

Manufatura aditiva de metais via extrusão

Gisele Duarte Caboclo Antolin ^{1*} 

Mauricio Quelhas Antolin ² 

Bruno Sousa da Cunha ³ 

Isabella De Miranda Francisco Pereira ¹ 

Suzane de Sant'Ana Oliveira ⁴ 

Resumo

O objetivo deste trabalho é a fabricação de peças metálicas de aço inoxidável 316L (SS316L) via manufatura aditiva, através da técnica de extrusão de materiais (MEX) e a avaliação de como a velocidade de impressão afeta as propriedades deste material. Para isso, utilizou-se velocidades de 15 mm/s e 50 mm/s. As peças fabricadas passaram por testes para avaliar a rugosidade, a microdureza e propriedades morfológicas. Os resultados mostraram a viabilidade de produção deste material por esta técnica, a formação de uma microestrutura austenítica, além de evidenciarem que velocidades mais baixas proporcionaram a redução de porosidade nas amostras. Estas porosidades são oriundas do processo de fabricação e podem afetar negativamente as propriedades mecânicas destes materiais, o que demonstra que o procedimento adotado ainda precisa ser otimizado.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Metais; Extrusão; Velocidade de impressão.

Additive manufacturing of metals via extrusion

Abstract

The objective of this work is to manufacture 316L stainless steel (SS316L) metal parts via additive manufacturing, using the material extrusion (MEX) technique, and to evaluate how printing speed affects the properties of this material. For this purpose, speeds of 15 mm/s and 50 mm/s were used. The manufactured parts underwent tests to evaluate roughness, microhardness, and morphological properties. The results showed the feasibility of producing this material using this technique and the formation of an austenitic microstructure, in addition to demonstrating that lower speeds reduced porosity in the samples. This porosity is caused by the manufacturing process and can negatively affect the mechanical properties of these materials, which shows that the procedure adopted still needs to be optimized.

Keywords: Additive manufacturing; Metals; Extrusion; Printing speed.

1 Introdução

A grande demanda por peças metálicas estimulou o crescimento do setor ao longo dos séculos. Porém, os métodos de produção desta classe de materiais ainda são baseados em técnicas que não são ecologicamente sustentáveis e econômicas. Desta forma, a fabricação de metais de forma mais sustentável constitui-se em uma das principais fronteiras da ciência dos materiais [1].

Wagner et al. [2] apontam que, para reduzir as emissões de CO₂ durante o processo de produção de materiais metálicos, devem ser propostas rotas alternativas, que estejam em consonância com os objetivos de desenvolvimento sustentável. Uma possibilidade seria a manufatura aditiva, em especial às técnicas relacionadas à impressão 3D, por serem economicamente atrativas [3,4].

¹Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Estadual do Rio de Janeiro – UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

²Departamento de Computação, Universidade Estadual do Rio de Janeiro – UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³Departamento de Naval e Pesca, Universidade Estadual do Rio de Janeiro – UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

⁴Brastempera Beneficiamento de Metais LTDA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

*Autor correspondente: gisele.antolin@uerj.br

E-mails: mauricio.antolin@uerj.br; cunhamecanica@outlook.com; bellamfpereira@gmail.com; susan.oliver@hotmail.com



Dentre as técnicas de impressão 3D utilizadas para a fabricação de peças metálicas têm-se aquelas que envolvem a utilização de feixe de alta energia (Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Fusão Seletiva a Laser (SLM), Fusão por Feixe de Elétrons (EBM) e Sinterização direta de metal a laser (DMLS) [5]), as que abrangem extrusão (FDM) e modelagem por injeção (Modelagem por Injeção de Metal - MIM) [6,7].

Os avanços dessas técnicas têm possibilitado a fabricação de ligas de Ti, Ni, Cu e aços inoxidáveis [8]. Todavia, os altos custos de equipamentos e materiais, ainda impossibilitam o seu emprego em larga escala. Como exemplo, cita-se os grandes investimentos necessários em pós-metálicos, maquinaria e manutenção, limitando as suas aplicações principalmente às indústrias de elevado valor agregado [9-11].

Nesse cenário, com o intuito de promover o barateamento deste recurso, diversas iniciativas de têm sido reportadas. Dentre elas, tem ganhado destaque a fabricação de filamentos metálicos, sobretudo na Europa e nos Estados Unidos [12-14], visando a fabricação de metais via extrusão, através da técnica FDM.

A fabricação deste filamento envolve como matéria-prima uma mistura de pós-metálicos e um ligante polimérico, sendo este último constituído por três componentes diferentes: um ligante principal (polioximetileno (POM), parafina de cera, Elastômero termoplástico (TPE) ou polietilenoglicol (PEG)) e um aglutinante de base como Polipropileno (PP), Polietileno de Baixa Densidade (LDPE) ou Poliolefina Enxertada, e, em alguns casos também aditivos como ácido esteárico.

O principal tipo de extrusão de metais é baseado na extrusão de filamento. Neste sistema, o filamento (parte verde, constituída de polímero e metal) é empurrado em direção a um bloco aquecido, onde é derretido e depositado sobre uma mesa aquecida, onde será depositado camada por camada até formar o objeto. Durante esta operação, o polímero é derretido como aglutinante, mas as partículas de metal permanecem sólidas. Posteriormente, o ligante usado é removido termicamente, obtendo-se as partes marrons. O ligante de polímero restante nas partes marrons evita a propagação das partículas metálicas e preservam a forma das peças. Por fim, o material é sinterizado para fundir as partículas de metal para formar a peça.

Contudo, a utilização deste processo ainda está quase que exclusivamente confinada às indústrias, que apenas empregam tecnologias e parâmetros já aplicados em outros países, deixando o nosso país carente de estudos na área e a longo prazo dependente desta tecnologia, uma vez que o foco destas empresas não é a pesquisa.

Diante desse contexto, este trabalho teve por objetivo implementar a rota de fabricação de peças metálicas via impressão 3D em nossa universidade, utilizando para isso a análise de peças metálicas de aço inox 316L (SS316L), obtidas variando-se a velocidade de impressão das peças fabricadas. Com isso, observa-se que através desta pesquisa será possível iniciar um caminho de produção de peças

metálicas que coloque o Brasil no mapa de países com tecnologia e recursos para o desenvolvimento sustentável.

2 Materiais e métodos

Inicialmente a peça a ser impressa foi desenhada em CAD e posteriormente levada ao software Ultimaker CURA, de onde obtemos um arquivo digital com dimensões iguais a 15x10x5 mm (comprimento, largura e espessura) e massa de 7g cada (Figura 1).

O filamento utilizado como matéria-prima neste trabalho foi adquirido da empresa BASF, com espessura de 1,75mm (Figura 2a). A impressão das peças foi realizada em uma impressora H5 da Gtmax (Figura 2b), pertencente ao Laboratório de Modelagem e Visualização da UERJ-ZO. Para impressão da peça verde foram utilizados os seguintes parâmetros de fabricação: temperatura da mesa 100°C, temperatura do bico 250 °C, com 100% de preenchimento, altura da camada igual a 0,1mm e velocidade de extrusão 15 e 50 mm/s. Destaca-se que estas velocidades foram escolhidas em função dos parâmetros propostos pelo fabricante do filamento [15].

Neste processo, foram fabricados 3 blocos retangulares para cada série de amostras, a partir do arquivo digital. Todas as amostras foram impressas com orientação idêntica (eixos de impressão e direção das camadas), posteriormente pesadas e tiveram suas medidas verificadas após seu resfriamento completo. Feito isso, foram marcadas a laser para evitar trocas nas etapas posteriores (peça verde).

Após a impressão da parte verde na impressora 3D, o polímero ligante foi removido, em um processo chamado de debinding ou desaglutinação catalítica. Neste processo, um ácido gasoso reage com o ligante polimérico, extraindo este da matriz. Este processo foi realizado pela empresa MIPATECH, sendo os blocos aquecidos em um forno, que continha uma atmosfera com $\text{HNO}_3 > 98\%$, a 120 °C. A alimentação de ácido nítrico utilizada foi de 30 ml/h. O processo de desaglutinação termina quando uma perda mínima de desaglutinante de 10,5% é atingida (aproximadamente 1h) Após esse processo a peça passa a ser chamada de peça marrom.

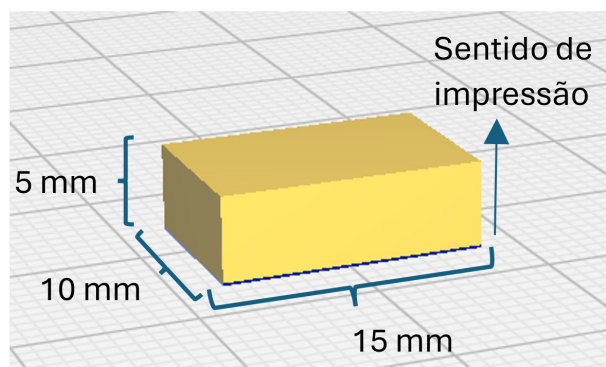


Figura 1. Dimensões das peças no fatiador Ultimaker CURA.

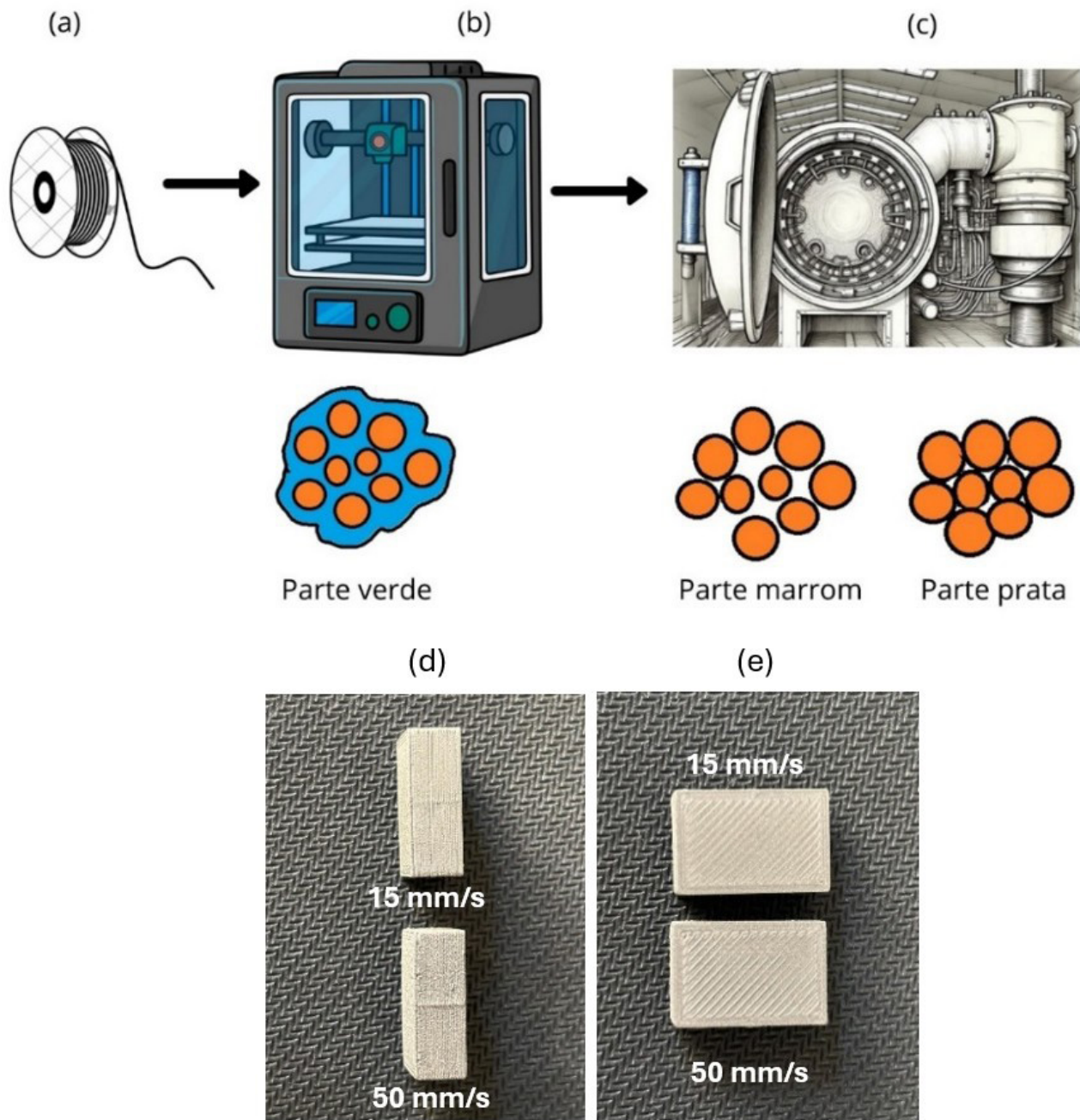


Figura 2. (a-c) Esquema ilustrativo do processo de fabricação das peças; (d) vista lateral das amostras; (e) vista frontal das amostras.

A última etapa de processamento foi a sinterização (peça prata), que é essencial para diminuir a porosidade das peças, através da adesão e crescimento de partículas adjacentes. Este processo foi realizado no mesmo forno do processo anterior em uma atmosfera de Ar, seguindo os seguintes estágios para dar origem a chamada peça prata (Figura 2c).

1. Inicialmente o sistema foi aquecido a partir da temperatura ambiente, com uma taxa de 5 K/min até a temperatura de 600 °C, manutenção nesta temperatura por 1h;

2. Transcorrida a etapa anterior, aqueceu-se o sistema a partir de 600 °C – com uma taxa de 5K/min até 1380 °C, sendo esta temperatura mantida por 3h;
3. Por último, as amostras foram resfriadas no forno.

Salienta-se que o ciclo térmico adotado foi o recomendado pela empresa BASF [15] e tem sido adotado por diversos autores [16].

Posteriormente, as amostras foram medidas com um auxílio de um paquímetro digital, da marca It blue modelo

LE-6002, para verificar alterações dimensionais nas peças e pesadas em uma balança analítica da marca Shimadzu modelo Marte. Esse procedimento foi realizado após a obtenção da peça verde e repetido após a obtenção da peça prata.

Análises de microscopia foram realizadas no Laboratório Didático de Metalurgia da UERJ-ZO (microscopia óptica) e no Instituto Militar de Engenharia (Microscopia Eletrônica de Varredura). Para isso as amostras foram lixadas utilizando lixas de #400 a #3000, seguidas de polimento com pasta de diamante de 3 e 1 micron (por 5min cada).

Posteriormente, as amostras passaram por diversos ataques químicos visando a realização de análise microestrutural. A Tabela 1 mostra os ataques propostos para as amostras. Inicialmente, foi realizado ataque das amostras com reagente Villela (100 ml de Álcool etílico, 5ml de Ácido clorídrico e 2g de Ácido pícrico) de 2 a 5 min [17], contudo este ataque não revelou a microestrutura das amostras. Depois, realizou-se ataque eletrolítico utilizando solução de ácido oxálico a 10% e tensão de 6V por 3min nas amostras, que revelou a microestrutura das amostras da série 1, mas que não surtiu efeito nas amostras da série 2. Assim, investigou-se um ataque alternativo para as amostras da série 2, que somente foram atacadas com o uso da solução glicerégia (10 ml de ácido nítrico, 10 ml de ácido acético, 15 ml de ácido clorídrico e 3 gotas de glicerina) por 15s.

Complementarmente a esta análise, foram realizadas medidas de rugosidade no perfilômetro New View 7100 Profilometer (Zygo Co, Middlefield, CT). Por último, foram realizadas análises de microdureza Vickers (HV) em um equipamento Zwick, modelo MI-01 e realizadas análises qualitativas e quantitativas da porosidade utilizando o software ImageJ, após o processo de sinterização das amostras.

3 Resultados e discussões

3.1 Caracterização da peça verde

Os resultados referentes as medidas de peso e massa das amostras podem ser observadas na Tabela 2. Observa-se uma discrepância entre os valores fornecidos pelo arquivo digital e as medidas obtidas no material impresso. Variações dimensionais em peças produzidas em 3D se devem a inúmeros fatores, dentre os quais destaca-se as propriedades térmicas do material, que podem ocasionar aumento ou

redução em função da temperatura de processamento e resfriamento, e podem afetar as dimensões finais da peça. Ao analisar o percentual de variação das medidas, podemos perceber que a maioria das medidas efetivas está abaixo da dimensão nominal (fornecida pelo arquivo de impressão), indicando que a peça tende a ser ligeiramente menor do que o especificado.

Conforme extensamente reportado na literatura [18], a qualidade superficial de uma peça fabricada por FDM é afetada pelos parâmetros do processo de impressão. Na Figura 3, podemos observar que a rugosidade média Ra, ou seja, a média absoluta dos picos e alturas do perfil dos vales ao longo de um comprimento de amostragem, é relativamente baixa para as amostras fabricadas para ambas as velocidades de impressão [19].

Além disso, a Figura 3 mostra as morfologias das superfícies das amostras obtidas com o rugosímetro. A escala de cores indica a presença das irregularidades na superfície na forma de reentrâncias ou saliências. A cor vermelha indica a presença de picos e cor azul indica a presença de cavidades na superfície. As amostras em ambas as séries foram construídas a partir da camada A (primeira camada) e foram finalizadas na camada B (última camada). Como pode ser observado, nas duas séries de amostras a rugosidade do lado A foi superior ao lado B. Isso se deve ao fato de que amostras fabricadas por impressão 3D possuem rugosidade maior nas primeiras camadas que nas últimas, pois, à medida que as camadas vão sendo depositadas umas sobre as outras, cria-se um melhor substrato que a superfície da mesa, o que atenua a rugosidade das camadas subsequentes.

Nas Figuras 4a e 4b podemos observar imagens do filamento utilizado para a impressão das peças.

As peças impressas com este filamento podem ser observadas na imagem mostrada na Figura 5. Nas Figuras 5a e 5b observa-se que as partículas de aço inoxidável estão bem ligadas e cobertas pela matriz polímero. Conforme apontado por Sadaf et al. [20], este tipo de morfologia de ligação na parte verde é necessário para operar o processamento de desligação e sinterização sem perturbação na forma das peças impressas.

Como pode ser observado nas Figuras 5a e 5b, as amostras são compostas de uma matriz composta de finas partículas de metal (fase escura) e um polímero (fase clara), anteriormente descrito. Além disso, observa-se a existência

Tabela 1. Ataques químicos empregados

Série	Ataque eletrolítico	Villela	Glicerégia
1	Atacou	Não Atacou	Atacou
2	Não Atacou	Não Atacou	Atacou

Tabela 2. Valores medidos para massa e dimensões das peças fabricadas

Série	Massa (g)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Densidade (g/cm ³)
1	6,39±0,01	11,93±0,06	6,23±0,12	17,80±0,00	4,83
2	6,39±0,01	11,90±0,07	6,23±0,12	17,80±0,00	4,84

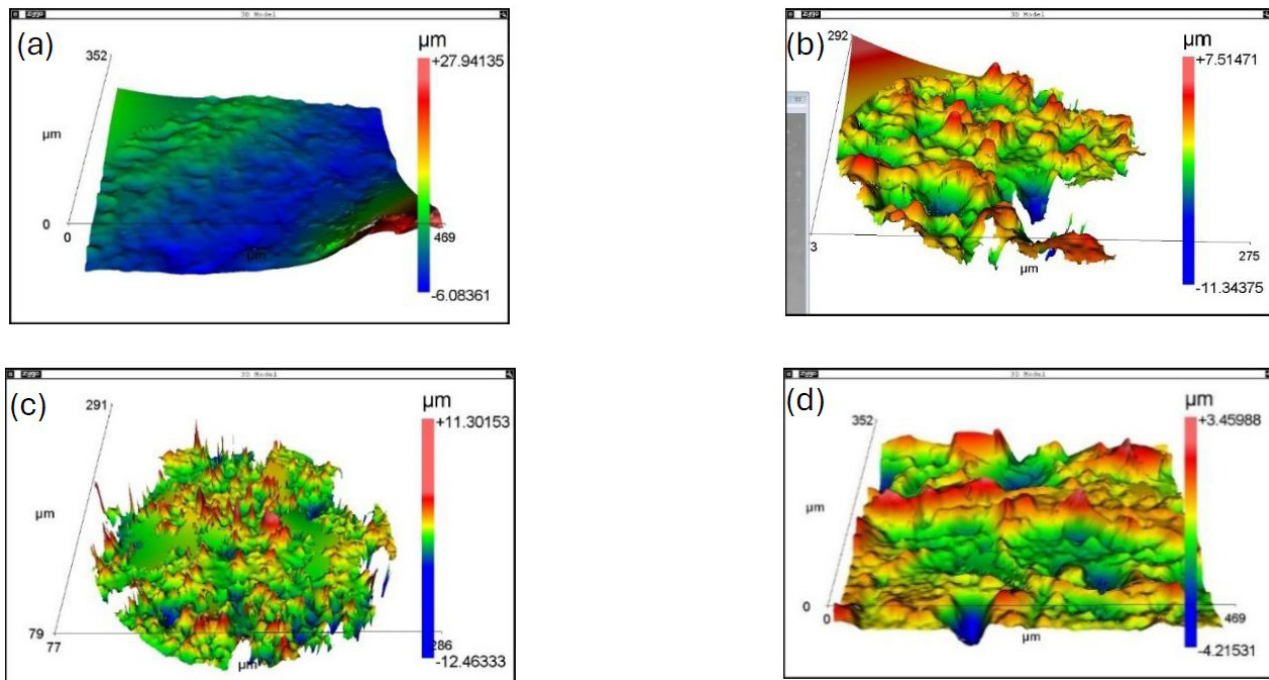


Figura 3. Análises de rugosidade das amostras da Série 1 – (a) lado A e (b) lado B e da Série 2 – (c) Lado A e (d) lado B.

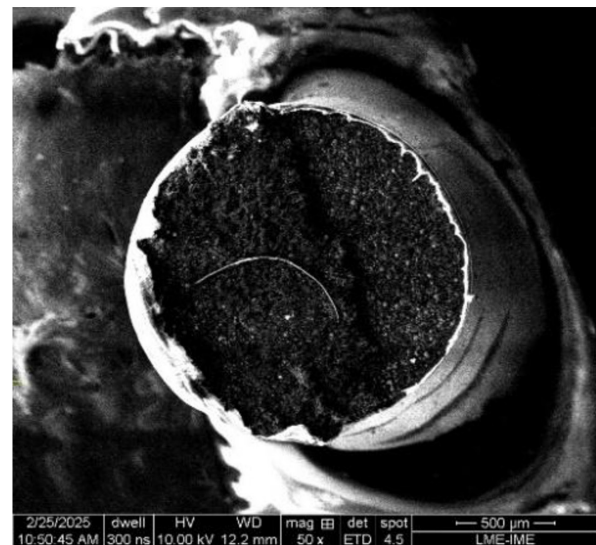
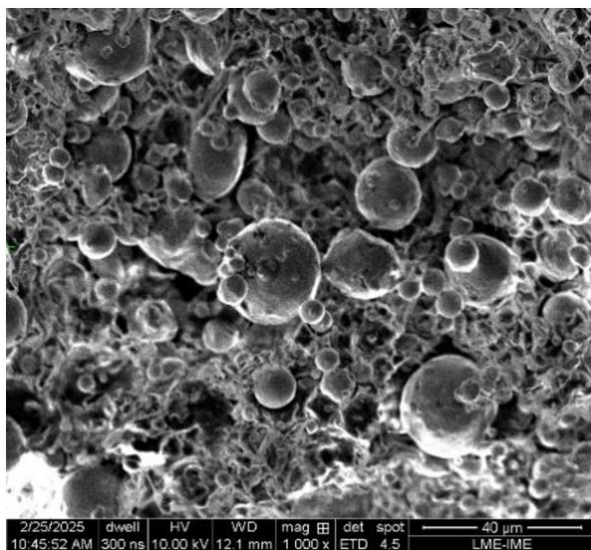


Figura 4. Filamento utilizado.

de vazios nos materiais, que são esperados serem eliminados durante o processo de sinterização.

Em relação a microestrutura da superfície lateral das amostras, Figuras 5c e 5d, a despeito da boa adesão entre as camadas, verifica-se a existência de irregularidades no interior de uma mesma camada, além de ser notório a identificação de depleção entre camadas adjacentes (falta de fusão entre as camadas), e, delaminação, em decorrência de partículas não sinterizadas entre o perímetro e o preenchimento, que,

infelizmente são desvantagens apresentadas pelo processo de impressão 3D via FDM [21].

Além disso, é possível observar que a redução da velocidade de impressão favorece a homogeneidade das camadas fabricadas, fato que também pôde ser observado na imagem da Figura 2d.

É importante notar que, a existência de vazios e porosidade na estrutura do material, pode ocasionar uma degradação das propriedades mecânicas das peças fabricadas, sendo desta forma, desejável alta densificação ao longo do

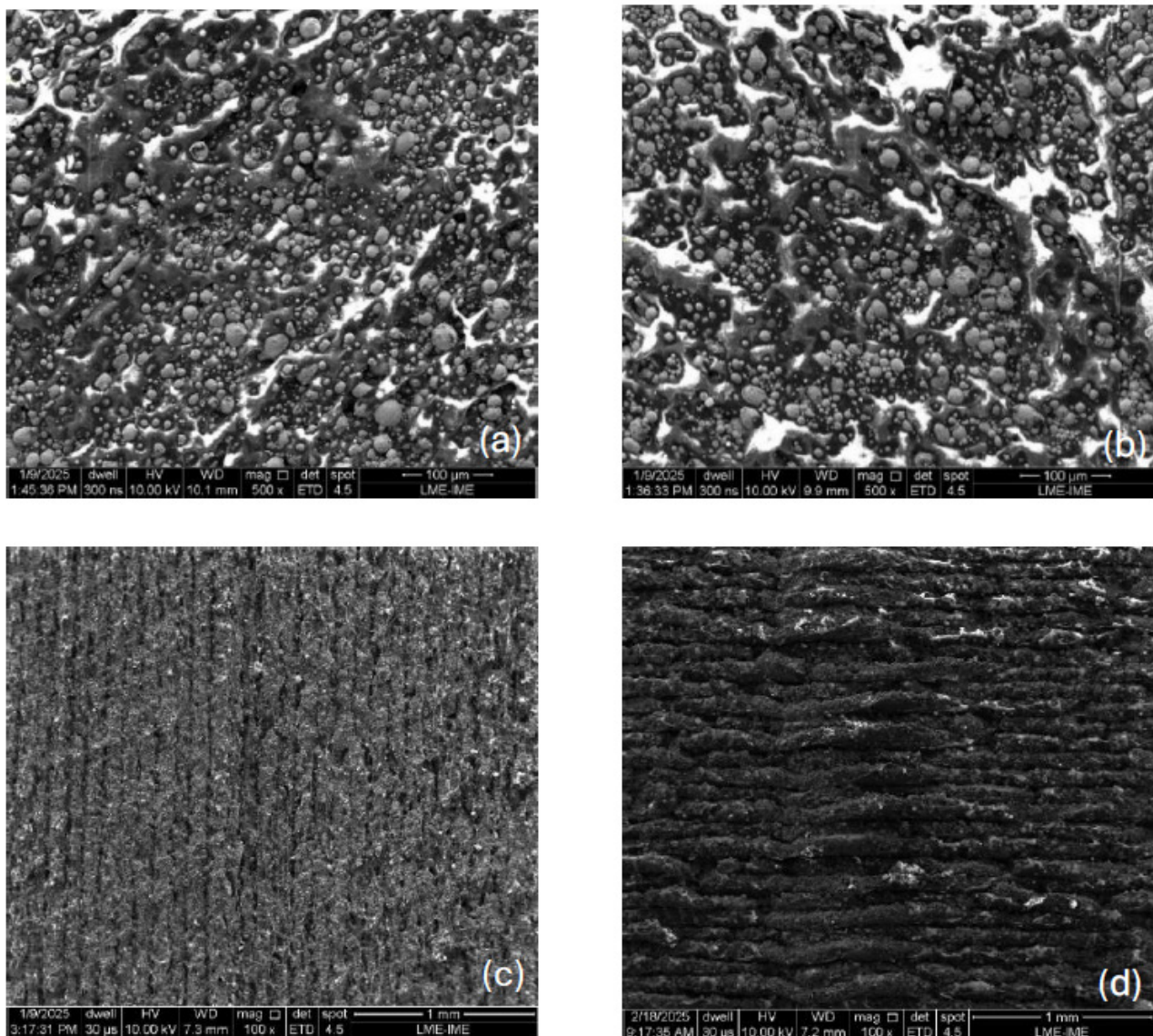


Figura 5. Superfície das amostras impressas: (a) Parte superior de 15 mm/s; (b) 50 mm/s. Lateral das amostras impressas: (c) Lateral amostra de 15 mm/s; (d) 50 mm/s.

material. Cabe destacar que a adesão/coesão entre duas camadas subsequentes no processo de fabricação FDM, podem ser ativadas pela difusão de cadeias poliméricas através da interface. Este fenômeno de coalescência é impulsionado pelo fluxo viscoso e é influenciado pela viscosidade, temperatura, tensão superficial, geometria da estrada, e incompatibilidade térmica entre o material depositado [22].

3.2 Peça sinterizada (peça prata)

A Tabela 3 mostra os valores obtidos para as dimensões e massa das peças após os processos de debinding e sinterização. Comparando os valores das Tabelas 2 e 3, os processos de debinding e sinterização conduzem a uma redução do peso e das medidas das peças, que implica em um aumento da densidade das amostras, a qual podemos atribuir a redução

dos vazios internos. Observa-se uma redução das dimensões após este procedimento de aproximadamente 12% em todas as dimensões.

Contudo, conforme podemos observar, os valores encontrados para as densidades das amostras de ambas as séries estão muito abaixo do valor da densidade do ferro puro, o que sugere que esta etapa ainda precisa ser otimizada. A despeito disto, os valores encontrados estão próximos a outros estudos que fabricaram amostras em condições semelhantes [23].

Posteriormente, as amostras foram preparadas para a realização de análise microestrutural. Destaca-se que apenas a amostra da série 1 foi atacada com ácido oxálico, mas tal procedimento não revelou a microestrutura da amostra da série 2. Isso provavelmente se deve a natureza do ataque eletrolítico, no qual uma corrente flui pela amostra. Desta

forma, uma amostra muito porosa pode dificultar a adoção deste procedimento. Por último, após extensa pesquisa, a microestrutura da série 2 foi revelada com o uso de um ataque com glicerégia, conforme proposto por Barbosa [24] em recente trabalho.

Em ambas as amostras (Figuras 6 e 7) observa-se a microestrutura austenítica e inúmeros vazios (poros), principalmente na região de contorno de grão. Conforme apontado por Raza et al. [25], isso pode estar associado ao uso de argônio utilizado no processo de sinterização. De acordo com o autor, o gás argônio fica preso entre os grãos durante

o processo de sinterização, resultando em espaços vazios entre os grãos, acarretando porosidade na peça metálica.

Destaca-se ainda, que a escolha por trabalhar com atmosfera de argônio ao invés de vácuo se deve a facilidade de operação de equipamentos e ductilidade das peças fabricadas com o uso da primeira atmosfera ante a segunda [25]. Ademais, foram observados alguns pites de corrosão no interior dos grãos e diversas maclas associadas a microestrutura austenítica.

Cabe destacar que, outros causadores de porosidades podem estar associados ao aparecimento de porosidade,

Tabela 3. valores medidos para massa e dimensões das peças após a sinterização

Série	Massa (g)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Densidade (g/cm³)	Microdureza (HV)	Porosidade (%)
1	5,18±0,02	10,42±0,04	5,43±0,17	15,76±0,32	5,81	129,6±13,37	10,57
2	4,98±0,02	10,41±0,06	5,43±0,04	15,76±0,09	5,60	116±13,71	12,38

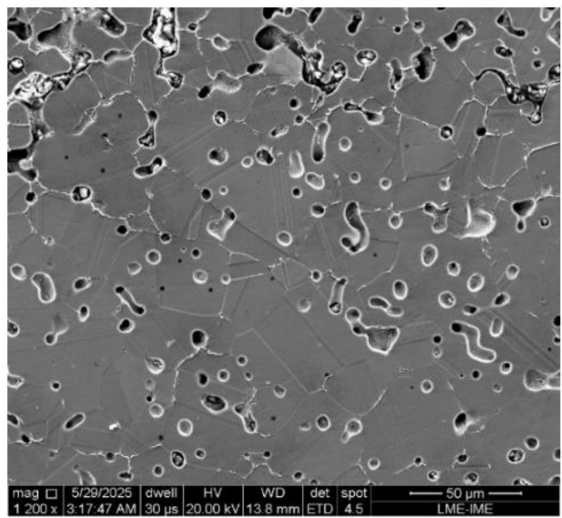


Figura 6. Análise de MEV da amostra fabricada com 15 mm/s (ataque: ácido oxálico).

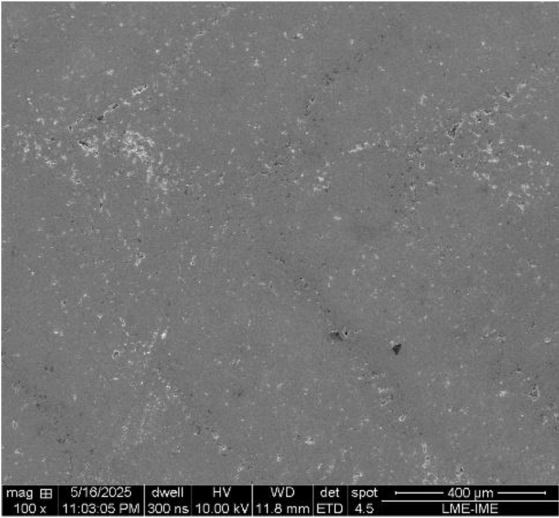
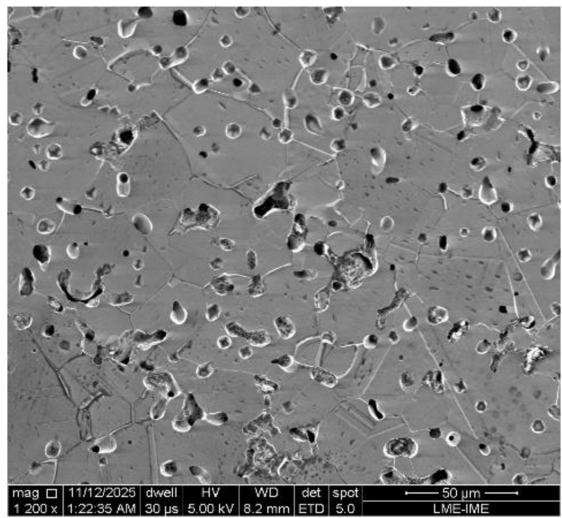
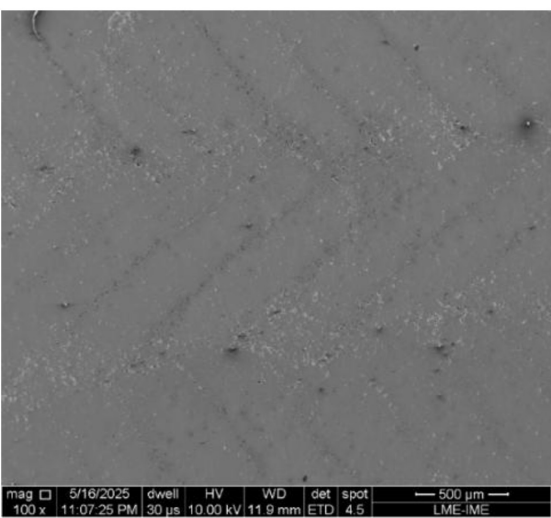


Figura 7. Análise de MEV da amostra fabricada com 50 mm/s (ataque: glicerégia).

sendo necessário estudos mais aprofundados para que todas as variáveis que envolvem a formação deste defeito sejam isoladas [26].

Essencialmente, a sinterização promove a contração do material, pois átomos vizinhos tendem a se unir, diminuindo os espaços vazios. Contudo, as imagens das Figuras 6 e 7 mostram que o processo de sinterização na presença de Argônio não foi efetivo. Uma solução é a utilização de vácuo, conforme apontado por Raza et al. [25].

Os resultados observados para a morfologia das amostras estão em concordância com os encontrados para as medidas de densidade, indicando que de fato a etapa de sinterização ainda precisa de ajustes.

Além disso, foi observado para ambas as velocidades a presença de vazios entre camadas, um efeito associado a sobreposição das camadas, que é inerente do processo FDM, conforme ilustra a imagem da amostra da série 1 (Figura 6b) e da série 2 (Figura 7b). Contudo, era esperado que após o processo de sinterização, tais vazios não fossem tão evidentes, mostrando que mesmo após a sinterização há uma falta de adesão entre as camadas que é inerente do processo utilizado.

A análise da porosidade mostrou que velocidades maiores de impressão aumentam a porosidade das amostras. Tal efeito pode impactar a microestrutura dos metais principalmente ao introduzir descontinuidades físicas no material, o que, por sua vez, influencia a distribuição de fases e os contornos de grão [27,28].

Em ambas as séries de amostras, quando observadas em sua vista frontal, observou-se que poros que apresentavam uma morfologia esférica, porém também podem ser observados alguns poros que apresentaram uma morfologia poligonal ou alongada, principalmente na região dos contornos de grão (porosidade intergranular).

A porosidade em peças metálicas pode ser dividida em microporosidade ($<50\mu\text{m}$) e macroporosidade ($>50\mu\text{m}$). Mainenti [29] destaca que as microporosidades não apresentam um padrão em sua forma e ocorrem devido à contração

do metal durante o processo de sinterização, enquanto os poros gerados pela dissolução dos gases são maiores (macroporosidades) e são caracterizados por terem uma configuração esférica. Desta forma, nota-se que ambos os mecanismos de formação são atuantes em nossas amostras. Contudo, conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 8, a ordem de grandeza das porosidades indica que estas se classificam como microporosidades [30], o que indica que o principal agente contribuidor para a porosidade em nosso estudo se deve à contração volumétrica do metal.

Ademais, a existência de porosidade pode afetar diversas propriedades mecânicas dos materiais, dentre elas a microdureza. Para avaliar esta relação, foram realizadas medidas de microdureza nas amostras (Tabela 3). É possível observar que o alto desvio padrão associado impede que sejam feitas afirmações sobre o efeito da variação da velocidade nesta propriedade mecânica. Contudo, destaca-se que os valores encontrados estão condizentes com os observados na literatura [23] e que o alto desvio padrão pode estar associada a elevada porosidade das amostras. No entanto, Yusuf et al. [30] apontam que quanto maior o percentual volumétrico de porosidade, menor será a microdureza do material.

Destaca-se que para uma melhor avaliação da relação entre porosidade-densidade-propriedades mecânicas, seria necessária a realização de análises complementares, como a medida de densidade relativa. Contudo, como as amostras foram embutidas durante o preparo metalográfico, esta relação não pode ser realizada neste trabalho.

4 Conclusão

A fabricação de peças de aço SS316l pela técnica FDM é viável, porém devem ser observadas algumas questões a fim de melhorar os resultados obtidos. Primeiro, foi observado que a impressão de peças com velocidade

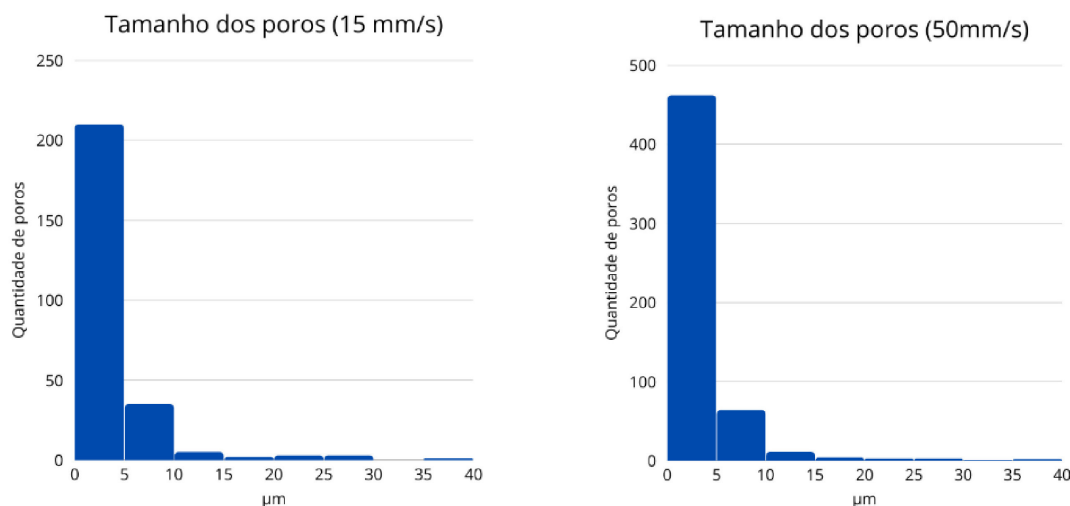


Figura 8. Análise do diâmetro médio dos poros nas amostras.

mais baixa é preferível, pois essa reduz a quantidade de porosidade existente no material. O formato e tamanho das porosidades sugerem que estas são predominantemente microporosidades, que podem ter surgido, sobretudo durante o processo de sinterização. Contudo, o estudo não conseguiu traçar a influência da porosidade na microdureza.

Outro ponto a se destacar é que vazios entre as camadas sobrepostas, inerentes da técnica de fabricação,

não são plenamente eliminados após o processo de sinterização, e podem reduzir as propriedades finais dos materiais. Além disso, sugere-se em trabalhos futuros investigar a substituição da atmosfera de Argônio por vácuo, de forma a reduzir os vazios existentes nestas peças e uma avaliação abrangente sobre a formação dos poros nas amostras abarcando de forma independente cada etapa do processo de fabricação.

Referências

- 1 Saxena P, Pagone E, Salonitis K, Jolly MR. Sustainability metrics for rapid manufacturing of the sand casting moulds: a multi-criteria decision-making algorithm-based approach. *Journal of Cleaner Production*. 2021;311:127532.
- 2 Wagner MA, Engel J, Hadian A, Clemens F, Rodriguez-Arbaizar M, Carreño-Morelli E, et al. Filament extrusion-based additive manufacturing of 316L stainless steel: effects of sintering conditions on the microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*. 2022;59:103117.
- 3 Bahrini I, Rivette M, Rechia A, Siadat A, Elmesbahi A. Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;97(1-4):147-161.
- 4 Gomes JFB, Witgen F. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas. *Rev Tecnol Fortaleza*. 2020;41(1):1-16.
- 5 Galantucci LM, Pellegrini A, Guerra MG, Lavecchia F 3rd. Printing of parts using metal extrusion: an overview of shaping debinding and sintering technology. *Adv Technol Mater*. 2022;47(1):25-32.
- 6 Wermuth DP, Paim TC, Bertaco I, Zanattelli C, Naasani LIS, Slaviero M, et al. Mechanical properties, in vitro and in vivo biocompatibility analysis of pure iron porous implant produced by metal injection molding: a new eco-friendly feedstock from natural rubber (*Hevea brasiliensis*). *Materials Science and Engineering C*. 2021;131:112513.
- 7 Ramkumar PL, Rijwani T. Additive manufacturing of metals and ceramics using hybrid fused filament fabrication. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022;44:429.
- 8 Suwanpreecha C, Manonukul A. A review on material extrusion additive manufacturing of metal and how it compares with metal injection moulding. *Metals*. 2022;12(5):903.
- 9 Xu C, Lebel L, Therriault D, Bouchemit A, L'Espérance G. 3D printing of metallic structures from a green ink. In: *Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress*; 2018 May 27-30; Toronto, ON, Canada. Ottawa: CSME; 2018.
- 10 Hosseinimehr S, Mohammadpanah A, Benoit MJ, Ester DF, Zang A, Martinez M, et al. Defect evolution and mitigation in metal extrusion additive manufacturing: from deposition to sintering. *Journal of Materials Processing Technology*. 2024;329:118474.
- 11 Tosto C, Tirillò J, Sarasini F, Cicala G. Hybrid metal/polymer filaments for fused filament fabrication (FFF) to print metal parts. *Applied Sciences*. 2021;11(4):1444.
- 12 Kurose T, Abe Y, Santos MVA, Kanaya Y, Ishigami A, Tanaka S, et al. Influence of the layer directions on the properties of 316L stainless steel parts fabricated through fused deposition of metals. *Materials*. 2020;13(11):2493.
- 13 Gonzalez-Gutierrez J, Arbeiter F, Schlauf T, Kukla C, Holzer C. Tensile properties of sintered 17-4PH stainless steel fabricated by material extrusion additive manufacturing. *Materials Letters*. 2019;248:165-168.
- 14 Thompson Y, Gonzalez-Gutierrez J, Kukla C, Felfer P. Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel. *Additive Manufacturing*. 2019;30:100861.
- 15 Additiva 3D®. Ultrafuse 316L Technical data sheet. Porto Alegre; 2021 [acesso em 4 ago. 2025]. Disponível em: <https://www.additiva3d.com.br/ultrafuse-316l>
- 16 Zaitceva M, Sotov A, Popovich A, Sufiarov V. Stainless steel 316L Fabricated by fused deposition modeling process: microstructure, geometrical and mechanical properties. *J Manuf Mater Process*. 2024;8(6):259.
- 17 Montuori RAM, Figueira G, Cataldi TP, Alcântara NG, Bolfarini C, Coelho RT, et al. Manufatura aditiva de aço inoxidável 316L por Fusão Seletiva a Laser. *Soldagem e Inspeção*. 2020;25:e2530.
- 18 Zhai C, Wang J, Tu Y, Chang G, Ren X, Ding C. Robust optimization of 3D printing process parameters considering process stability and production efficiency. *Additive Manufacturing*. 2023;71:103588.

- 19 Neuhaus B, Idris MK, Naderi P, El-Hajj Y, Grau G. Low-roughness 3D-printed surfaces by ironing for the integration with printed electronics. *Advanced Engineering Materials*. 2024;26(3):2301178.
- 20 Sadaf M, Bragaglia M, Nanni F. A simple route for additive manufacturing of 316L stainless steel via fused filament fabrication. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;67:141-150.
- 21 Baligheid SM, Chandra BT, Girish SM. Fused filament fabrication of Stainless Steel 316L: investigation on effect of printing parameters on microstructural and mechanical strength of sintered part. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2024;14(6):15022.
- 22 Bellehumeur C, Li L, Sun Q, Gu P. Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2004;6(2):170-178.
- 23 Musa NH, Mazlan N, Yusuf SM, Nordin NA, Mazlan SA, Gao N. High densification level and hardness values of additively manufactured 316L stainless steel fabricated by fused filament fabrication. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2024;34(2):144-152.
- 24 Barbosa C. Técnicas de preparação de amostras metalográficas. 1. ed. São Paulo: Blusher; 2025.
- 25 Raza A, Altaf K, Ahmad F, Hussain G, Alkahtani M, Wei H. Experimental study and characterisation of 316L stainless steel parts fabricated with metal fused filament fabrication. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;30:6686-6699.
- 26 Wang Y, Zhang L, Li X, Yan Z. On hot isostatic pressing sintering of fused filament fabricated 316L stainless steel: evaluation of microstructure, porosity, and tensile properties. *Materials Letters*. 2021;296:129854.
- 27 Maizza G, Caporale A, Polley C, Seitz H. Micro-macro relationship between microstructure, porosity, mechanical properties, and build mode parameters of a selective-electron-beam-melted Ti-6Al-4V alloy. *Metals*. 2019;9(7):786.
- 28 Betts JL, Sampson BJ, Lindsey K, Brinkley FM, Priddy MW. Reduction of process induced porosity for ultrafuse 316L through parameter optimization of Creality Ender 3 V2 and MakerBot Method X. *Crystals*. 2024;14(3):285.
- 29 Mainenti JGO. Análise da porosidade de peças fundidas por modelagem matemática: estudo de caso [trabalho de conclusão de curso]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2020.
- 30 Yusuf SM, Chen Y, Boardman R, Yang S, Gao N. Investigation on porosity and microhardness of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Metals*. 2017;7(2):64.

Recebido em: 4 Ago. 2025

Aceito em: 5 Fev. 2026

Editor responsável:

Sabrina Arcaro 