aplicações críticas, etapas adicionais de acabamento e inspeção. O DED demonstra altas taxas de deposição e flexibilidade geométrica para peças de grande porte, reforços e reparos localizados, usualmente com densidades em torno de 95–98%, mas com maior rugosidade e menor resolução, o que torna comum a necessidade de usinagem posterior e de controle rigoroso de estabilidade do cordão depositado. Já a rota baseada em filamentos/pastas metal-ligante seguida de debinding e sinterização destaca-se por menor custo de equipamento e acessibilidade, alcançando densidades finais típicas de 90–96% e desempenho adequado para prototipagem funcional e componentes de menor criticidade; sua qualidade depende fortemente do controle do ciclo térmico, da retração e da mitigação de porosidade. Em todas as rotas, desafios recorrentes incluem porosidade, heterogeneidade microestrutural, trincas e distorções, além da dependência de pós-tratamentos térmicos e/ou mecânicos. As tendências mais citadas incluem Design for Additive Manufacturing (DfAM), simulação termomecânica, controle adaptativo com apoio de aprendizado de máquina e desenvolvimento de ligas otimizadas para AM. Conclui-se que as técnicas são complementares: PBF é indicado para alta precisão e desempenho; DED é competitivo para deposição direcionada e reparo; e a rota por sinterização amplia o acesso à Metal AM em baixo volume. Recomenda-se, para adoção industrial, fortalecimento de padronização e qualificação de processos, rastreabilidade de

pós/filamentos e integração CAD/CAM para orientação, suportes e planejamento de parâmetros, visando repetibilidade e certificação.

Palavras-chave: Impressão 3D; Manufatura aditiva metálica; Powder Bed Fusion; Directed Energy Deposition; Sinterização.

METAL ADDITIVE MANUFACTURING TECHNIQUES FOR METALLIC PARTS

Ana Laura Nascimento de Oliveira^{1,2}; Erika Peterson Goçalves¹; Guilherme de A. H. C. C. Lima²

1 Universidade do Vale do Paraíba - Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IP&D), Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, 12244-000, São José dos Campos-SP, Brasil. (ana.laura@bizu.space; erika@univap.br).

2 Bizu Space, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, 12244-000, São José dos Campos-SP, Brasil. (ana.laura@bizu.space; guilherme@bizu.space).

Abstract: Metal additive manufacturing (Metal AM) has increasingly been adopted as an alternative and a complement to conventional routes such as subtractive machining and casting, by enabling high geometric freedom, potential material waste reduction, and microstructural tailoring through process parameters. This paper presents a critical literature review of major metal AM process families, focusing on Powder Bed Fusion (PBF), Directed Energy Deposition (DED), and material extrusion with a metal–binder feedstock followed by debinding and sintering (often referred to as Bound Metal Deposition or “metal FFF” in commercial contexts). The aim is to compare operating principles, feedstock requirements, and commonly reported performance indicators—density, resolution, surface finish, and mechanical properties—as well as recurrent limitations and current research trends, supporting technology selection according to design and production requirements. A structured search was conducted in indexed databases (ScienceDirect, Scopus, Web of Science, and Google Scholar), covering publications from 2005 to 2024; studies were screened by title/abstract, followed by full-text review and comparative analysis, prioritizing review papers and experimental works reporting quantitative metrics, as well as contributions on defects, post-processing, monitoring, and process qualification. Overall, the literature indicates that PBF (including laser- and electron-beam-based variants) is the most industrially mature route and typically achieves the highest densification and dimensional capability, often exceeding 99% relative density; however, it is sensitive to scan strategies, support design, and atmosphere control, and it frequently exhibits residual stresses, distortion, and microstructural anisotropy, which commonly require heat treatment and, for critical parts, additional finishing and inspection steps. DED is characterized by higher deposition rates and flexibility for large components, feature addition, and localized repair, usually achieving densities around 95–98%, but with lower resolution and higher roughness, making subsequent machining and stringent bead stability control common. The binder-based extrusion route stands out for lower equipment cost and accessibility, reaching typical final densities of 90–96% and enabling functional prototyping and less safety-critical components; its outcomes strongly depend on thermal cycle control, shrinkage management, and porosity mitigation. Across all routes, recurring challenges include porosity, microstructural heterogeneity, cracking, and distortion, in addition to the need for thermal and/or mechanical postprocessing. Frequently cited trends comprise Design for Additive Manufacturing (DfAM), thermomechanical simulation, adaptive control supported by machine learning, and the development of alloys tailored for AM. The review concludes that these process families are complementary: PBF is preferred for high precision and performance; DED is competitive for directed deposition and repair; and binder-based sintering routes broaden access to Metal AM for low-volume production. For industrial deployment, the literature emphasizes stronger standardization and qualification practices, feedstock traceability, and tighter CAD/CAM integration for orientation, support strategies, and parameter planning to ensure repeatability and certification readiness.

Keywords: Metal additive manufacturing; Powder bed fusion; Directed energy deposition; Metal FFF; Sintering.