

DESENVOLVIMENTO DE FILAMENTO POLIMÉRICO ALTAMENTE CARREGADO COM LIGA METÁLICA AVANÇADA PARA APLICAÇÃO EM MEX/M: PLANO DE TRABALHO

Heitor Coelho Estevão, heitorcoelho92@gmail.com

Patrícia Alves Barbosa, patricia.a.barbosa@ufes.br

Universidade Federal do Espírito Sando. Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES, 29075-910.

Resumo. A tecnologia de manufatura aditiva por extrusão de material (MEX) se destaca por sua acessibilidade, precisão e versatilidade na produção de peças tridimensionais. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta o plano de desenvolvimento de um filamento compósito de matriz polimérica altamente carregado com liga metálica avançada para aplicação em MEX. Para tanto, propõe-se a formulação e processamento de um material inovador, capaz de combinar a processabilidade dos polímeros com o desempenho mecânico das ligas metálicas, visando a obtenção de componentes com alta densidade e estabilidade dimensional após sinterização. A metodologia compreende a seleção e caracterização de pós metálicos de ligas avançadas, formulação de um sistema ligante polimérico com aditivos compatibilizantes e surfactantes, mistura e extrusão do compósito, bem como a avaliação microestrutural, térmica e mecânica do filamento produzido. Testes de impressão serão conduzidos para verificar a qualidade do cordão extrudado, aderência entre camadas e integridade estrutural das peças. A pesquisa busca analisar os parâmetros de composição e extrusão, reduzindo fenômenos como o inchamento do material e variações de diâmetro, que comprometem a precisão dimensional da peça. Assim, espera-se como resultado um filamento de baixo custo, processável em equipamentos convencionais de manufatura aditiva e com propriedades adequadas para posterior sinterização. O trabalho contribui para o avanço da manufatura aditiva, oferecendo uma alternativa sustentável e economicamente viável para a produção de componentes metálicos complexos e funcionais, ampliando o acesso a tecnologias e fortalecendo o desenvolvimento científico e tecnológico no campo da manufatura aditiva metálica.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. MEX/M. Filamento Polimérico Altamente Carregado. Liga Metálica Avançada.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA) consolidou-se, nas últimas décadas, como um dos pilares das tecnologias emergentes da engenharia moderna, sendo estabelecida na indústria 4.0 e promovendo uma mudança significativa na forma como componentes e sistemas são projetados e fabricados, permitindo a criação de objetos com geometrias complexas e personalizadas (RAJENDRAN et al., 2023; VOLPATO, 2025). Em contraste aos processos de fabricação convencionais, baseados na remoção ou deformação de material, a MA minimiza o desperdício aumentando a eficiência e possibilitando a produção de compósitos de alta qualidade, permitindo a construção tridimensional de peças por deposição sucessiva de camadas, a partir de um modelo digital tridimensional. Tal processo possibilita precisão e rapidez, expandido sua adoção para setores aeroespacial, automotivo e médico (JAIME et al., 2024; RODRIGUES et al., 2024).

A norma ANBT NBR ISO/ASTM 52900:2018 classifica a MA em sete categorias principais: Extrusão de Material (*Material Extrusion*), Fotopolimerização em Cuba (*Vat Photopolymerization*), Jateamento de Material (*Material Jetting*), Jato de Aglutinante (*Binder Jetting*), Fusão em Leito de Pó (*Powder Bed Fusion*), Laminação de Folha (*Sheet Lamination*) e Deposição por Energia Direcionada (*Directed Energy Deposition*), com cada uma apresentando características próprias de deposição, fonte de energia e tipo de matéria-prima.

Dentre as tecnologias citadas, o método de extrusão de material (*Material Extrusion* – MEX), também conhecido como fabricação com filamento fundido (*Fused Filament Fabrication* – FFF) destaca-se como uma das mais difundidas devido à sua simplicidade operacional, alto desempenho, baixo custo e ampla variedade de materiais termoplásticos disponíveis, como ácido polilático (PLA), acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e polietileno tereftalato glicol, (PETG), além daqueles incorporados com materiais funcionais, reforços particulados (RODRIGUES et al., 2024; SADAF et al., 2024). O princípio de funcionamento dessa tecnologia consiste em extrudar um filamento através de um bico aquecido de diâmetro reduzido, no qual o polímero é fundido e depositado camada a camada sobre uma plataforma de construção (SILVA et al., 2024; TADI; MAMILLA, 2025; VOLPATO, 2025).

Com o avanço das pesquisas, a manufatura aditiva deixou de se restringir aos polímeros e passou a abranger materiais metálicos e cerâmicos, viabilizando aplicações em setores estratégicos (SADAF et al., 2024). Em relação a produção de peças metálicas, a tecnologia de Extrusão de Material Metálico (MEX/M), ou Fabricação por Filamento Metálico Fundido (*metal Fused Filament Fabrication* - mFFF), emergiu como uma solução mais acessível, sustentável e ambientalmente amigável em comparação com tecnologias de Deposição por Energia Direcionada (DED) e Fusão em Leito de Pó (*Powder Bed Fusion* - PBF), que são de custo elevado, considerando equipamento, operação e material de alimentação. Este último, se apresenta na forma de pós soltos, que podem ser prejudiciais à saúde do operador e ao meio ambiente, requerendo cuidados específicos para manuseio (WAGNER et al., 2022).

A extrusão de material metálico é uma tecnologia MA de múltiplos estágios iniciando pela etapa de extrusão, que confere a forma ao objeto (peça “verde”); passando por processos secundários de remoção do ligante (*debinding*) com a obtenção da peça “marrom”; finalizando com a consolidação via sinterização para conferir as propriedades mecânicas finais à peça (KARIMI; FAYAZFAR, 2023; RAJENDRAN et al., 2023; SADAF et al., 2024).

A tecnologia MEX/M, exige um filamento (*feedstock*) composto por uma alta concentração volumétrica de pó metálico fino (1 μm a 10 μm), variando tipicamente entre 55% e 65% em volume, para garantir boa capacidade de impressão e densificação durante a sinterização, além de dispersão homogênea das partículas, em um sistema ligante de base polimérica com propriedades térmicas adequadas (KARIMI; FAYAZFAR, 2023; SADAF et al., 2024). O sucesso do MEX/M está, também, intrinsecamente ligado à formulação do ligante (*binder*), que deve manter a rigidez do filamento (evitando o efeito *buckling* durante a alimentação, um fenômeno de instabilidade mecânica que ocorre em filamentos termoplásticos), garantir coesão durante a impressão e ser passível de remoção total (*debinding*), sem deixar contaminantes que comprometam as propriedades mecânicas do metal sinterizado (JAIME et al., 2024; KARIMI; FAYAZFAR, 2023; SADAF et al., 2024).

No contexto dos metais utilizados, o aço inoxidável austenítico 316L, é apresentado como o material que vem sendo investigado no campo da manufatura aditiva MEX/M devido às suas características de resistência à corrosão e excelente sinterabilidade. Pesquisas recentes demonstram que peças obtidas com essa matéria-prima, após sinterização em altas temperaturas, podem atingir microestruturas homogêneas, resistência mecânica e alta densificação (entre 95% a 99,5%), comparável a peças produzidas pelo processo de moldagem por injeção de metal (*Metal Injection Molding* – MIM) (KARIMI; FAYAZFAR, 2023; SADAF et al., 2024). Lewandowski e Seifi (2016) mostram o uso de ligas metálicas avançadas, como as ligas de alta entropia (HEAs), em processos de manufatura aditiva por PBF, no qual, em um contexto amplo, possibilita o desenvolvimento de materiais de alto desempenho para aplicações estruturais.

Neste cenário, para a produção do filamento compósito altamente carregado, há a necessidade de um controle rigoroso do processo de fabricação, pautados na dispersão distributiva e dispersiva necessárias para incorporação da alta carga de pó metálico à matriz polimérica (MANONUKUL, 2022). O desenvolvimento de filamentos poliméricos altamente carregados com ligas metálicas representa um desafio interdisciplinar, envolvendo aspectos de ciência dos materiais, reologia, engenharia térmica e manufatura. Sendo seu aprimoramento, um viés com grande potencial para reduzir o custo da manufatura metálica, aumentar a sustentabilidade do processo e democratizar o acesso à impressão de peças metálicas funcionais (JAIME et al., 2024; KARIMI; FAYAZFAR, 2023; RAJENDRAN et al., 2023).

Dessa forma, o estudo em vigor, busca desenvolver um filamento compósito de matriz polimérica altamente carregada com uma liga metálica avançada de alta entropia. O objetivo é propor um material sustentável, econômico e de fácil processabilidade, para aplicação em manufatura aditiva por extrusão de material metálico MEX/M, capaz de aliar estabilidade dimensional, elevada densidade pós-sinterização e propriedades mecânicas superiores, contribuindo para o avanço tecnológico e científico da manufatura aditiva metálica.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa consiste no desenvolvimento e caracterização de um filamento compósito de matriz polimérica altamente carregado com liga metálica avançada para aplicação em manufatura aditiva por extrusão de material (MEX), visando compreender e otimizar as relações entre composição, processamento, e propriedades finais do compósito para obtenção de peças sinterizadas com elevada densidade e desempenho mecânico superior.

2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Como enfoque, objetifica-se compreender e estruturar o sistema ligante polimérico, caracterizar os pós de liga metálica avançada, formular e desenvolver o filamento compósito polímero-metal, realizar a caracterização microestrutural, térmica e mecânica do filamento e testar a capacidade de impressão do filamento.

3. METODOLOGIA

3.1. FORMULAÇÃO DO SISTEMA LIGANTE POLIMÉRICO

Serão realizados estudos para identificar materiais adequados, como: elastômero termoplástico, aglutinante e surfactante compatíveis com o pó de liga metálica avançada. Diferentes aditivos serão avaliados para melhorar a adesão entre o polímero e o metal. Ademais, teste experimentais serão conduzidos para desenvolver formulações do sistema ligante, variando a composição e proporções dos componentes.

3.2. ADQUIRIR E CARACTERIZAR OS PÓS DE LIGA METÁLICA AVANÇADA

Inicialmente, será realizada a aquisição de pó de liga metálica avançada com propriedades adequadas para compor o sistema compósito de matriz polimérica. A caracterização deste material será conduzida em etapas. A composição química da liga será determinada por difração de raios X (DRX), permitindo identificar as fases presentes e possíveis impurezas. Em seguida, microscopias óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) serão utilizadas para avaliar a morfologia, aglomeração e superfície dos pós. A distribuição do tamanho de partículas será analisada por técnica apropriada, como difração a laser ou peneiramento, a fim de garantir uniformidade no processo de mistura com o sistema ligante. Os dados obtidos nesta etapa serão fundamentais para garantir a compatibilidade entre o pó metálico e a matriz polimérica, além de permitir ajustes no processamento posterior, visando o desempenho mecânico e a qualidade da extrusão do filamento.

3.3. MISTURA DO SISTEMA LIGANTE COM O CARREGAMENTO METÁLICO

Um método de mistura eficiente, envolvendo técnica solvente e mecânica, será desenvolvido, com repetição do procedimento para garantir uma distribuição homogênea do metal na matriz polimérica. Testes serão realizados para avaliar a homogeneidade da mistura, utilizando técnicas como microscopia óptica da seção transversal dos compósitos produzidos.

3.4. FABRICAÇÃO DO FILAMENTO

Um sistema de extrusão Filmaq3D CV2 (Filmaq) será usado e adaptado às propriedades do compósito polímero-metal. Os parâmetros de processamento, como temperatura e velocidade de extrusão, serão otimizados para garantir a qualidade do filamento. Será realizado o controle do diâmetro e tolerâncias do filamento, para alcançar o diâmetro nominal de 1,75 mm, típico de filamentos para aplicação em MEX.

3.5. CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL, TÉRMICA E MECÂNICA DO FILAMENTO

Análises microestruturais serão realizadas por MO e MEV para avaliar a distribuição de partículas metálicas na matriz polimérica. As características térmicas serão determinadas por meio de calorimetria exploratória diferencial com uso do DSC Q200 (TA Instruments) e termogravimetria com o DTG-60H (Shimadzu), esses dados irão proporcionar a otimização dos parâmetros de impressão (temperatura) e a temperatura para a queima do polímero, respectivamente. Enquanto, a resistência mecânica será avaliada por ensaios mecânicos em uma máquina de ensaio universal (MBIO-II 30 kN, Biopdi), com base na norma ABNT NBR ISO 6892-1:2024.

3.6. TESTE DE CAPACIDADE DE IMPRESSÃO DO FILAMENTO

Nos testes de capacidade de impressão do filamento serão avaliados o cordão extrudado e peças de geometria básica para verificação da qualidade dimensional, aderência entre camadas e integridade estrutural por meio de microscopias óptica e de varredura.

3.7. RESULTADOS ESPERADOS

Como resultado, espera-se ampliar conhecimentos nas técnicas de processamento de materiais compósitos polímero-metal e desenvolvimento de produto com a fabricação de um filamento de matriz polimérica altamente carregado com pó de liga metálica avançada com capacidade de impressão e baixo custo para aplicação em manufatura aditiva por MEX, apresentando boas propriedades térmicas, mecânicas e de capacidade de impressão. Os resultados serão divulgados para a sociedade através de publicações em congressos nacionais e internacionais, e periódicos indexados. Além disso, podem ser estabelecidas parcerias para compartilhar os resultados ou relações interdisciplinares.

4. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/ASTM 52900**: Manufatura aditiva - princípios gerais - fundamentos e vocabulário. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1**: Materiais metálicos - ensaio de tração - parte 1 - método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2024.

JAIME, D. M.; RAMÔA, S. D.; SANTANA, L.; MERLINI, C.; ALVES, J. L.; DE OLIVEIRA BARRA, G. M. Characterization of partially soluble filament for use in material extrusion 3D printing technology. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 35, n. 7, p. e6522, 2024.

KARIMI, N.; FAYAZFAR, H. Development of highly filled nickel-polymer feedstock from recycled and biodegradable resources for low-cost material extrusion additive manufacturing of metals. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 107, p. 506-514, 2023.

LEWANDOWSKI, J. J.; SEIFI, M. Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties. **Annual review of materials research**, v. 46, n. 1, p. 151-186, 2016.

RAJENDRAN, S.; PALANI, G.; KANAKARAJ, A.; SHANMUGAM, V.; VEERASIMMAN, A.; GADEK, S.; KORNIEJENKO, K.; MARIMUTHU, U. Metal and polymer-based composites manufactured using additive manufacturing - A brief review. **Polymers**, v. 15, n. 11, p. 2564, 2023.

RODRIGUES, A.D.S.L.; PIRES, A.C.B.; BARBOSA, P.A.; SILVEIRA, Z.D.C. Polymeric composites in extrusion-based additive manufacturing: a systematic review. **Polymer Composites**, v. 45, n. 8, p. 6741-6770, 2024.

SADAF, M.; BRAGAGLIA, M.; SLEMENIK PERŠE, L.; NANNI, F. Advancements in metal additive manufacturing: A comprehensive review of material extrusion with highly filled polymers. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 8, n. 1, p. 14, 2024.

SUWANPREECHA, C.; MANONUKUL, A. A review on material extrusion additive manufacturing of metal and how it compares with metal injection moulding. **Metals**, v. 12, n. 3, p. 429, 2022.

SILVA, D.M.L.; BARBOSA, P.A.; CHINELATTO, M.A.; DE CASTRO SILVEIRA, Z. Evaluation of the effects of extrusion parameters on the swelling of extruded filament in an innovative 3D printer containing a vertical co-rotating twin-screw extrusion unit. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 134, n. 5, p. 2217-2232, 2024.

TADI, S.P.; MAMILLA, R.S. Fabrication of SS 316L particle-infilled PLA composite filaments from cast-off bi-material extrudates for 3D printing applications. **Waste Management**, v. 193, p. 386-397, 2025.

VOLPATO, Néri. Tecnologias e aplicações da produção aditiva. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2025. E-book. p. 10. ISBN 9788521225065. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521225065/>. Acesso em: 25 out. 2025.

WAGNER, M.A.; HADIAN, A.; SEBASTIAN, T.; CLEMENS, F.; SCHWEIZER, T.; RODRIGUEZ-ARBAIZAR, M.; CARREÑO-MORELLI, E.; SPOLENAK, R. Fused filament fabrication of stainless-steel structures-from binder development to sintered properties. **Additive Manufacturing**, v. 49, p. 102472, 2022.

5. AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio financeiro essencial para o desenvolvimento desta pesquisa, concedidos por meio do processo 65521.966.18226.14112024 e Edital Nº 21/2023 – TO: 762/2024; a ArcelorMittal pelo financiamento do projeto através do termo de cooperação técnica nº 09/2024; e ao LabTecMec-UFES por patrocinar o evento.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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