

CARACTERIZAÇÃO DE PEÇAS À VERDE FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA PELA TECNOLOGIA DE EXTRUSÃO DE MATERIAL METÁLICO

Renata Sobrado Jabour Braz da Silva, renatasjbraz@gmail.com¹

Patrícia Alves Barbosa, patricia.a.barbosa@ufes.br¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo – Departamento de Engenharia Mecânica – Laboratório de Tecnologia Mecânica, 29075-910, Vitória/ES, Brasil

Resumo. A manufatura aditiva (MA) destaca-se pela capacidade de produzir peças complexas e por ser um processo mais sustentável. Entre as tecnologias de MA metálica, a extrusão de material (MEX/M), surge como alternativa vantajosa pela simplicidade e menor gasto energético. Este trabalho avalia as características de peças à verde produzidas por MEX/M para aprofundar o conhecimento dessa tecnologia. Utilizou-se filamento comercial de aço inoxidável austenítico Ultrafuse® 316L da BASF. A metodologia incluiu caracterizações do filamento e de corpos de prova à verde, dentre elas a microestrutural, e as caracterizações mecânica e física por ensaio de tração e medição de densidade, respectivamente. Os resultados de microscopia óptica (MO) revelaram partículas esféricas de aço inoxidável austenítico 316L uniformemente dispersas no filamento e vazios na peça impressa, mesmo com 100% de preenchimento, característicos do processo de impressão. Comparativamente com peças poliméricas, o corpo de prova à verde de aço inoxidável 316L apresentou menor rigidez e resistência mecânica, com alongamento similar aos do ABS e PETG. A peça à verde apresentou uma densidade 16% inferior à densidade teórica, justificada pelos vazios observados em MO. Este estudo contribui para a compreensão do comportamento do material e do processo MEX/M.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. MEX/M. Aço inoxidável austenítico 316L. Resistência à tração. Densidade.

1. INTRODUÇÃO

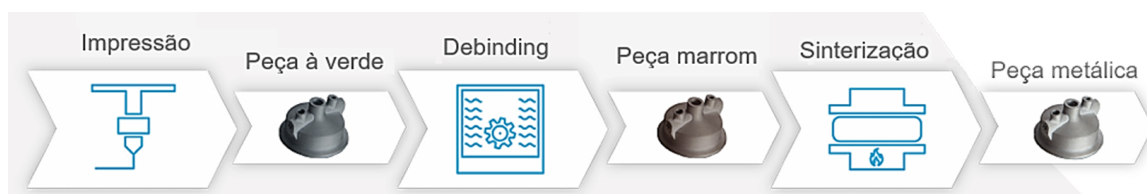
Devido a necessidade de peças cada vez mais complexas e de processos de fabricação mais sustentáveis, a manufatura aditiva (MA) tem-se popularizado. Essa tecnologia, que consiste na construção de um objeto físico por sobreposição de camadas a partir de um modelo digital 3D, gera menos desperdício em comparação a outros processos convencionais como a usinagem (ELHAZMIRI et al., 2022).

O mercado da manufatura aditiva de metais tem mostrado grande crescimento de acordo com o MARKET RESEARCH FUTURE (2024), justificado pela sua aplicação em indústrias como a aeroespacial e a automotiva devido a vantagens do processo como a redução de peso e possibilidade de fabricação de peças com geometrias complexas. Dentre as categorias de MA existentes, as que permitem a fabricação com materiais metálicos são a fusão em leito de pó, deposição por energia direcionada, jato de aglutinante, extrusão de material e a laminação de folha (ARMSTRONG, MEHRABI, NAVEED, 2022; ZHANG et al., 2018). Dentre essas tecnologias, as duas mais utilizadas são a fusão em leito de pó e a deposição por energia direcionada (LEWANDOWSKI, 2016).

A tecnologia de extrusão de material tem-se mostrado uma alternativa vantajosa para fabricação com material metálico, devido sua simplicidade, segurança e menor gasto energético comparado aos processos comumente utilizados como a fusão em leito de pó (SÆTERBØ; SOLVANG, 2023).

A manufatura aditiva por extrusão de material metálico (MEX/M - *Material Extrusion of Metals*) ocorre conforme o esquema da Figura 1. Ele é baseado na moldagem por injeção de metal (MIM - *Metal Injection Molding*) e, é dividida em três etapas: (i) a impressão da peça por extrusão de material, caracterizada pela peça à verde, em que se confere forma à peça; (ii) queima do polímero mais conhecido como *debinding*, em que a peça é denominada no estado marrom; e, (iii) consolidação por sinterização, para obtenção das propriedades mecânica finais de uma peça metálica (SUWANPREECHA; MANONUKUL, 2022).

Figura 1 – Etapas do processo de manufatura aditiva por extrusão de material metálico



Fonte: Adaptado de BASF (2021).

O presente artigo possui como objetivo avaliar as características de corpos de prova à verde fabricados com filamento metálico comercial de aço inoxidável austenítico 316L através de caracterização mecânica e física a fim de ampliar os conhecimentos da tecnologia MEX/M.

2. METODOLOGIA

2.1. MATERIAL

Nessa pesquisa foi utilizado filamento comercial Ultrafuse® 316L da fabricante BASF, com diâmetro de 1,75mm. Este material de alimentação consiste em um compósito metal-polímero, cuja composição possui 90% de aço inoxidável austenítico 316L (BASF, 2021).

2.1.1. Caracterização do filamento

A amostra da seção transversal do filamento foi embutida e polida para avaliação da morfologia e da dispersão das partículas metálicas na matriz polimérica, por meio de microscopia óptica (MO).

A análise de EDS foi utilizada para avaliar os principais elementos químicos das partículas metálicas do filamento, a fim de confirmar informações disponibilizadas pelo fabricante.

2.2. IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA

Corpos de prova de tração do Tipo V (ASTM D638-14, 2014) e blocos de seção quadrada (15x15x5 mm) para avaliação da densidade foram impressos em uma impressora 3D Sermoon D3 Pro Creality.

Os parâmetros de impressão foram definidos de acordo com a literatura, recomendações do fabricante do filamento, recomendações do fabricante da impressora e discussões do grupo de pesquisa, resultando nos parâmetros apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros para impressão dos corpos de prova

Velocidade de impressão (mm/s)	Temperatura do bico extrusor (°C)	Temperatura da mesa de impressão (°C)	Preenchimento (%)	Altura da camada (mm)
25	245	115	100	0,2

Fonte: Produção do próprio autor.

O código para impressão enviado para a impressora, arquivo *g-code*, foi gerado no *software* Creality Print 4.3, a partir da imagem tridimensional do corpo de prova em formato *stl*, da entrada dos parâmetros de impressão e estratégias de contorno e preenchimento. Foi utilizado o recurso de adesão *brim* aos CPs, que é uma técnica que imprime contornos extras à primeira camada de impressão, geralmente utilizada para impedir o empenamento da peça devido ao destacamento da mesma da mesa de impressão, durante a impressão. A estratégia de deposição empregada foi a combinada (*contour* e *raster*), com 3 filetes de contorno de parede (*contour*) e preenchimento interno em zigue-zague a 45°/-45° (*raster*). A Figura 2 mostra imagens representativas de posicionamento e orientação de construção dos CPs de tração e densidade no *software* de fatiamento.

Figura 2 – Representação da orientação de posicionamento dos modelos *stl* dos CPs para fatiamento e geração de código *g-code* para impressão. (a) Corpo de prova de tração Tipo V e (b) corpo de prova para avaliação da densidade



Fonte: Produção do próprio autor.

2.3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

A caracterização mecânica foi feita através de ensaio de tração, que consiste na aplicação de uma força de tração uniaxial em uma amostra de forma gradual até a sua fratura. Ao final do ensaio é possível gerar a curva de tensão-deformação e avaliar o módulo de elasticidade (E), limite de escoamento, limite de ruptura (LR) e o alongamento percentual (%El).

Os ensaios de tração foram executados segundo a Norma ASTM D638-14 (2014) utilizando uma máquina de ensaio universal MBIO-II Biopdi, com velocidade de ensaio de 1 mm/min, totalizando 5 testes válidos. Os resultados obtidos dos ensaios com a peça à verde de aço inoxidável 316L foram comparados com dados da literatura para materiais poliméricos utilizados em MEX.

2.4. DENSIDADE

A densidade experimental (σ) dos corpos de prova impressos à verde foi obtida através da equação (1). Para tanto, os CPs foram submetidos a medições de suas dimensões com auxílio de micrômetro digital Insize, com faixa de medição de 0 a 25 mm e resolução de 0,001 mm, para cálculo do volume. As massas foram medidas em uma balança de precisão AD200 Marte, com resolução de 0,001g. Os resultados foram comparados com o valor teórico disponibilizado pelo fabricante.

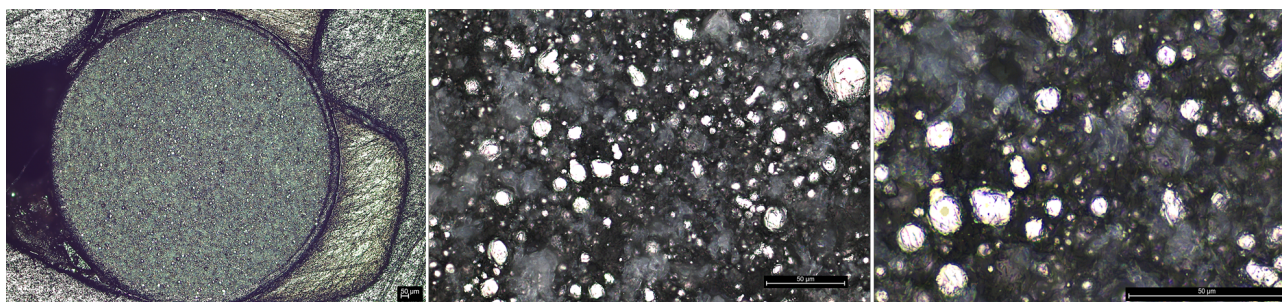
$$\sigma = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} [g/cm^3] \quad (1)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. CARACTERIZAÇÃO DO FILAMENTO

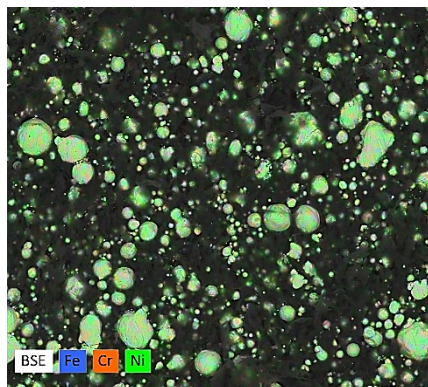
Através da Figura 3, é possível perceber que o filamento tem aspecto encapsulado, e no núcleo observa-se partículas metálicas esféricas com poucos satélites, distribuídas uniformemente na matriz polimérica. Na Figura 4, a análise química semi-quantitativa por EDS evidenciou os elementos Cr e Ni, característicos de aços inoxidáveis.

Figura 3 – Imagens de MO da seção transversal do filamento comercial de aço inoxidável austenítico Ultrafuse® 316L



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 4 – Mapeamento químico por EDS das partículas metálicas do filamento comercial de aço inoxidável austenítico Ultrafuse® 316L

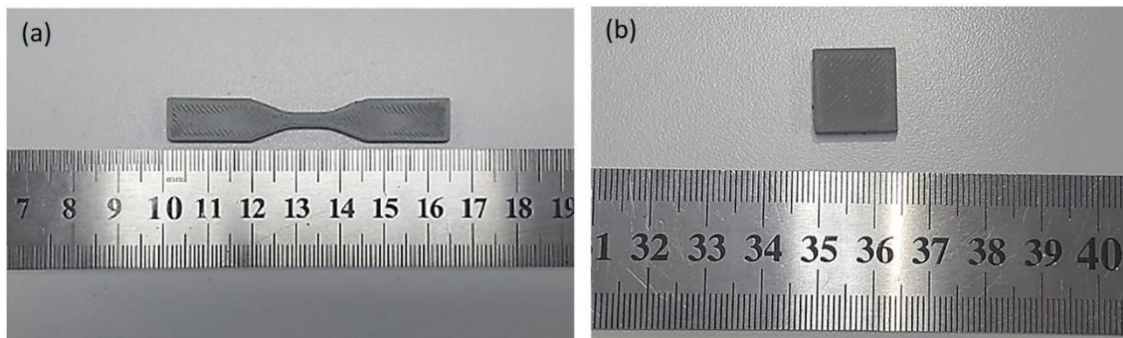


Fonte: Produção do próprio autor.

3.2. CORPOS DE PROVA IMPRESSOS

Na Figura 5 estão apresentadas imagens representativas dos corpos de prova de tração do Tipo V e corpo de prova para avaliação da densidade como impressos. Vale ressaltar que além do recurso de adesão *brim* ainda foi necessário a utilização de uma cola líquida ativada termicamente para evitar o descolamento dos CPs durante a impressão.

Figura 5 – Corpos de prova de aço inoxidável austenítico 316L à verde. (a) CP de tração do Tipo V e (d) CP para avaliação da densidade

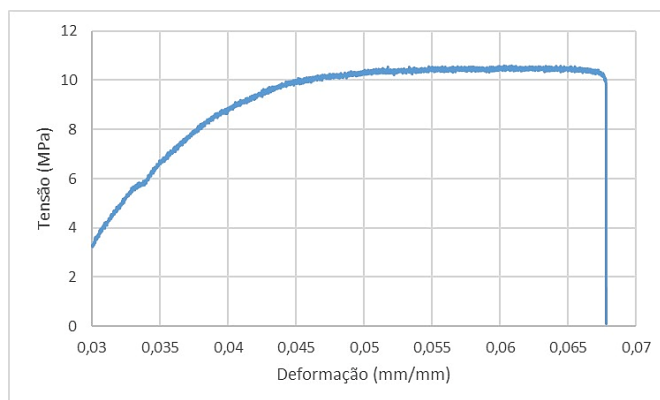


Fonte: Produção do próprio autor.

3.3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

A Figura 6 mostra a curva tensão-deformação representativa do corpo de prova à verde de aço inoxidável austenítico 316L fabricados por MEX/M. A curva mostra comportamento dúctil característico de material com matriz polimérica semicristalina (CANEVAROLO JR., 2006).

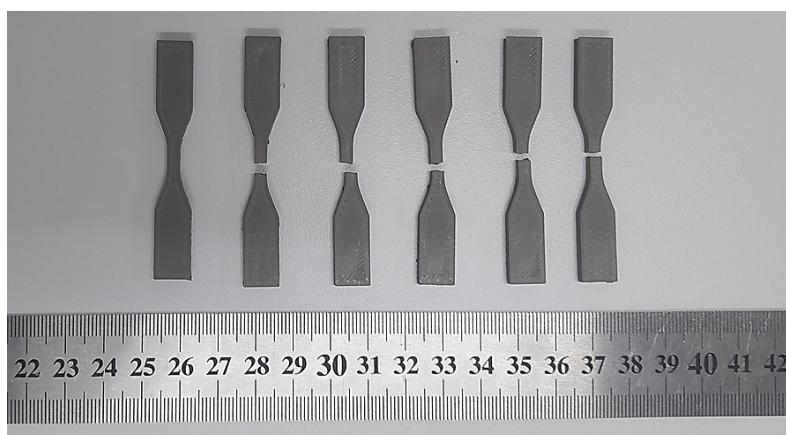
Figura 6 – Curva tensão-deformação representativa obtida do ensaio de tração de CP à verde de aço inoxidável austenítico 316L



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 7 mostra o CP impresso e os cinco CPs dos testes válidos, os quais fraturaram dentro da seção estreita.

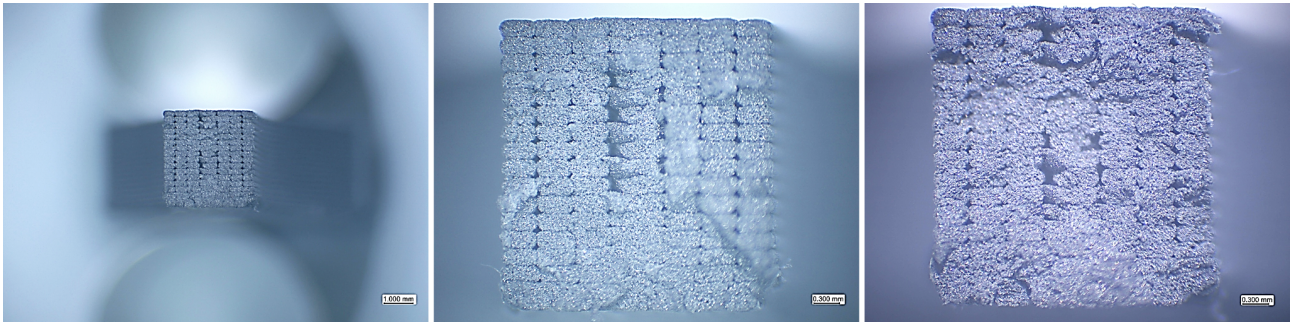
Figura 7 – Corpo de provas (CP) à verde de aço inoxidável austenítico 316L evidenciando os cinco testes válidos, representados pelas fraturas dentro da seção estreita



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 8 mostra imagens de MO da seção transversal fraturada no teste de tração do CP à verde. É possível observar, mesmo utilizando preenchimento de 100% como parâmetro de impressão, que existem vazios entre os cordões elipsoidais extrudados nas camadas e entre camadas, típico de peças impressas pela tecnologia MEX. Apesar da configuração de preenchimento em zigue-zague à $45^\circ/-45^\circ$, percebe-se uma leve tendência de inclinação dos cordões extrudados somente na região central da fratura, indicando que devido a dimensão reduzida do corpo de prova, o número de contornos foi demasiado, não permitindo que a estratégia *raster* fosse impressa na seção estreita, como pode ser visualizado também foto do CP impresso da Figura 5. A fratura mostrou-se frágil, o que pode ser função do arrancamento das partículas metálicas que atuaram como concentradores de tensão no CP.

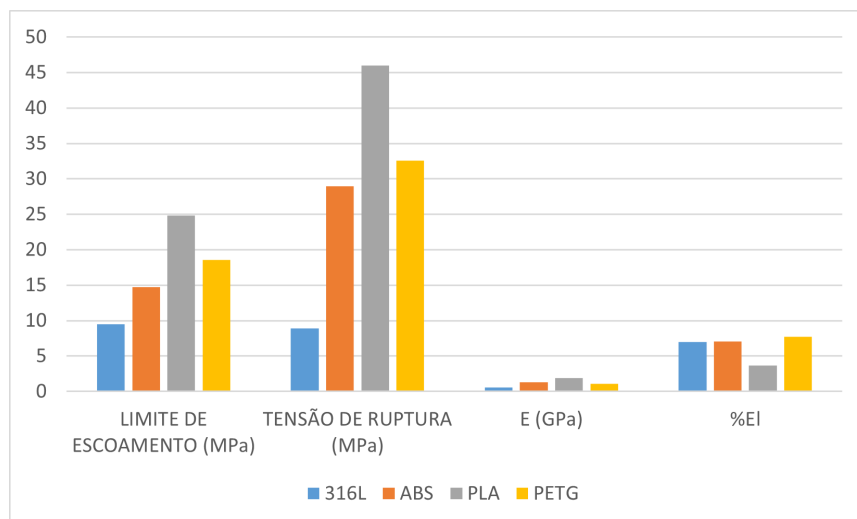
Figura 8 – Fratura da seção estreita do CP de tração à verde



Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados médios do ensaio de tração dos corpos de prova à verde impressos com filamento comercial Ultrafuse® 316L estão apresentados na Figura 9, apresentado limite de escoamento de 9,51 MPa, tensão de ruptura de 8,94 MPa, módulo de elasticidade de 0,57 GPa e alongamento percentual de 6,95. Os resultados obtidos no ensaio de tração com o filamento metálico comercial foram comparados com dados da literatura de corpos de prova impressos com filamentos poliméricos de PLA, ABS e PETG (Polietileno Tereftalato Glicol), Segundo a Norma ASTM D638-14 (2014) (PORTELA, 2017), como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Comparativo resultado do ensaio de tração em corpos de prova fabricados com filamento comercial Ultrafuse® 316L, PLA, ABS e PETG



Fonte: Produção do próprio autor.

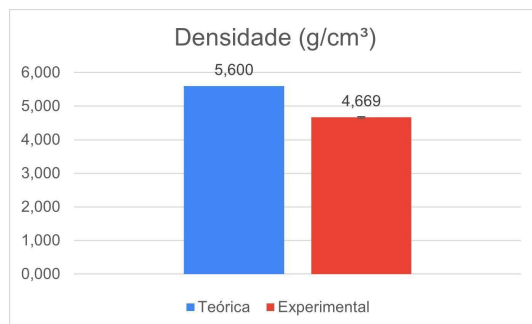
Dentre os materiais, o PLA é o que apresenta o maior limite de escoamento, tensão de ruptura e módulo de elasticidade (E), porém é o que possui a menor taxa de alongamento (%EI). O corpo de prova à verde impresso com filamento comercial Ultrafuse® 316L apresentou valores inferiores de limites de escoamento, tensão de ruptura e módulo de elasticidade, com alongamento similar aos do ABS e do PETG.

3.4. DENSIDADE

Na Figura 10 está apresentada a comparação entre a densidade teórica e a experimental. Pode-se observar que o CP à verde apresentou uma densidade cerca de 16% inferior à densidade teórica do filamento. Esse dado, apesar do

preenchimento de 100% utilizado como parâmetro de impressão, é justificado pela Figura 8, onde é possível visualizar vazios na peça. Esses vazios podem ser minimizados utilizando-se maior taxa de sobreposição dos cordões extrudados adjacentes em torno de 20% a 35% e/ou densidade de preenchimento de 105% (BASF, 2021)

Figura 10 – Comparação da densidade teórica do filamento e experimental do corpo de prova à verde impresso com o filamento Ultrafuse® 316L



Fonte: Produção do próprio autor.

4. CONCLUSÃO

Com esse trabalho é possível concluir que o filamento comercial Ultrafuse® 316L, um compósito metal-polímero, revelou partículas esféricas de aço inoxidável austenítico uniformemente dispersas em sua matriz polimérica.

Apesar do uso de preenchimento de 100% nos parâmetros de impressão, as peças à verde possuem vazios, característicos do processo de fabricação MEX, e consequentemente uma densidade 16% inferior à densidade teórica, que pode ser melhorada alterando a estratégia de deposição com aumento da sobreposição e/ou taxa de preenchimento.

Comparativamente com peças poliméricas, o corpo de prova à verde possui menor rigidez e resistência mecânica, com alongamento similar aos do ABS e PETG.

Este estudo contribui para o aprofundamento do conhecimento sobre o comportamento do material em cada uma das etapas do processo MEX/M, para esse trabalho em específico de peças à verde.

5. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638 - 14**: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics1. West Conshohocken: ASTM, 2022.

ARMSTRONG, M.; MEHRABI, H.; NAVEED, N. An overview of modern metal additive manufacturing technology. **Journal of Manufacturing Processes**, 84, p. 1001–1029, 2022.

BASF. **Ultrafuse ® metal filaments user guidelines for 3D printing metal parts**. 2021. Disponível em: https://forwardam.com/wp-content/uploads/2021/04/UserGuidelines_2021_03_29.pdf. Acesso em: 01 jul. 2025.

CANEVAROLO JR., V. **Ciência dos polímeros : um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber, 2006.

ELHAZMIRI, B. et al. The role of additive manufacturing in industry 4.0: An exploration of different business models. **Sustainable Operations and Computers**, 3, p. 317–329, 2022.

MARKET RESEARCH FUTURE. **3D Printing Metals Market Research Report Information By Material (Titanium, Aluminum, Stainless Steel, Nickel, Inconel, and others), By Technology (Vat Photopolymerization, Material Extrusion, Sheet Lamination, Binder Jetting, Material Jetting, and others), By Application (Aerospace & Defense, Automotive, Healthcare, Building & Construction, Consumer Electronics, and others), And By Region (North America, Europe, Asia-Pacific, And Rest Of The World) – Market Forecast Till 2032**. 2024. Disponível em: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/3d-printing-metal-market-1834>. Acesso em: 20 jan. 2025.

PORTELA, S. **Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D**. 2017. Disponível em: https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/?srsltid=AfmBOoqqKrfPAfoh4Le3ARdnxTGgOZnG54_ztieJ81MnTCSbV1rTeUI. Acesso em: 7 nov. 2025.

SÆTERBØ, M., SOLVANG, W. D. Evaluating the cost competitiveness of metal additive manufacturing – A case study with metal material extrusion, **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, 45, p. 113-124, 2023.

SUWANPREECHA, C.; MANONUKUL, A. A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding. **Metals**, 12, p. 429-485, 2022.

ZHANG, Y., WU, L., GUO, X. et al. Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. **J. of Materials Engineering and Performance** 27, p. 1–13, 2018.

6. AGRADECIMENTOS

À FAPES pela bolsa e financiamento pelo edital 21/2023 - Mulheres na ciência – TO: 762/2024, à UFES, à CAPES, ao EMBRAPPII - DELA21, à ArcelorMittal com o termo de cooperação técnica 09/2024, ao Laboratório de Tecnologia Mecânica (LabTecMec) por tornarem esse projeto possível. E, ao LabTecMec por patrocinar o evento.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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