

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

COMPARAÇÃO MICROESTRUTURAL E METALÚRGICA DE AÇO
INOXIDÁVEL 316L PRODUZIDO POR DIFERENTES MÉTODOS DE
MANUFATURA – MANUFATURA ADITIVA (SLM E FDM) E LAMINAÇÃO
CONVENCIONAL

Emily de Oliveira Emmer

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Marcelo Favaro

Porto Alegre
2024

CIP - Catalogação na Publicação

EMMER, EMILY DE OLIVEIRA
COMPARAÇÃO MICROESTRUTURAL E METALÚRGICA DE AÇO
INOXIDÁVEL 316L PRODUZIDO POR DIFERENTES MÉTODOS DE
MANUFATURA - MANUFATURA ADITIVA (SLM E FDM) E
LAMINAÇÃO CONVENCIONAL / EMILY DE OLIVEIRA EMMER. --
2024.
66 f.
Orientador: Marcelo Favaro.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Manufatura Aditiva . 2. SLM. 3. FDM. 4. Aço
inoxidável 316L. I. Favaro, Marcelo, orient. II.
Titulo.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai, por ser meu maior incentivador e por sempre lutar para me proporcionar as melhores oportunidades ao longo da vida. À minha mãe, pelos valiosos ensinamentos de vida e por desempenhar a tarefa mais importante de todas: cuidar da minha filha, permitindo que eu me dedicasse plenamente à conclusão desta etapa da minha carreira. Sou profundamente grata por acreditarem em mim.

Ao meu esposo, pelo suporte incondicional durante toda esta jornada. Ao meu irmão, pela disponibilidade constante para me ajudar e ouvir sempre que necessário.

À minha família, especialmente às minhas tias, pelo apoio emocional e pela dedicação em entreter minha filha nos momentos em que eu precisei me concentrar.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Favaro, pela oportunidade de realizar este trabalho, pela orientação dedicada e pelos valiosos ensinamentos ao longo do caminho.

Ao LAMEF como instituição. Aos colegas do Grupo de Avaliação de Integridade Estrutural (GAI), pelo suporte na execução prática deste trabalho, pelos conhecimentos científicos compartilhados e, sobretudo, pelo apoio emocional durante todo o processo. Minha sincera gratidão a todos.

À Engenheira Mariana do Reis Tagliari e à Dra. Waleska Campos Guaglianoni, pelas discussões enriquecedoras e pelos ensinamentos acadêmicos que contribuíram significativamente para a conclusão deste projeto.

Aos colegas do Grupo de Análise de Falhas (GAF), pela assistência nos experimentos práticos, sempre prontos a colaborar quando precisei.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	IX
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 Manufatura Aditiva.....	15
3.2 Manufatura aditiva em metais	18
3.2.1 Manufatura Aditiva por Fusão Seletiva a Laser	18
3.2.2 Manufatura Aditiva por Modelagem por Deposição de Material Fundido	20
3.3 Aço Inoxidável Austenítico 316L.....	23
3.4 A Manufatura Aditiva e o Aço Inoxidável Austenítico.....	26
3.4.1 Aço Inoxidável 316L fabricado por SLM	27
3.4.2 Aço Inoxidável 316L fabricado por FDM.....	31
4. METODOLOGIA.....	33
4.1 Corpos de prova.....	34
4.1.1 Peça de Aço Inoxidável 316L – SLM	34
4.1.2 Peça de Aço Inoxidável 316L – FDM.....	35
4.1.3 Peça de Aço Inoxidável 316L – Laminação	36
4.2 Análise da Rugosidade Superficial.....	37
4.3 Caracterização Metalográfica	38

4.3.1	Análise de Porosidade	39
4.3.2	Análise da Microestrutura	40
4.4	Microdureza Vickers	40
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1	Rugosidade superficial	41
5.2	Análise de porosidade.....	43
5.3	Microestrutura	48
5.4	Microdureza Vickers	57
6.	CONCLUSÕES	59
7.	TRABALHOS FUTUROS	61
8.	REFERÊNCIAS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Representação esquemática do processo de manufatura aditiva.	16
Figura 3.2	Representação do processo de Fusão Seletiva a Laser.	19
Figura 3.3	Representação do processo de Modelagem por Deposição de Material Fundido.	21
Figura 3.4	Representação microestrutural esquemática do processo de Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) seguido das etapas de <i>debinding</i> e sinterização.	22
Figura 3.5	Perfil de temperatura para o processo de sinterização.	23
Figura 3.6	Diagrama de fases pseudo-binário Fe-Cr-Ni com 70% de Fe.	25
Figura 3.7	Imagem obtida por MO das poças de fusão de uma amostra de 316L fabricada por SLM.	28
Figura 3.8	Poças de fusão e grãos colunares de uma amostra de aço inoxidável 316L.	29
Figura 3.9	(a) e (b) Estrutura celular dendrítica de uma amostra de aço inoxidável 316L fabricada por SLM.	29
Figura 3.10	Variação da taxa de densificação em função da densidade de energia aplicada no processo SLM para aço inoxidável 316L.	30
Figura 3.11	Seção longitudinal de uma amostra de aço inoxidável 316L fabricado via manufatura aditiva FDM.	31
Figura 3.12	Microestrutura de um aço inoxidável 316L fabricado por FDM evidenciando a formação da fase ferrita.	32
Figura 4.1	Fluxograma de ensaios realizados para a caracterização microestrutural e mecânica das amostras analisadas.	33
Figura 4.2	Impressora 3D DMP Flex 350 utilizada para fabricação da peça de aço inoxidável 316L via SLM.	34
Figura 4.3	Peça de aço inoxidável 316L fabricada via manufatura aditiva SLM.	35
Figura 4.4	Peça de aço inoxidável 316L fabricada via manufatura aditiva FDM. ...	36
Figura 4.5	Peça de aço inoxidável 316L fabricada por laminação. Cilindro com diâmetro de 25,4 mm.	37
Figura 5.1	Valores Ra e Rt obtidos no rugosímetro e, na direita, o acabamento superficial da face A da peça fabricada via SLM.	41

Figura 5.2	Valores Ra e Rt obtidos no rugosímetro e, na direita, o acabamento superficial da face B da peça fabricada via FDM.....	42
Figura 5.3	Valores Ra e Rt obtidos no rugosímetro e, na direita, o acabamento superficial da face A da peça fabricada por laminação.	43
Figura 5.4	Porosidade resultante do processo de manufatura aditiva via SLM para os cortes (a) longitudinal, (b) normal e (c) transversal.	44
Figura 5.5	Distribuição do tamanho médio dos poros da peça produzida via SLM.	45
Figura 5.6	Porosidade resultante do processo de manufatura aditiva via FDM para os cortes (a) longitudinal, (b) normal e (c) transversal.	46
Figura 5.7	Distribuição do tamanho médio dos poros da peça produzida via FDM.	47
Figura 5.8	Porosidade resultante do processo de laminação para os cortes (a) longitudinal e (b) transversal.	47
Figura 5.9	Microestrutura analisada em MO do corte longitudinal da peça produzida via SLM em (a) 200 e (b) 500x.	49
Figura 5.10	Microestrutura analisada em MO do corte transversal da peça produzida via SLM em (a) 200 e (b) 500x.	49
Figura 5.11	Microestrutura analisada em MO do corte normal da peça produzida via SLM em (a) 200 e (b) 500x.	49
Figura 5.12	Microestrutura analisada em MEV do corte longitudinal da peça produzida via SLM em (a) 2500 e (b) 5000x.	50
Figura 5.13	Microestrutura analisada em MEV do corte normal da peça produzida via SLM em (a) 2500 e (b) 5000x.	51
Figura 5.14	Microestrutura analisada em MEV do corte transversal da peça produzida via SLM em (a) 2500 e (b) 5000x.	51
Figura 5.15	Microestrutura analisada em MO do corte longitudinal da peça produzida via FDM em (a) 200 e (b) 500x.....	52
Figura 5.16	Microestrutura analisada em MO do corte normal da peça produzida via FDM em (a) 200 e (b) 500x.....	52
Figura 5.17	Microestrutura analisada em MO do corte transversal da peça produzida via FDM em (a) 200 e (b) 500x.....	52
Figura 5.18	Microestrutura analisada em MEV do corte longitudinal da peça produzida via FDM em (a) 2500 e (b) 5000x.....	53

Figura 5.19	Microestrutura analisada em MEV do corte normal da peça produzida via FDM em (a) 2500 e (b) 5000x.....	53
Figura 5.20	Microestrutura analisada em MEV do corte transversal da peça produzida via FDM em (a) 2500 e (b) 5000x.....	54
Figura 5.21	Análise de MEV-EDS do corte transversal da amostra produzida via FDM. (a) Imagem de elétrons secundários da região analisada e mapa dos elementos (b) Fe, (c) Cr, (d) Mo e (e) Ni.....	55
Figura 5.22	Microestrutura analisada em MO do corte longitudinal da peça produzida por laminação em (a) 200 e (b) 500x.....	56
Figura 5.23	Microestrutura analisada em MO do corte transversal da peça produzida por laminação em (a) 200 e (b) 500x.....	56
Figura 5.24	Imagens de MEV do corte transversal da amostra produzida por laminação em (a) 2500 e (b) 5000x.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Características dos processos de manufatura aditiva.....	17
Tabela 3.2	Composição química nominal do aço inoxidável AISI 316L.	25
Tabela 4.1	Composição química do pó metálico LaserForm® 316L (A) utilizado para impressão da peça de aço inoxidável 316L via SLM.	35
Tabela 4.2	Composição química da peça sinterizada de aço inoxidável 316L produzida com o filamento Ultrafuse® 316L e impressa via FDM.	36
Tabela 4.3	Representação das faces A e B das peças fabricadas em que foram realizadas as medições de rugosidade.	38
Tabela 4.4	Representação dos cortes transversal (T), longitudinal (L) e normal (N) realizados nas amostras fabricadas.	39
Tabela 5.1	Valores de porosidade total obtidos para os processos de manufatura analisados.	48
Tabela 5.2	Valores de dureza obtidos para as amostras fabricadas por manufatura aditiva SLM e FDM e por laminação.	57

RESUMO

As alternativas para a produção de peças de ligas metálicas são impulsionadas pela demanda por processos de fabricação ágeis, econômicos, de alto desempenho e com grande potencial para fabricar peças com geometrias complexas e de alta precisão, próximas às do produto final. A Manufatura Aditiva (MA) se destaca por ser uma técnica baseada na adição progressiva de finas camadas de material para fabricar uma peça, utilizando apenas a quantidade exata necessária para produção, ao contrário do processo convencional, que é baseado na subtração de material, permitindo maior flexibilidade de produção em comparação aos métodos tradicionais. Dentre as ligas de aço mais utilizadas nesses processos, o aço inoxidável 316L se destaca devido à sua excepcional resistência à corrosão. Como o primeiro estudo realizado no Departamento de Metalurgia da UFRGS sobre manufatura aditiva e marcando o início de uma nova linha de pesquisa na área, esse trabalho se propõe a avaliar e comparar características microestruturais e mecânicas do aço inoxidável 316L fabricado por processos de manufatura aditiva (*Selective Laser Melting* - SLM e *Fused Deposition Modeling* – FDM) e pelo processo de laminação convencional. Avaliou-se rugosidade superficial, porosidade, constituição microestrutural e microdureza. Os resultados evidenciaram o impacto do processo de fabricação nas propriedades do produto obtido. Evidenciou-se maior densidade relativa nas peças fabricadas por SLM, enquanto a FDM apresentou maiores níveis de porosidade, devido à sua natureza de deposição de camadas. Foram constatadas diferenças significativas na morfologia e orientação dos grãos, resultantes das características intrínsecas de cada técnica de MA utilizada.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; SLM; FDM; aço inoxidável 316L

ABSTRACT

The alternatives for producing metallic alloy components are driven by the demand for agile, cost-effective, high-performance manufacturing processes with great potential to produce parts with complex geometries and high precision, closely resembling the final product. Additive Manufacturing (AM) stands out as a technique based on the progressive addition of thin material layers to fabricate a part, using only the exact amount necessary for production, unlike conventional processes, which are based on material subtraction. This allows for greater production flexibility compared to traditional methods. Among the most commonly used steel alloys in these processes, 316L stainless steel stands out due to its exceptional corrosion resistance. As the first study conducted in the Department of Metallurgy at UFRGS on additive manufacturing and marking the beginning of a new research line in this field, this study aims to evaluate and compare the microstructural and mechanical characteristics of 316L stainless steel manufactured by additive manufacturing processes (Selective Laser Melting - SLM and Fused Deposition Modeling - FDM) and the conventional rolling process. Surface roughness, porosity, microstructural composition, and microhardness were evaluated. The results highlighted the impact of the manufacturing process on the properties of the final product. Greater relative density was observed in parts produced by SLM, while FDM exhibited higher porosity levels due to its layer deposition nature. Significant differences were identified in the grain morphology and orientation, resulting from the intrinsic characteristics of each AM technique used.

Keywords: Additive Manufacturing; SLM; FDM; 316L stainless steel

1. INTRODUÇÃO

As alternativas para produção de peças de ligas metálicas para aplicação em diversos setores têm se desenvolvido cada vez mais rápido. Isso se deve à necessidade de produção rápida, de baixo custo e de melhor desempenho. A tecnologia de Manufatura Aditiva (MA), a exemplo, tem sido amplamente estudada e aperfeiçoada devido ao seu grande potencial de produzir peças com geometrias complexas e próximas do produto final. As diversas técnicas desenvolvidas podem ser classificadas de acordo com a forma que o material utilizado na fabricação se apresenta, isto é, líquido, filamento/pasta, pó e placa sólida. Metais e suas ligas, cerâmicas, polímeros, compósitos, biomateriais e concretos fazem parte da gama de materiais utilizados na MA.

A manufatura aditiva teve seu primeiro registro na década de 1980 com a técnica de Estereolitografia, a qual era considerada uma metodologia de Prototipagem Rápida, por ser capaz de fabricar peças próximas do produto em um único processo (SILVA, 2020). O processo de produção envolve a criação de um modelo CAD tridimensional, o qual é formado camada por camada, caracterizando o termo aditivo da tecnologia. Em relação a questões ambientais, a MA se destaca por ser uma técnica de adição de materiais, isto é, apenas a quantidade exata para a produção de uma peça será utilizada, diferentemente do método convencional, subtrativo.

A literatura reporta estudos conduzidos sobre as técnicas de Fusão Seletiva a Laser (SLM – *Selective Laser Melting*) e Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM – *Fused Deposition Modeling*), sendo consideradas tecnologias à base de pó de ligas metálicas.

A técnica de MA por fusão seletiva a laser utiliza um laser de alta energia para fundir seletivamente a fina camada depositada de pó metálico de acordo com o modelo CAD tridimensional, a qual é resfriada rapidamente. A plataforma de impressão é rebaixada e uma nova camada de pó metálico é aplicada com o reaplicador do pó, sendo fundida localmente no formato programado. O processo se repete até a conclusão da peça. Após a finalização, o pó não fundido é removido, podendo ser reutilizado (MONTUORI et al., 2020).

Na modelagem por deposição de material fundido, por outro lado, um polímero (aglutinante) altamente preenchido por pó metálico forma o filamento alimentado em um sistema de extrusão, aquecido acima da sua temperatura de transição vítrea, que é, então, extrudado e depositado na plataforma de impressão, formando a camada de acordo com

o arquivo STL criado (BOSCHETTO et al., 2022). A plataforma de impressão baixa em direção ao eixo z, uma nova camada é depositada e o processo se repete até a conclusão da peça. Neste processo, a “peça verde” obtida será submetida a um processo de remoção do aglutinante e posterior sinterização para densificação da peça.

Dentre as ligas de aço mais utilizadas nesses processos, se destaca o aço inoxidável 316L, devido à sua excelente resistência à corrosão e oxidação, sendo amplamente utilizado em diversos setores, como nas indústrias aeroespacial, petroquímica, automotiva, assim como na área da medicina.

Este trabalho se propôs a caracterizar a microestrutura obtida para o aço inoxidável 316L fabricado pelos métodos de manufatura aditiva FDM e SLM. Além disso, as amostras obtidas por essas técnicas alternativas foram comparadas com uma peça fabricada pelo processo convencional de laminação.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar comparativamente a microestrutura e as propriedades mecânicas de peças de aço inoxidável 316L obtidas por diferentes rotas de fabricação, a saber: manufatura aditiva (SLM e FDM) e laminação convencional.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar o impacto do método de fabricação no acabamento superficial das peças por meio de análise de rugosidade e de inspeção visual;
- Avaliar e quantificar a porosidade do material via microscopia óptica;
- Investigar as diferenças microestruturais entre as técnicas de fabricação utilizando Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV);
- Comparar a microdureza Vickers das amostras utilizando um microdurômetro.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva (MA – *Additive Manufacturing*) teve seu primeiro registro na década de 1980 com a chamada técnica de Estereolitografia. Essa técnica era conhecida como Prototipagem Rápida, pois tinha a capacidade de produzir peças com dimensões próximas às desejadas para o produto em um único processo. O termo impressão 3D foi implementado de forma geral em 2006, sendo utilizado para se referir à manufatura aditiva (SILVA et al., 2020). A técnica de Estereolitografia é baseada na cura ou solidificação de um polímero fotossensível líquido quando submetido a um laser ultravioleta. O laser UV é aplicado à resina polimérica solidificando regiões específicas da camada. Quando a camada está concluída, a plataforma desce o equivalente à espessura da camada. Isso se repete até o objeto ser concluído e o processo finalizado (WONG, 2012).

O processo de fabricação de um produto a partir da manufatura aditiva tem início com o desenvolvimento de um modelo CAD tridimensional da peça a ser fabricada que é, então, convertido para um arquivo STL, o formato padrão para as técnicas de MA. Essa conversão “corta” o modelo em camadas. Assim, a peça é construída camada por camada na máquina de manufatura aditiva (PRAKASH, 2018). A Figura 3.1 representa as etapas do processo de fabricação de forma geral.

Em 2018, a Manufatura Aditiva foi normatizada pela série ASTM 52900, a qual a subdivide em sete categorias, sendo elas: jateamento de aglomerante; deposição direta por aplicação de energia; extrusão de material; jateamento de material; fusão seletiva de material em pó; laminação de chapas e fotopolimerização de líquido.

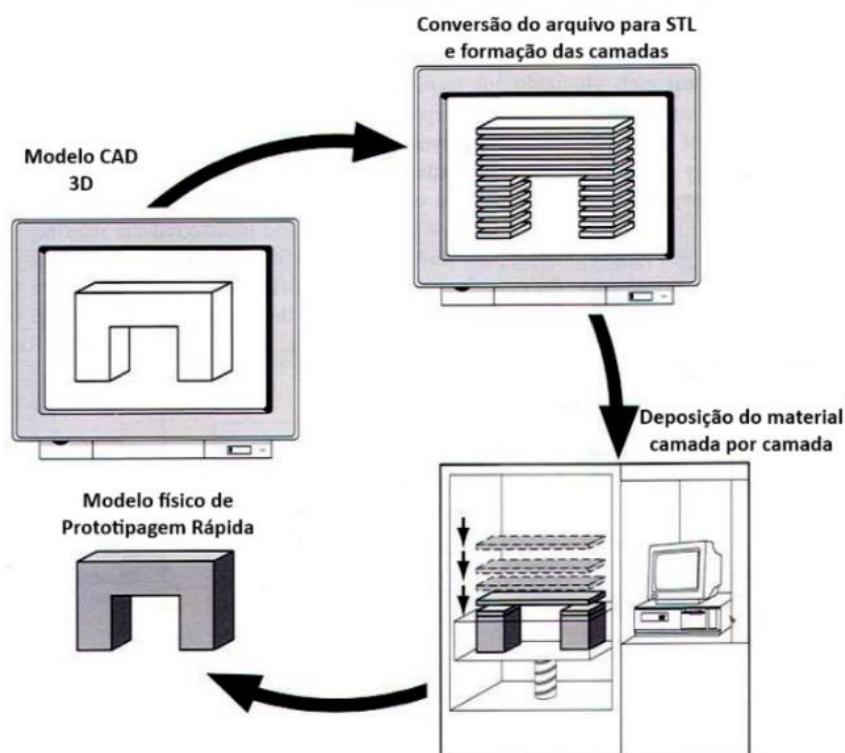


Figura 3.1 Representação esquemática do processo de manufatura aditiva.

Fonte: PRAKASH, 2018.

Segundo Rodrigues (2017), existem diversas técnicas desenvolvidas de manufatura aditiva, que podem ser classificadas em quatro categorias diferentes utilizando como base o tipo de material utilizado na fabricação, isto é, líquido, filamento/pasta, pó e placa sólida. A Tabela 1 exemplifica as tecnologias mais estudadas atualmente, de acordo com o material utilizado, o princípio da técnica e suas aplicações.

De acordo Bhuvanesh Kumar (2021), a tecnologia está sendo aprimorada em razão da gama de materiais disponíveis para a fabricação de peças com geometrias complexas, que não seriam fabricadas usando métodos convencionais como processo único. Assim, metais e suas ligas, cerâmicas, polímeros, compósitos, biomateriais e concretos são utilizados na impressão 3D. Devido à sua capacidade de produzir peças com alta complexidade geométrica e próximas do produto, a manufatura aditiva tem aplicação nos setores aeroespacial, automotivo, biomédico e energético (PRAKASH, 2018). Atualmente, são produzidos não somente protótipos, mas peças funcionais com alta versatilidade de customização (TOFAIL, 2017).

Tabela 3.1 Características dos processos de manufatura aditiva.

Matéria-prima	Processo	Material	Princípio	Aplicações
Líquido	<i>Stereolithography (SLA)</i>	Polímeros fotossensíveis	Produção de peças de polímero a partir da solidificação destes com um laser	Protótipos, moldes
	<i>Multi-jet Modeling (MJM)</i>	Acrílico fotossensível, plástico e cera	Produção de peças a partir da solidificação do material depositado por flash de uma iluminação ultravioleta (UV)	Protótipos, moldes
	<i>Rapid Freezing Prototyping (RFP)</i>	Água	Produção de peças a partir do congelamento das gotículas de água depositadas	Protótipos, moldes
Filamento/ Pasta	Modelação por extrusão de plástico (FDM)	Termoplásticos	Produção de peças por extrusão do plástico por bico extrusor em uma base	Protótipos, moldes
	<i>Robocasting</i>	Pasta cerâmica	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica	Objetos cerâmicos
	<i>Freeze-form Extrusion Fabrication (FEF)</i>	Pasta cerâmica e água	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica aquosa	Objetos cerâmicos
Pó	Sinterização seletiva a laser (SLS)	<i>Alumide; Carbon Fibre; PA 1101; PA2200/2201; PA 2221; PA2202; PA 2210; PA3200; PAEK; Polystyrene</i>	Produção de peças por meio do processo de sinterização de camadas de pó	Protótipos; partes aeronáuticas; partes motores automotivos; peças especiais para indústria; moldes
	<i>Selective Laser Melting (SLM)</i>	<i>Stainless steel316L e 17-4PH; H13 tool steel; Aluminium Al-Si-12 e Al-Si-10; Titanium CP, Ti-6Al-4V e Ti-4Al-7Nb; Cobalt-chrome ASTM75; Inconel 718 e 625</i>	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por um laser	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes motores automotivos; trocadores calor; moldes; peças especiais para indústria
	<i>Electron Beam Melting (EBM)</i>	<i>Cobalt-chrome ASTM F75; Titanium Ti-6Al-4V, Grade 2;</i>	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por um arco elétrico	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes automotivas
	<i>Laser Metal Deposition (LMD)/ Laser Engineered Net Shaping (LENS)/ Direct Metal Deposition (DMD)</i>	<i>Aluminium Al-Si-10Mg; Cobalt-chrome MP1 e SP2; Maraging Steel; Inconel 718 e 625; Stainless steel 17-4PH e 15-5PH; Titanium Ti-6Al-4V</i>	Produção de peças através da fusão completa de pó de metal	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes motores automotivos; trocadores calor; moldes; peças especiais para indústria
	Impressão Tridimensional (3DP)	Polímeros, metais, cerâmica e outros pós	Produção de peças pela deposição de pó sobre uma base, que é unido seletivamente pela injeção de aglutinante	Protótipos, moldes, ferramental para indústria
Placa sólida	Manufatura de objeto em lâminas (LOM)	Papel, plástico, metal	Produção de peças pela união de uma camada de material laminado a uma série de outras lâminas conformadas	Protótipos e moldes

Fonte: RODRIGUES, 2018.

De acordo com Legutko (2018), a produção em massa dessa tecnologia está diretamente relacionada aos aspectos econômicos, isto é, enquanto não houver uma redução de custo e um aumento de produtividade, a aplicação da manufatura aditiva na indústria está limitada. Há, no entanto, vantagens a serem consideradas comparadas aos processos convencionais, como a eficiência do material, pois a manufatura aditiva utiliza somente o material necessário para a formação da peça, diferentemente de um processo

convencional subtrativo de usinagem, por exemplo (PRAKASH, 2018). A possibilidade de produção de peças tridimensionais com geometrias complexas em um único processo é a vantagem mais significativa, considerando a facilidade com que os designs podem ser alterados (TOFAIL, 2017).

3.2 Manufatura aditiva em metais

A manufatura aditiva de metais normalmente pode ser dividida em dois grandes grupos, sendo eles a Deposição com Energia Direcionada (DED – *Direct Energy Deposition*) e a Fusão de Camada em Pó (PBF – *Powder Bed Fusion*) (VERMA, 2019). Na técnica de fusão de camada em pó, um feixe de laser funde regiões do leito em pó metálico (GOMES, 2020). Esse trabalho tratará da técnica de Fusão Seletiva a Laser (SLM – *Selective Laser Melting*), incluída na categoria PBF, a qual será discutida posteriormente.

Segundo Gong (2019), outra técnica de MA de metais baseada em extrusão vem sendo difundida e estudada com o surgimento do filamento metálico. O filamento é um composto de metal-plástico com alta carga de conteúdo de metal, sendo utilizado em impressoras de Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM – *Fused Deposition Modeling*). Nessa técnica, o filamento é aquecido até sua temperatura de transição vítrea, para então ser extrudado pelo bocal de impressão. Em se tratando de um composto metal-plástico, após a impressão, o objeto será submetido a um processo de “*debinding*”, isto é, remoção do conteúdo plástico, e posterior sinterização para finalizar a peça de metal.

De acordo com Gomes (2020), as matérias-primas mais utilizadas atualmente são o titânio, ligas de alumínio e alguns tipos de aço, principalmente o aço inoxidável 316L.

3.2.1 Manufatura Aditiva por Fusão Seletiva a Laser

De acordo com Dutt (2023), a técnica de fusão seletiva a laser (SLM) é uma das mais utilizadas no setor de manufatura aditiva de metais. A técnica utiliza um laser de alta energia para fundir o pó metálico. Durante o processo, o pó metálico destinado à alimentação é armazenado em um reservatório, o qual eleva determinada quantidade do pó que será reaplicado como uma nova fina camada na plataforma de impressão

(SPEARS, 2016). A Figura 3.2 representa esquematicamente o funcionamento do processo. O laser de alta potência funde seletivamente a fina camada depositada de acordo com o modelo CAD tridimensional, a qual é resfriada rapidamente. A plataforma de impressão é rebaixada o equivalente à espessura pré-determinada da camada, e uma nova camada de pó metálico é aplicada com o reaplicador do pó, sendo fundida localmente no formato programado. O processo se repete até a conclusão da peça e o pó não fundido é removido, podendo ser reutilizado (MONTUORI et al., 2020).

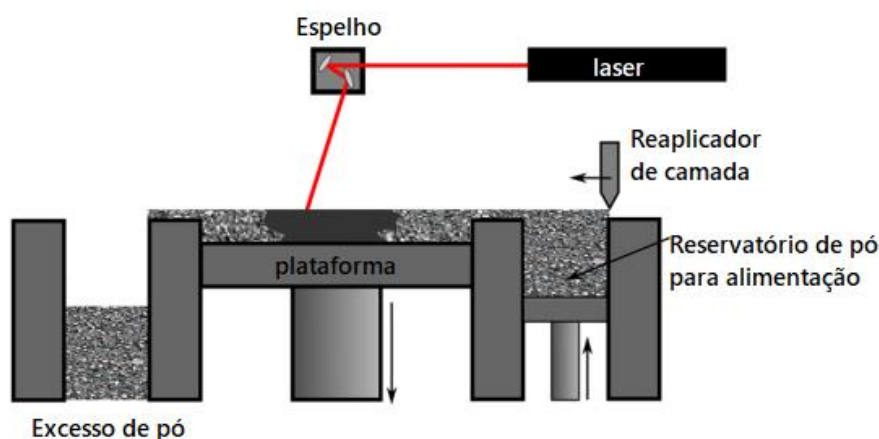


Figura 3.2 Representação do processo de Fusão Seletiva a Laser.

Fonte: adaptado de SPEARS, 2016.

O processo necessita de atmosfera controlada por nitrogênio ou argônio com baixo teor de carbono para evitar a oxidação do metal durante o processo de fusão e, ainda de acordo com Spears (2016), a espessura da camada de pó geralmente fica entre 10 e 100 μm . Dutt et al. (2023) relacionam os parâmetros de impressão, como potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre as linhas de varredura do laser e espessura da camada, com o controle das condições térmicas e de solidificação. Chen et al. (2023) atentam para os defeitos presentes em todas as etapas do processo de fabricação, devido à complexidade do comportamento físico e aos fenômenos térmicos, como a esferoidização, a porosidade, a tensão residual e as trincas. Embora a SLM possa produzir peças com densidade quase total (~98 – 99%), a porosidade residual presente nas peças fabricadas por esse processo compromete sua aplicação em contextos que exigem alta resistência e resistência à fadiga, pois as propriedades mecânicas dos componentes fabricados são afetadas pela microestrutura resultante e pelo perfil de porosidade, isto é, o tamanho e a morfologia dos poros (YUSUF, 2017).

O processo pode ser aplicado a metais, cerâmicas e polímeros, não exigindo etapas adicionais após a fabricação. As peças produzidas via SLM têm formato próximo ao final e são completamente funcionais. Além disso, podem apresentar microestrutura mais refinada e uniforme e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas em comparação com aquelas fabricadas por processos convencionais (LARIMIAN et al, 2022).

3.2.2 Manufatura Aditiva por Modelagem por Deposição de Material Fundido

A Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM – *Fused Deposition Modeling*) é uma técnica de manufatura aditiva por extrusão largamente utilizada. O processo utiliza um filamento termoplástico para produzir peças de plástico (AHMAD, 2024). Atualmente, a técnica também é conhecida por FFF (*Fused Filament Fabrication*) (THOMPSON et al., 2019). O filamento é alimentado em um sistema de extrusão, aquecido acima da sua temperatura de transição vítrea, para então ser extrudado e depositado na plataforma de impressão, formando a camada de acordo com o arquivo STL criado (BOSCHETTO et al., 2022). Na Figura 3.3, o processo é representado esquematicamente, sendo possível observar o uso de um material de suporte para estruturas que tenham um ângulo inferior a 45° em relação à horizontal (MAZURCHEVICI, 2020). Após a deposição da primeira camada, a plataforma de impressão baixa em direção ao eixo z, de acordo com a espessura definida no software de fatiamento para cada camada (MOGAN, et al., 2024).

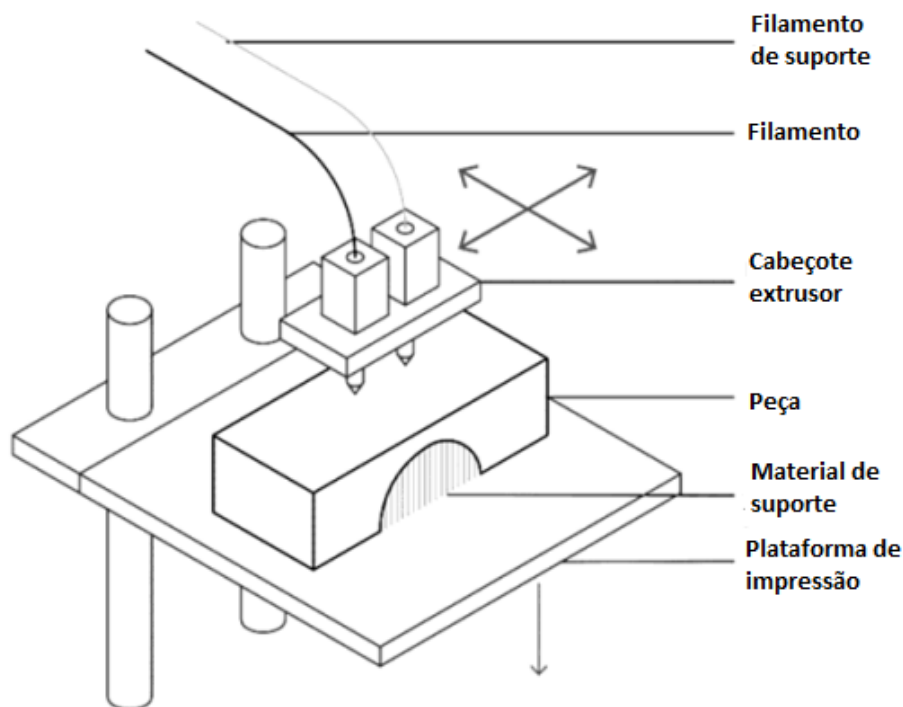


Figura 3.3 Representação do processo de Modelagem por Deposição de Material Fundido.

Fonte: adaptado de MAZURCHEVICI, 2020.

Sargini et al. (2021) afirmam ser uma tecnologia de impressão 3D fácil de usar e de baixo custo em comparação com os processos de MA à laser. Substituindo o filamento termoplástico por um polímero altamente preenchido por pó metálico e adicionando alguns processos à etapa de pós-processamento, a FDM passa a ser utilizada para a fabricação de peças metálicas (BOSCHETTO et al., 2022). Assim, a primeira etapa do processo é produzir uma matéria-prima composta de aglutinante e pó metálico e as etapas de pós-processamento se referem à extração do aglutinante (*debinding*) seguido de sinterização (RAMAZANI, 2022).

Neste processo, o componente proveniente da impressão 3D é chamado de “peça verde” (WANG, 2023) e possui pouca integridade mecânica devido à composição não homogênea (SPILLER et al., 2022). O filamento metal-plástico com alta carga de metal é aquecido até sua temperatura de transição vítrea e, em seguida, é extrudado pelo bocal para imprimir a peça verde (GONG et al., 2019). De acordo com Spiller et al. (2022), os parâmetros de impressão do processo, como espessura da camada, padrão de preenchimento, ângulo de varredura e direção de construção, estão diretamente ligados à qualidade da superfície das amostras e da sua integridade estrutural.

A peça verde é, então, submetida a um processo de remoção do conteúdo plástico aglutinante (*debinding*), gerando a “peça marrom”, seguida da sinterização para densificar e finalizar a peça de metal (GONG et al., 2019). Normalmente, o processo de *debinding* ocorre em dois estágios, um com solvente e outro térmico, para remover todo o componente aglutinante (THOMPSON et al., 2019). De acordo com Bekapalli et al. (2023), o processo de *debinding* deve ocorrer em sequência, sendo primeiro a remoção com o solvente seguida da remoção térmica, visando desenvolver uma estrutura porosa, pois o calor liberado durante a quebra do polímero causaria inchaço durante a remoção térmica. Por fim, a etapa de sinterização envolve aquecer a peça marrom para unir o pó metálico até se obter um componente densificado (até 99%), sem perder a forma. A temperatura deve ser alta o suficiente para reduzir a energia superficial do pó durante a sinterização, formando ligações entre partículas e diminuindo a área superficial. (BEKAPALLI et al., 2023). A Figura 3.4 esquematiza o processo de impressão 3D por FDM e as etapas de pós-processamento.

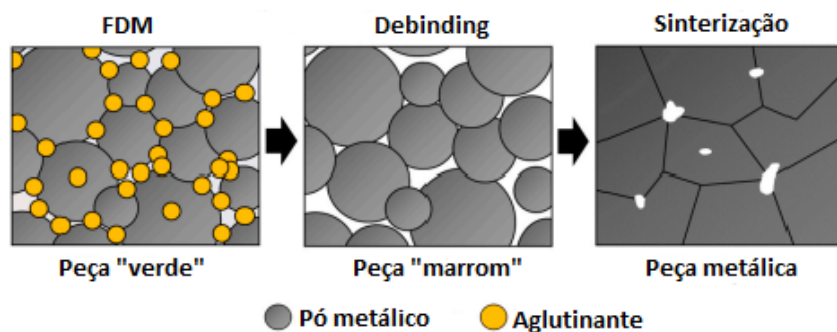


Figura 3.4 Representação microestrutural esquemática do processo de Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) seguido das etapas de *debinding* e sinterização.

Fonte: adaptado de WANG et al., 2023.

Durante o processo de sinterização, ocorre uma retração das dimensões da peça final em comparação com a “peça verde” fabricada, devido à eliminação dos poros (SADAF, 2021). Essa retração deve ser compensada no design criado para impressão. De acordo com Yoon et al. (2003), o processo de sinterização tem grande influência nas propriedades mecânicas e microestruturais das peças produzidas. O ciclo da sinterização envolve quatro etapas importantes, mostradas no perfil de temperatura da Figura 3.5, sendo elas a taxa de aquecimento, o tempo de sinterização, a temperatura de sinterização

e a atmosfera de sinterização, as quais afetam o formato e o tamanho dos poros e a densidade final das peças (JI et al., 2001).

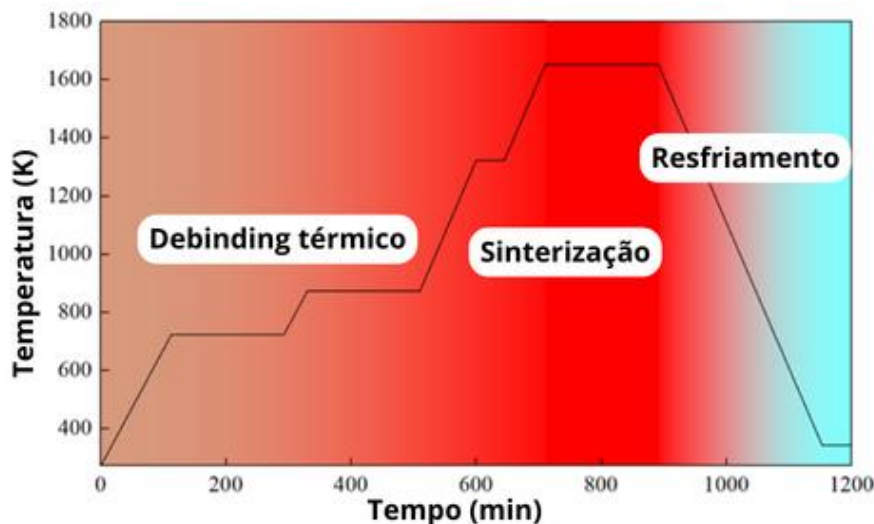


Figura 3.5 Perfil de temperatura para o processo de sinterização.

Fonte: adaptado de JIANG, 2021.

Segundo Wang et al. (2021), a FDM é uma técnica de manufatura aditiva de metais de baixo custo. No entanto, o maior desafio da técnica é o alto grau de porosidade em comparação com os processos de fusão a laser.

3.3 Aço Inoxidável Austenítico 316L

Dentre os vários tipos de aço (carbono, ligado, ferramenta etc.), os aços inoxidáveis, que são ligas de ferro e cromo, possuem um alto teor de cromo, no mínimo 11%, o que lhes confere resistência à corrosão devido à formação de um filme passivo de óxido de cromo na superfície das peças. Esse filme passivo formado ajuda a prevenir a oxidação do resto da peça, pois ele se forma e se restaura na presença de oxigênio (LARIMIAN et al., 2022, DAVIS, 1994). Esse tipo de aço possui outros elementos de liga, como níquel, molibdênio, cobre e alumínio, que podem afetar o comportamento eletroquímico, as propriedades mecânicas e a estabilidade das fases das peças em diversos ambientes de trabalho (HEMMASIAN ETTEFAGH, 2018).

De acordo com Davis (1994), os aços inoxidáveis são divididos em cinco famílias, caracterizadas de acordo com a microestrutura cristalográfica das ligas, sendo elas:

ferrítica, martensítica, austenítica ou duplex (austenítica e ferrítica). A quinta família, das ligas endurecíveis por precipitação, é baseada no tipo de tratamento térmico sofrido. Aços inoxidáveis martensíticos apresentam microestrutura martensítica e pertencem à série 4XX e contém 12-17%Cr e 0,1-1,0%C. Inoxidáveis ferríticos possuem microestrutura ferrítica, pertencem à série 4XX e contém 10,5-30%Cr e 0,12%C. Aços inoxidáveis austeníticos apresentam microestrutura austenítica e fazem parte das séries 2XX e 3XX, contendo 17-25%Cr e 8-20%Ni. Os duplex apresentam microestrutura ferrítica e martensítica e contém 18-28%Cr, 4,5-8%Ni e adições de molibdênio (2,5-4%Mo) e de nitrogênio (0,16-0,18%N). Por fim, os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação podem apresentar matriz martensítica ou austenítica e as adições podem incluir alumínio, cobre, titânio, molibdênio, nióbio, nitrogênio e carbono. A família de aço inoxidável que será estudada nesse trabalho é a austenítica, que será explicada detalhadamente a seguir.

Aços inoxidáveis austeníticos possuem estrutura cúbica de face centrada (CFC) e microestrutura estável e completa. São aços cuja constituição é à base de ferro, cromo e níquel. Possuem excelente resistência à corrosão, boas propriedades mecânicas em altas temperaturas, boa capacidade de fabricação e soldabilidade (CHEN et al., 2023). O níquel, por exemplo, é o principal estabilizador da austenita, assim como o carbono e o nitrogênio. A adição de molibdênio (2-3%) favorece a resistência à corrosão por pites (LIPPOLD, 2018).

A Figura 3.6 apresenta o diagrama de fases pseudo-binário Fe-Cr-Ni, em que é possível observar que a austenita (γ) é a fase de equilíbrio em altas temperaturas. No entanto, pode haver a formação de outras fases quando variada a composição química e a temperatura. No processo de soldagem, por exemplo, o material passa por rápidas taxas de aquecimento e/ou resfriamento, podendo resultar em um aço com a presença de outras fases, como a fase sigma (σ), fase chi (χ), fase de Laves (η), carbonetos ($M_{23}C_6$) e ferrita- δ (LIPPOLD, 2018).

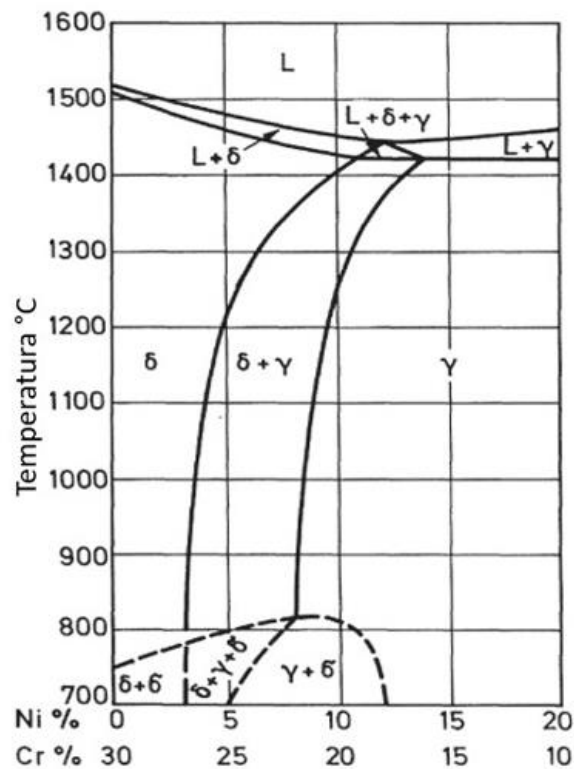


Figura 3.6 Diagrama de fases pseudo-binário Fe-Cr-Ni com 70% de Fe.

Fonte: SOUZA, 2022.

O aço inoxidável austenítico 316L é um aço alta liga (Fe, Cr, Ni) com baixo teor de carbono, a fim de evitar reações com o cromo em um processo conhecido como sensitização. Nesse processo, que ocorre a formação de carbonetos que precipitam nos contornos de grão, podendo levar a uma redução localizada da concentração de cromo em solução sólida, diminuindo assim a resistência à corrosão (IORGA et al., 2014). A Tabela 3.2 traz a composição química nominal dessa liga de acordo com a norma ASTM A312 (ASTM International, 2021) designada para tubos de aço inoxidável austenítico sem costura, soldados e com trabalho a frio.

Tabela 3.2 Composição química nominal do aço inoxidável AISI 316L.

	Composição química (% em massa)							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
AISI 316L	0,03	2,00	0,05	0,03	1,00	16,00- 18,00	10,00- 14,00	2,00- 3,00

Fonte: Adaptado de ASTM Internacional, 2021

Considerando a faixa de composição de Cr e Ni apresentada na Tabela 3.2 para o aço inoxidável 316L e assumindo uma liga produzida sob condições de equilíbrio, é possível prever a microestrutura deste tipo de aço inoxidável austenítico a partir do diagrama pseudo-binário do sistema Fe-Cr-Ni da Figura 3.7. Maiores concentrações de níquel representam uma microestrutura totalmente austenítica. No entanto, teores mais baixos de níquel e maior concentração de cromo podem resultar em ferrita- δ na microestrutura final da liga (SOUZA, 2022).

O 316L é um dos materiais mais importantes para a engenharia devido as suas excelentes propriedades, como boa ductilidade, alta resistência à corrosão e bom acabamento superficial (YU et al., 2020). Atualmente, esse aço é utilizado em uma ampla gama de aplicações, incluindo equipamentos de preparo de alimentos, indústria marítima, farmacêutica, arquitetônica (HAMIDI et al., 2019), automotiva, aeroespacial e biomédica (LARIMIAN et al., 2022). Por ser um aço inoxidável austenítico, o 316L oferece boa resistência aos ataques de cloro em ambientes marinhos (HEMMASIAN ETTEFAGH, 2018).

Na manufatura aditiva, de acordo com Montuori et al. (2020), o aço 316L se mostra como foco de estudos e aplicações, principalmente em função das propriedades já mencionadas, como excelente resistência à corrosão e à oxidação e boa conformabilidade. Dessa forma, a seleção apropriada da técnica de processamento para aprimorar as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão do aço em aplicações industriais tem sido amplamente discutida (KALE et al., 2020).

3.4 A Manufatura Aditiva e o Aço Inoxidável Austenítico

A manufatura aditiva possui características que diferenciam o material fabricado daqueles produzidos pelos métodos convencionais. A técnica utilizada, seja por laser para a fusão do pó, seja por deposição, produz diferentes microestruturas que afetam as propriedades de corrosão, por exemplo. Pequenas variações nos parâmetros do processo influenciam diretamente na microestrutura. Macroscopicamente, a porosidade e a rugosidade da superfície são características das peças produzidas por MA (ÖRNEK, 2018).

No processo de formação camada por camada da manufatura aditiva (MA), normalmente uma camada depositada tem a mesma composição química da camada depositada anteriormente. Nesses casos, ocorre o crescimento epitaxial dos grãos, os

quais herdam a orientação cristalográfica dos grãos formados durante a deposição da camada anterior, tendendo a crescer preferencialmente na direção do fluxo de calor. Assim, as estruturas normalmente observadas em componentes fabricados por MA, após a solidificação, são as estruturas colunares e equiaxiais, que se formam em função do gradiente de temperatura e da taxa de solidificação. A orientação da estrutura de grãos é afetada pela forma e pelo tamanho da poça de fusão, a qual possui geometria determinada pelos parâmetros do processo, pelas propriedades do material e pelas condições de solidificação. A estrutura dos grãos formada durante a solidificação afeta diretamente as propriedades mecânicas do componente produzido (DEBROY et al., 2018).

Rafieezad et al. (2019) observam que a cada camada formada, fundida ou depositada, ocorre uma alteração na microestrutura da camada formada anteriormente, que já havia sido fundida, estava resfriando e passou por um novo aquecimento durante a formação da camada seguinte. Essa alteração ocorre principalmente na região superior, mais próxima da nova camada em formação. Dessa forma, as regiões mais distantes da zona de fusão apresentam uma taxa de resfriamento diferente das mais próximas a essa zona, resultando em microestruturas distintas.

Considerando as condições fora do equilíbrio das condições de aquecimento e resfriamento e os complexos ciclos térmicos, é desafiadora a obtenção de uma estrutura austenítica monofásica nas ligas de aço inoxidável do sistema Fe-Cr-Ni. Em contraste com o material produzido por processos convencionais, a microestrutura resultante dos componentes fabricados por MA tende a ser predominantemente multifásica e anisotrópica. Assim, as características da manufatura aditiva tornam a formação de ferrita praticamente inevitável para a maioria dos aços inoxidáveis austeníticos da série 300 (ASTAFUROV, 2021).

3.4.1 Aço Inoxidável 316L fabricado por SLM

Na manufatura aditiva por fusão seletiva a laser (SLM), a varredura do feixe do laser gera traços de fusão e poças de fusão, com estrutura semelhante à obtida pelo processo de soldagem a laser. O tamanho da poça de fusão depende da densidade de energia do laser. As poças de fusão geradas na formação da camada anterior, que está em processo de resfriamento, podem sofrer uma refusão parcial pela varredura do laser da camada seguinte, resultando em poças de fusão periódicas e alinhadas em função da repetição do processo (ZHONG et al., 2016). Esse padrão pode ser visto na Figura 3.7.

Montuori et al. (2020), observaram que a profundidade da poça de fusão aumenta com o aumento da densidade de energia do laser, pois maior densidade de energia promove maior refusão da camada anterior, resultando em um aumento da profundidade da poça de fusão.

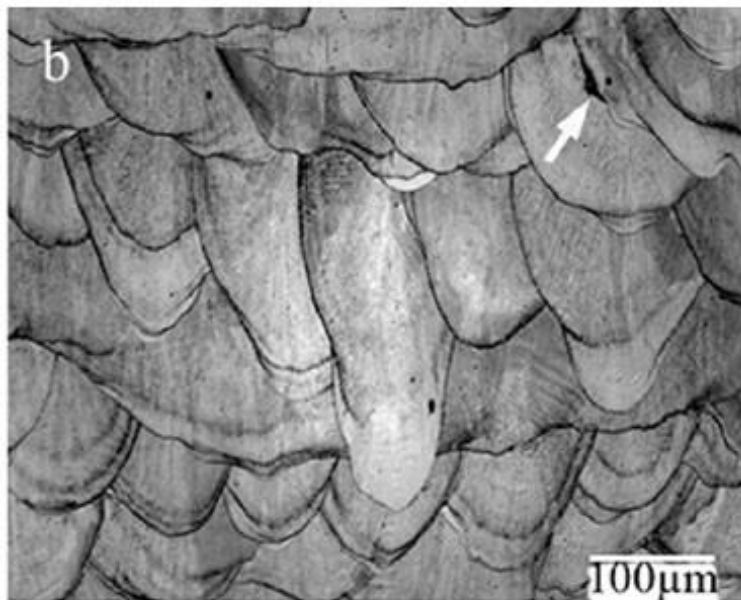


Figura 3.7 Imagem obtida por MO das poças de fusão de uma amostra de 316L fabricada por SLM.

Fonte: Adaptado de ZHONG et al., 2016.

Microscopicamente, há uma estrutura típica de grãos colunares nas amostras que parecem atravessar as poças de fusão. Elas são, no entanto, interrompidas dentro da poça de fusão. Esse efeito é observado na Figura 3.8, onde também é possível constatar a presença de uma estrutura celular, atribuída as altas taxas de solidificação e altos gradientes térmicos que a liga sofre. De acordo com WU et al. (2024), a sobreposição das poças de fusão afeta o tamanho dos grãos colunares e dessa estrutura celular, isto é, a estrutura celular é maior na região com sobreposição. Isto acontece pois o gradiente de temperatura na região que sofre refusão é menor, o que favorece o crescimento da estrutura celular.

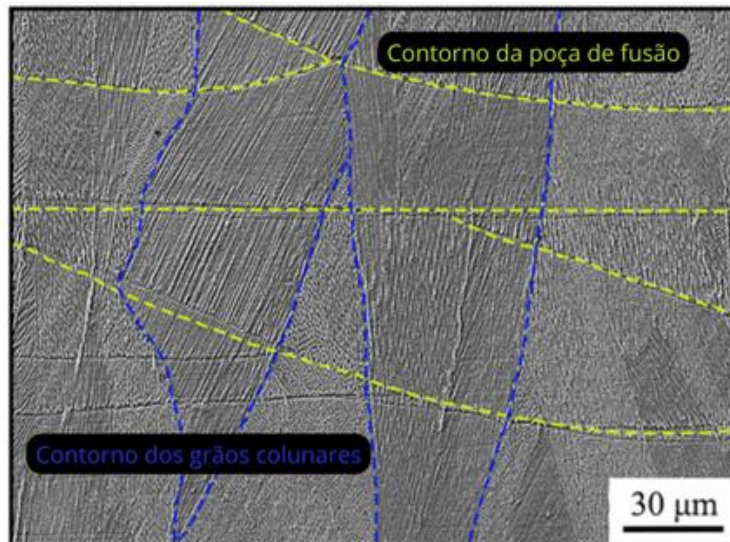


Figura 3.8 Poças de fusão e grãos colunares de uma amostra de aço inoxidável 316L.
 Fonte: Adaptado de WU et al., 2024.

A Figura 3.9 revela uma microestrutura celular dendrítica refinada de uma amostra de aço inoxidável 316L, característica comum dos materiais metálicos fabricados por processos de MA como resultado das rápidas taxas de solidificação nas regiões fundidas seletivamente pelo laser, resultado do curto tempo de interação laser-material durante o processo de fabricação da camada. Essa estrutura refinada leva a melhorias na resistência à tração e no perfil de microdureza desses materiais em comparação com as técnicas de fabricação convencionais (YUSUF et al., 2017).

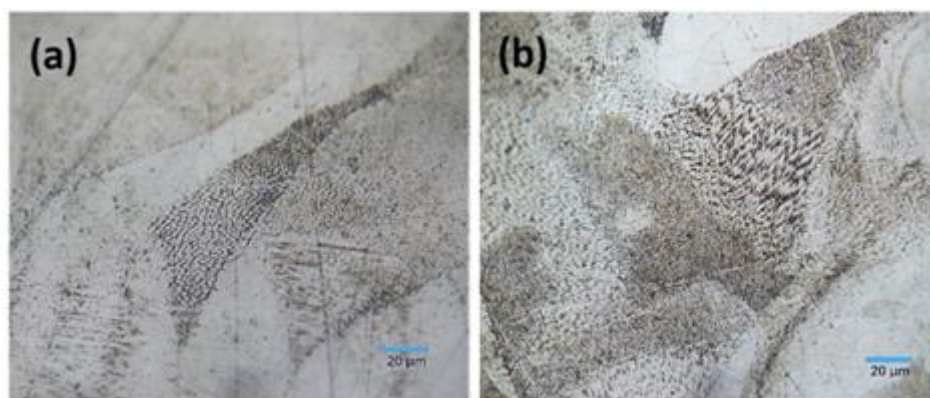


Figura 3.9 (a) e (b) Estrutura celular dendrítica de uma amostra de aço inoxidável 316L fabricada por SLM.

Fonte: YUSUF et al., 2017.

Segundo Montuori et al. (2020), peças de aço inoxidável 316L fabricadas por SLM apresentam tensão de escoamento e resistência mecânica superiores em comparação aos componentes de mesmo material produzidos por métodos convencionais, podendo estar relacionado ao refinamento da microestrutura obtida pelas altas taxas de resfriamento do processo.

A técnica SLM é capaz de fabricar peças quase totalmente densas (~98-99%), mas a presença de porosidade residual pode dificultar as aplicações que exigem alta resistência e resistência à fadiga. Em seu trabalho sobre o mecanismo de crescimento cristalográfico para peças de aço inoxidável 316L produzidas via SLM, Wang et al. (2016) relacionam a densidade de energia com a densidade relativa das peças, isto é, quanto maior a densidade de energia volumétrica aplicada no processo, maior a área livre de poros obtida, como mostra a Figura 3.10, pois o tempo de permanência do feixe de laser em cada região de irradiação é aumentado e, conseqüentemente, a quantidade de líquido formada garante um melhor grau de densificação.

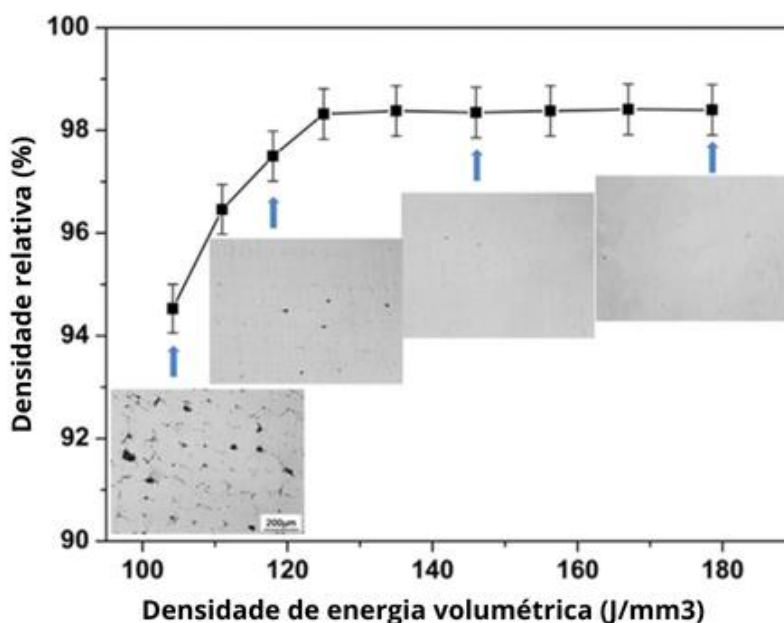


Figura 3.10 Variação da taxa de densificação em função da densidade de energia aplicada no processo SLM para aço inoxidável 316L.

Fonte: WANG et al., 2016.

Como nos processos convencionais de fabricação, as propriedades mecânicas das peças fabricadas por SLM são influenciadas pela microestrutura resultante e pelo perfil de porosidade. Yusuf et al. (2017), encontraram em seu trabalho que os tamanhos dos

poros de um aço 316L fabricado por SLM variam, aproximadamente, de 5 μm a 45 μm , sendo que os menores poros ($\leq 5 \mu\text{m}$) representam 60% do total, enquanto os maiores ($> 30 \mu\text{m}$) representam menos de 3%. A porosidade média calculada por ele foi de $0,82\% \pm 0,36\%$, o que significa que um alto nível de densificação ($\geq 99\%$) foi obtido.

3.4.2 Aço Inoxidável 316L fabricado por FDM

Na manufatura aditiva por deposição de material fundido (FDM), o processo de sinterização é crucial para a qualidade da peça fabricada em função da densificação do componente (JIANG, 2022). De acordo com Raza et al. (2024), a difusão é proporcional à temperatura de sinterização e ao tempo de permanência, isto é, a densidade da peça sinterizada aumenta, pois aumenta o tempo de difusão e a energia de difusão entre as partículas metálicas, que se fundem, preenchendo os espaços vazios (RAZA et al., 2024).

De acordo com Spiller (2023), duas formas de porosidade ocorrem nas peças produzidas via FDM: poros grandes são classificados como defeitos de impressão devido à estratégia de deposição e à ligação insuficiente do material, os quais aparecem em regiões específicas, onde filamentos adjacentes se unem. Por outro lado, poros arredondados de tamanho micron que se distribuem de forma aleatória na amostra estão ligados à sinterização incompleta. A Figura 3.11 mostra a seção longitudinal de um corpo de prova de um aço inoxidável 316L fabricado via manufatura aditiva por FDM. Spiller (2023) comenta que a distribuição dos poros não é aleatória, considerando que a localização dos vazios segue o caminho da deposição do filamento.



Figura 3.11 Seção longitudinal de uma amostra de aço inoxidável 316L fabricado via manufatura aditiva FDM.

Fonte: SPILLER, 2023.

A porosidade resultante da sinterização afeta as propriedades mecânicas do componente fabricado, como a microdureza. Em seu trabalho sobre a rota de fabricação de um aço inoxidável 316L via manufatura aditiva por filamento fundido, Sadaf (2021)

encontrou um valor de microdureza Vickers de 285,5 HV, afirmando que esse valor é comparável aos valores de microdureza obtidos para o mesmo material fabricados pelo processo MIM.

Segundo Wang et al. (2021), a microestrutura das amostras produzidas por FDM apresentam grãos de morfologia, em geral, equiaxiais, e as fases austenita e ferrita- δ coexistem. Essa microestrutura difere da obtida pelo processo à laser (SLM) para aços inoxidáveis 316L, onde é observada uma microestrutura praticamente monofásica de austenita. No processo por FDM, a formação da ferrita- δ resulta da sinterização em alta temperatura realizada próximo ao ponto de fusão, podendo ser observada na Figura 3.12. Ambas as fases não apresentam orientação cristalina preferencial, influenciando nas propriedades anisotrópicas do material.

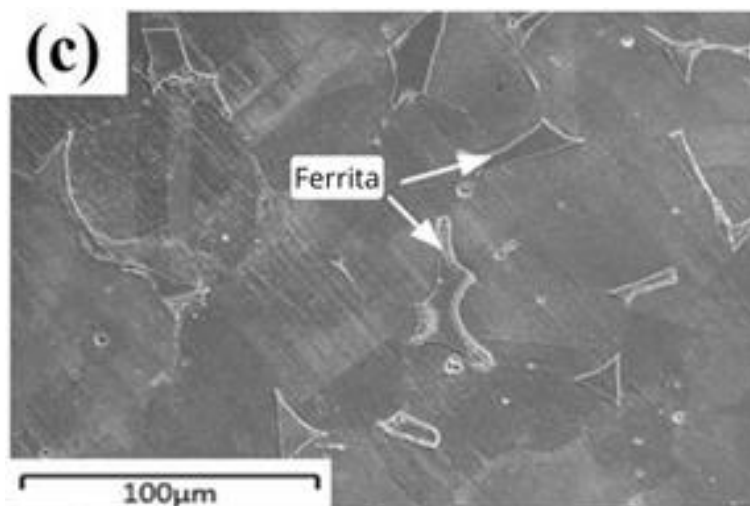


Figura 3.12 Microestrutura de um aço inoxidável 316L fabricado por FDM evidenciando a formação da fase ferrita.

Fonte: Adaptado de WANG et al., 2021.

4. METODOLOGIA

Este capítulo apresentará a metodologia utilizada para a caracterização microestrutural e mecânica das amostras de aço inoxidável 316L produzidas por diferentes métodos de fabricação. A fins de comparação, a análise também foi realizada em um componente fabricado por laminação. As análises foram realizadas no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), onde os equipamentos utilizados estão localizados. Como as técnicas de fabricação analisadas neste trabalho vêm sendo cada vez mais difundidas, as amostras produzidas foram sujeitas a um processo de caracterização para melhor compreensão das microestruturas formadas.

A metodologia seguida neste trabalho está representada no fluxograma da Figura 4.1. Foram realizados registros macrográficos de cada uma das amostras, assim como análise de rugosidade para interpretação do acabamento superficial. Porosidade resultante e microestrutura foram avaliadas através de microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura. Ainda, foi realizado um perfil de microdureza para cada uma das amostras.

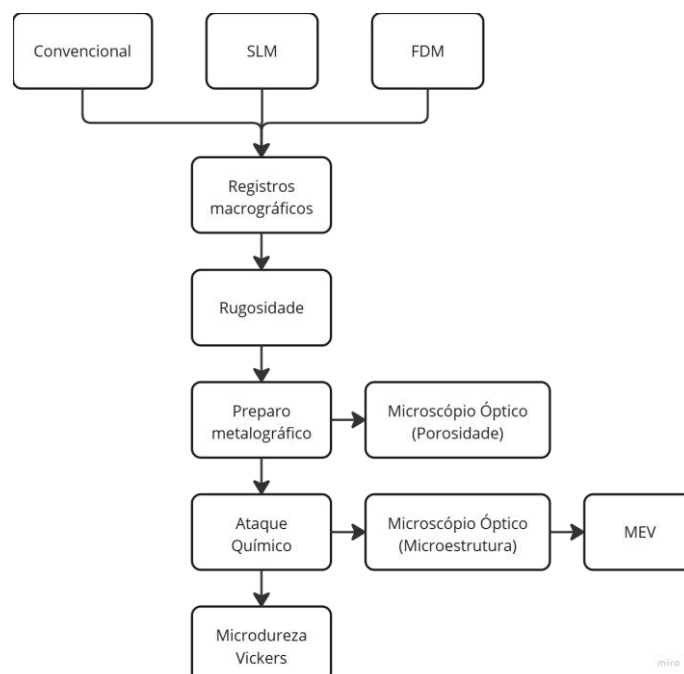


Figura 4.1 Fluxograma de ensaios realizados para a caracterização microestrutural e mecânica das amostras analisadas.

Fonte: a Autora.

4.1 Corpos de prova

As amostras analisadas de aço inoxidável 316L foram produzidas por dois processos de manufatura aditiva distintos e uma terceira peça foi produzida pelo método convencional de laminação. Não foi estabelecido um padrão de formato para as peças, dessa forma, as três possuem geometrias diferentes. Cada uma delas, no entanto, passou pela mesma sequência de ensaios de caracterização.

4.1.1 Peça de Aço Inoxidável 316L – SLM

A peça produzida pelo método de manufatura aditiva via SLM foi impressa na impressora DMP Flex 350 fabricada pela 3D Systems, Inc., representada na Figura 4.2. A impressora pertence ao Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS (LAMEF). O pó metálico utilizado é desenvolvido e formulado especificamente para as impressoras 3D de metal da fabricante, o LaserForm® 316L (A), para se obter alta qualidade e as melhores propriedades das peças. A composição química do material é fornecida pelo fabricante e está descrita na Tabela 4.1.



Figura 4.2 Impressora 3D DMP Flex 350 utilizada para fabricação da peça de aço inoxidável 316L via SLM.

Fonte: 3D Systems, 2022.

Tabela 4.1 Composição química do pó metálico LaserForm® 316L (A) utilizado para impressão da peça de aço inoxidável 316L via SLM.

	Composição química (% em massa)							
	Cr	Ni	C	Mn	Mo	Si	P	S
LaserForm 316L (A)	16,00- 18,00	10,00- 14,00	≤0,030	≤2,00	2,00- 3,00	≤1,00	≤0,045	≤0,030

Fonte: Adaptado de 3D Systems, 2022.

A máquina utiliza uma atmosfera controlada de argônio para impressão das peças. Na Figura 4.3 está o registro da geometria da peça fabricada. Essa peça faz parte de um padrão para calibração dos parâmetros de impressão da máquina, sendo escolhida apenas para fins de caracterização metalográfica.

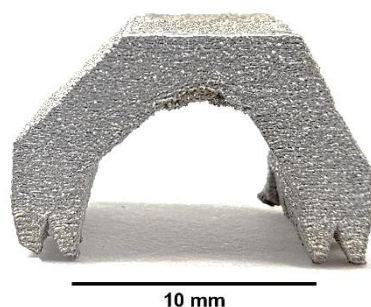


Figura 4.3 Peça de aço inoxidável 316L fabricada via manufatura aditiva SLM.

Fonte: a Autora.

4.1.2 Peça de Aço Inoxidável 316L – FDM

O filamento utilizado para impressão na impressora 3D BCN3D SigmaX foi o Ultrafuse® 316L, da fabricante BASF, sendo um filamento composto por 90% de partículas de aço inoxidável 316L e 10% de polímero. Os processos de *debinding* e sinterização foram realizados na TecnoMIM Indústria de Injetados LTDA., localizada no Distrito Industrial em Cachoeirinha, no Rio Grande do Sul, seguindo os parâmetros disponibilizados pela BASF 3D *Printing Solutions GmbH* (BASF, 2021). A etapa de *debinding* ocorreu a 120°C, sendo finalizada quando uma redução mínima de 10,5% é registrada na extração do aglutinante. A sinterização foi feita em atmosfera controlada com uma mistura de nitrogênio e hidrogênio, seguindo um ciclo típico com aumento de temperatura a partir da temperatura ambiente até 600 °C, a 5 °C/min, com tempo de permanência de 1 hora, para então aumentar a temperatura até 1380 °C, também a 5

°C/min, mantendo por 3h. A composição química disponibilizada pela fabricante se encontra na Tabela 4.2 e se refere à composição após a sinterização.

Tabela 4.2 Composição química da peça sinterizada de aço inoxidável 316L produzida com o filamento Ultrafuse® 316L e impressa via FDM.

	Composição química (% em massa)					
	Cr	Ni	C	Mn	Mo	Si
Ultrafuse	16,00-	10,00-	≤0,030	≤2,00	2,00-	≤1,00
316L	18,00	14,00			3,00	

Fonte: BASF 3D *Printing Solutions* GmbH, 2022.

A peça utilizada nesta caracterização metalográfica, impressa no Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS (LAMEF), após a sinterização, foi submetida a um processo de usinagem e a um ensaio de tração. Assim, para a caracterização, foi utilizada uma das partes do CP resultante do ensaio de tração. Na Figura 4.4 é possível observar uma superfície de fratura. O corpo de prova possui 2,4 mm de espessura.

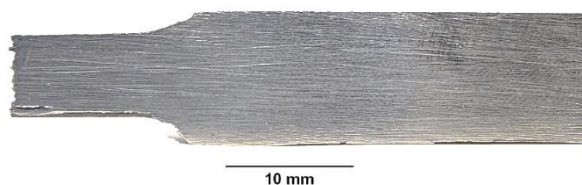


Figura 4.4 Peça de aço inoxidável 316L fabricada via manufatura aditiva FDM.

Fonte: a Autora.

4.1.3 Peça de Aço Inoxidável 316L – Laminação

Para fins de comparação, a peça de aço inoxidável 316L fabricada pelo processo convencional de laminação foi cedida pela empresa MetalFresa Indústria Metalúrgica LTDA., situada em Cachoeirinha, no Rio Grande do Sul. Não há, no entanto, informações disponíveis sobre as etapas específicas do processo ou as condições empregadas durante sua produção. A peça em formato cilíndrico é mostrada na Figura 4.5, com 25,4 mm de diâmetro. A composição química é a padrão para o aço inoxidável 316L, já apresentada na Tabela 3.2.

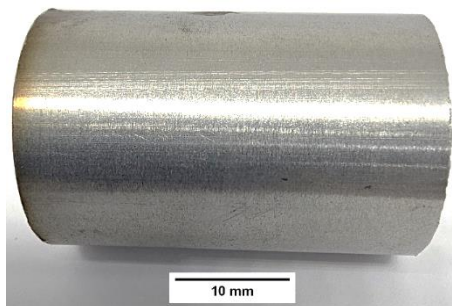


Figura 4.5 Peça de aço inoxidável 316L fabricada por laminação. Cilindro com diâmetro de 25,4 mm.

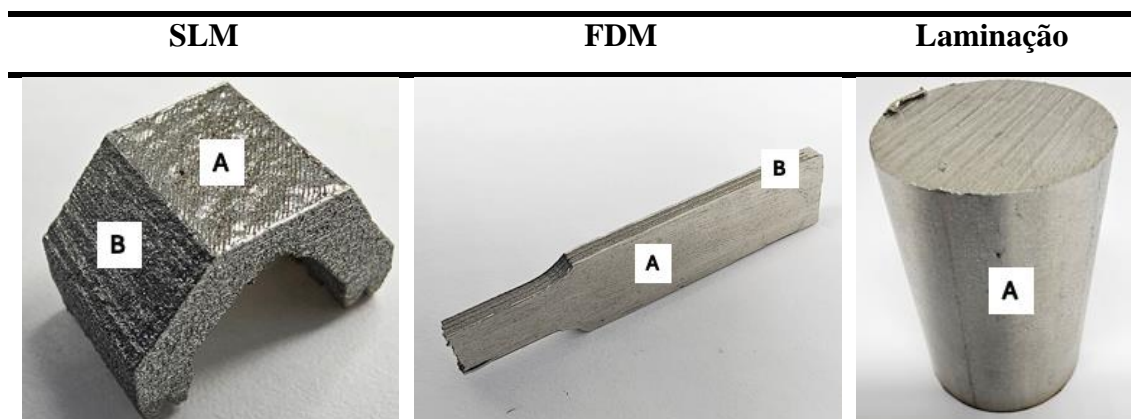
Fonte: a Autora.

4.2 Análise da Rugosidade Superficial

A análise de rugosidade superficial das peças foi realizada por visualização na Lupa Zeiss Stemi SV-11 e registro fotográfico. Também foi realizada análise de rugosidade no Rugosímetro Mitutoyo SJ-500, com o objetivo de determinar a qualidade da superfície, obtendo os parâmetros Ra (rugosidade média) e Rt (rugosidade total) que descrevem sua rugosidade, fornecendo informações sobre a textura superficial das peças. A agulha de medição é movida sobre a superfície da peça para registrar as variações de altura em uma direção específica. Foram realizados dois conjuntos de pontos de medição em triplicata, perpendiculares entre si, em cada superfície com comprimentos de 4 mm cada ponto. Os valores de rugosidade obtidos foram comparados com os registros feitos na lupa.

A Tabela 4.3 representa as superfícies em que foram realizadas as medições de rugosidade superficial. Na peça fabricada por MA via SLM, as medições foram realizadas na superfície A e B, paralelas ao sentido de varredura do laser e transversais a esse sentido. A peça produzida via FDM passou por um processo de usinagem após a sinterização para se adequar às dimensões exigidas ao teste de tração, afetando o acabamento superficial da face A. A face B, no entanto, ainda representa o acabamento superficial característico das deposições das camadas de filamentos. Na peça fabricada pelo processo convencional de laminação, as medidas foram feitas na superfície da circunferência do cilindro, longitudinal e transversalmente ao comprimento.

Tabela 4.3 Representação das faces A e B das peças fabricadas em que foram realizadas as medições de rugosidade.

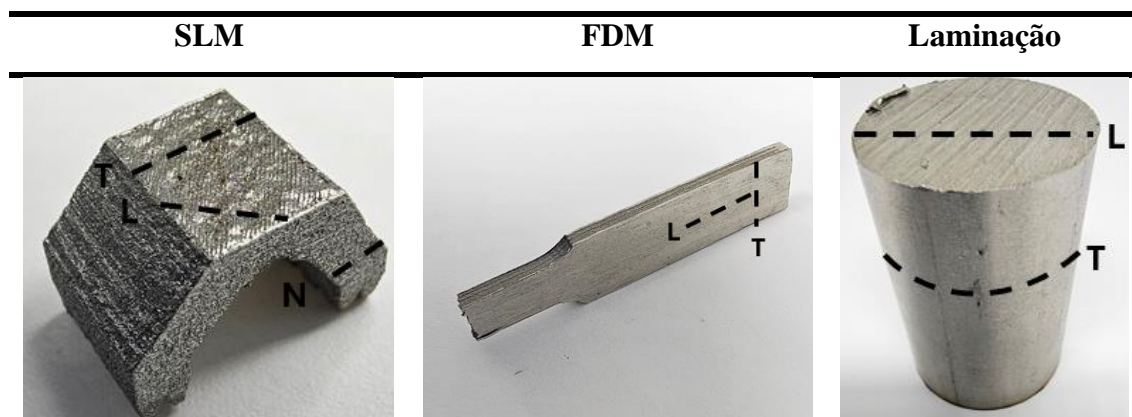


Fonte: a Autora.

4.3 Caracterização Metalográfica

Nas peças fabricadas por manufatura aditiva foram realizados três cortes, transversal (T), longitudinal (L) e normal (N), em cada peça para revelar a microestrutura das amostras nas diferentes orientações. Os cortes foram feitos levando em consideração a direção de impressão, isto é, da deposição das camadas. Os cortes foram realizados na máquina de corte Brillant 220 da fabricante QATM. Para as peças fabricadas por SLM e FDM, o objetivo era verificar a influência da deposição de camadas na microestrutura. Na peça produzida via FDM, não foi realizado um corte na direção normal, pois a espessura era muito pequena, então simplesmente foi realizado o embutimento de uma das superfícies da peça. Quanto à amostra produzida pelo processo convencional, de formato cilíndrico, foi realizado um corte transversal e outro longitudinal. Na Tabela 4.4 é possível ver a orientação dos cortes em cada uma das peças.

Tabela 4.4 Representação dos cortes transversal (T), longitudinal (L) e normal (N) realizados nas amostras fabricadas.



Fonte: a Autora.

As amostras foram embutidas a quente, com baquelite fenólica condutora, que possibilitasse a análise em microscópio eletrônico de varredura posteriormente, e identificadas. A fim de criar uma superfície plana e uniforme para o polimento, cada amostra foi lixada em várias etapas, utilizando a sequência de lixas de SiC com granulometria de 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200, em água corrente, para evitar o aquecimento excessivo e contaminação da superfície. Em seguida, foi realizado o polimento em duas etapas, com abrasivos mais finos, para deixar a superfície sem arranhões e com aspecto espelhado. Os abrasivos utilizados foram diamante em suspensão cristalina de 4 e de 1 μm , nessa ordem, e, nessa etapa, utiliza-se álcool etílico para limpar e secar as amostras.

4.3.1 Análise de Porosidade

Finalizado o polimento, as amostras foram analisadas no microscópio óptico Leica DM2700 M. Foram feitos registros de 100 e 500x de aumento, utilizando o *software* LAS Core, a fim de examinar a porosidade das amostras em função da técnica de manufatura e das direções dos cortes. A análise da porosidade foi feita utilizando o *software* de processamento *ImageJ*, o qual é capaz de calcular a distribuição da porosidade em função da área e a quantidade de poros nas imagens capturadas.

4.3.2 Análise da Microestrutura

A fim de revelar a microestrutura das amostras, foi realizado ataque eletrolítico em cada um dos cortes, com o objetivo de revelar diferentes constituintes do material, como os contornos de grãos, fases e inclusões. O reagente utilizado no ataque foi o Ácido Oxálico 10%, com potência de 6,00 Volts e com tempos que variaram de 10 a 45 segundos. Imediatamente após o ataque, as amostras eram colocadas em água corrente e secadas com fluxo de ar quente gerado por um secador elétrico portátil para garantir a remoção da umidade da superfície. As microestruturas reveladas no ataque foram observadas no microscópio óptico, onde foram feitos registros através do *software* LAS Core de 100, 200, e 500x. Posteriormente, essa análise foi aprofundada com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) ZEISS EVO MA10, sendo feitos registros mais detalhados da microestrutura utilizando o *software* Smart SEM, com aumentos de 1000, 2500 e 5000x. Para as amostras da peça fabricada por FDM foi feita uma análise por Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS) para melhor compreensão da microestrutura revelada, pois é uma técnica que, em conjunto com o MEV, identifica a composição elementar de materiais em uma amostra.

4.4 Microdureza Vickers

Por fim, as amostras foram submetidas a uma análise de microdureza Vickers, utilizando o microdurômetro Qness 60 A+ EVO e o *software* Qpix Control2. Para tal, a ponta piramidal do equipamento é pressionada contra a superfície do material, a qual deve estar polida para uma medida precisa, para medir a dureza em função da resistência ao contato. Foi criado um padrão de três linhas com dez pontos de aplicação de carga em cada, totalizando 30 pontos de indentação. A carga aplicada foi de 0,05 kgf e a dureza é determinada com base no tamanho da impressão deixada pela ponta de diamante. Os valores de dureza obtidos são expressos em HV. Os perfis de microdureza Vickers obtidos serão analisados em função do tipo de microestrutura formada em cada técnica de manufatura estudada para o aço inoxidável 316L.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos das análises descritas no capítulo anterior, exibindo as diferenças microestruturais resultantes dos distintos processos de manufatura para o aço inoxidável 316L.

5.1 Rugosidade superficial

A Figura 5.1 representa os valores de rugosidade obtidos para a peça fabricada por MA via SLM, assim como o acabamento superficial da peça. Os valores de Ra representam a rugosidade geral da superfície, a média entre as distâncias verticais e a linha média das marcações feitas no comprimento medido. Rt determina a máxima variação medida da superfície. Para cada face analisada, os valores analisados, paralelo e transversal à passagem do laser na face A e paralelo e transversal à construção das camadas na face B, não apresentam grandes variações entre si. Na face A, os valores de Ra foram de 6,93 e de 7,21 μm , enquanto na face B foram de 9,04 e de 8,29 μm , com altos valores de Rt. A imagem à direita na Figura 5.1 é um registro feito na lupa para a superfície A e apresenta uma rugosidade aparente do sentido do feixe do laser. Assim, os valores obtidos para a rugosidade são representativos para a superfície analisada, pois, quanto maior os valores de Ra, mais rugosa é a superfície. Chen et al. (2023) encontraram um Ra de 15,19 μm para o aço inoxidável 316L em seu trabalho sobre o efeito da refusão a laser camada por camada.

Face	Sentido	Ra (μm)	Rt (μm)
A	Paralelo	6,93	50,13
	Transversal	7,21	58,83
B	Paralelo	9,04	69,21
	Transversal	8,29	62,04

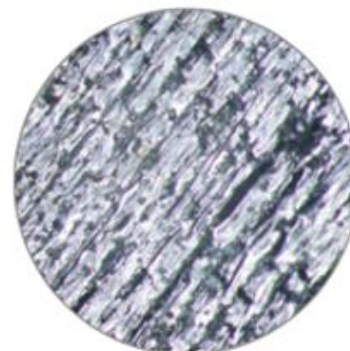


Figura 5.1 Valores Ra e Rt obtidos no rugosímetro e, na direita, o acabamento superficial da face A da peça fabricada via SLM.

Fonte: a Autora.

Na peça fabricada por manufatura aditiva via FDM, a face A não é representativa da peça gerada após a sinterização, pois a peça analisada passou por um processo de usinagem. Os valores médios, representados na Figura 5.2, obtidos para a face A no sentido longitudinal do comprimento foram $R_a = 0,35 \mu\text{m}$ e $R_t = 6,29 \mu\text{m}$, enquanto no sentido transversal os valores ficaram em $R_a = 1,10 \mu\text{m}$ e $R_t = 9,58 \mu\text{m}$. A face B, no entanto, representada na imagem à direita na Figura 5.2, mostra a lateral do corpo de prova e a superfície resultante da deposição do filamento em camadas. A análise foi feita apenas no sentido longitudinal, pois a peça possui uma espessura menor que o comprimento de 4 mm ajustado no equipamento e padrão para a análise deste trabalho. O valor médio de rugosidade obtido para essa face foi de $R_a = 3,68 \mu\text{m}$ e $R_t = 34,00 \mu\text{m}$.

Face	Sentido	$R_a (\mu\text{m})$	$R_t (\mu\text{m})$
A	Longitudinal	0,35	6,29
	Transversal	1,10	9,58
B	Longitudinal	3,68	34,00

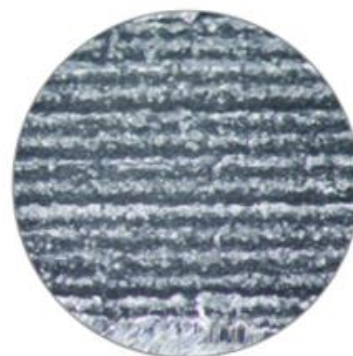


Figura 5.2 Valores R_a e R_t obtidos no rugosímetro e, na direita, o acabamento superficial da face B da peça fabricada via FDM.

Fonte: a Autora

Por fim, a análise realizada na peça fabricada pelo processo de laminação resultou em baixos valores de rugosidade, de $R_a = 0,86 \mu\text{m}$ e $R_t = 7,13 \mu\text{m}$ para o sentido longitudinal da medição e de $R_a = 0,90 \mu\text{m}$ e $R_t = 6,90 \mu\text{m}$ para o sentido transversal, coerentes com o acabamento superficial observado na Figura 5.3.

Face	Sentido	Ra (μm)	Rt (μm)
A	Longitudinal	0,86	7,13
	Transversal	0,90	6,90

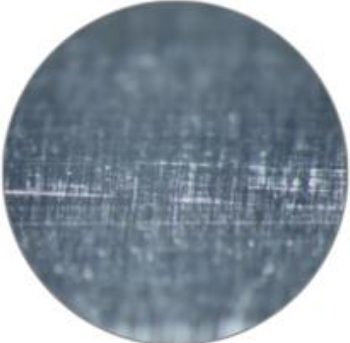


Figura 5.3 Valores Ra e Rt obtidos no rugosímetro e, na direita, o acabamento superficial da face A da peça fabricada por laminação.

Fonte: a Autora.

Os valores obtidos nas medições foram coerentes com os acabamentos superficiais observados, tanto para as peças de MA quanto para a produzida por laminação. As peças fabricadas por manufatura aditiva apresentam maior rugosidade em comparação com a peça fabricada por laminação.

5.2 Análise de porosidade

Os resultados das análises de porosidade foram obtidos com auxílio do *software ImageJ*, onde foram calculados os tamanhos dos poros e a área total ocupada por eles. Na Figura 5.4 é possível observar a porosidade resultante do processo de manufatura aditiva via SLM, em um aumento de 100x, para os cortes longitudinal, transversal e normal à direção de deposição das camadas. Os três cortes apresentaram porosidade homogênea entre si. Os pequenos poros esféricos distribuídos pela amostra podem ser poros de gás, atribuídos à atomização gasosa do aço inoxidável 316L para formação do pó metálico, os quais seguem no material até o final do processo (SUN et al., 2016). Por outro lado, poros de formatos não esféricos podem estar relacionados com os parâmetros de impressão, como a energia do laser, que pode ser insuficiente para fundir completamente o pó, levando à falta de fusão entre as camadas e as varreduras do laser. Essa disposição da porosidade também foi encontrada por Sun et al. (2016) em seu trabalho sobre aço inoxidável 316L produzido via SLM com baixa porosidade e altas taxas de produção. Yusuf et al. (2017) encontraram um padrão de poros alinhados na direção de fabricação da peça quando analisado o corte longitudinal da amostra, atribuindo à possível formação de inclusões, como óxidos, presentes na solidificação da poça de fusão.

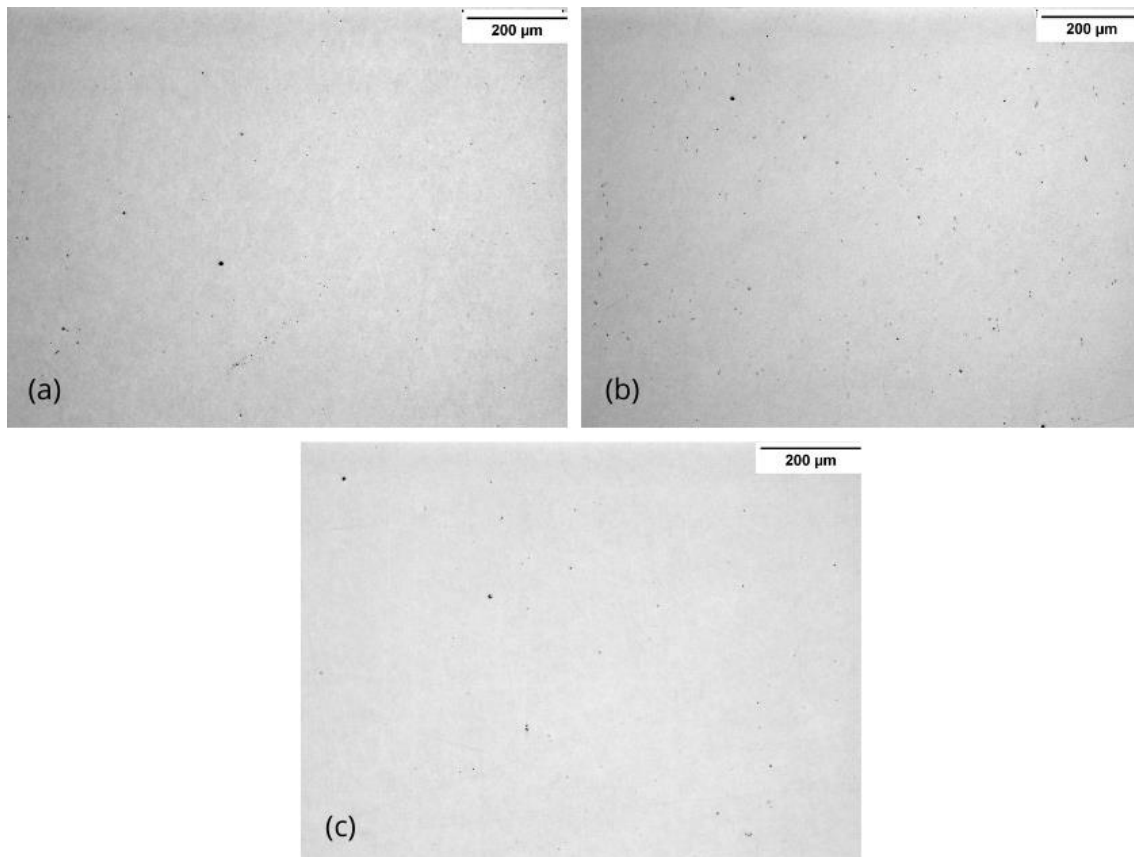


Figura 5.4 Porosidade resultante do processo de manufatura aditiva via SLM para os cortes (a) longitudinal, (b) normal e (c) transversal.

Fonte: a Autora.

A porosidade média calculada para a amostra de aço inoxidável 316L produzida via SLM foi de $0,22\% \pm 0,03\%$, ou seja, foi obtido um alto nível de densificação ($\geq 99\%$) no processo. Na Figura 5.5, está representada a distribuição média dos poros, considerando os três cortes realizados, em função do tamanho. Em média, 92% dos poros contabilizados têm área menor que $5 \mu\text{m}$, enquanto poros grandes ($>35 \mu\text{m}$) representam 2% do total. Murphy-Leonard et al. (2021) encontraram valores de porosidade resultante de 0,18% e de 0,43% para amostras fabricadas com os mesmos parâmetros de impressão. Yusuf et al. (2017) obtiveram $0,82\% \pm 0,36\%$ de porosidade média para o aço inoxidável 316L, com 60% dos poros com área menor que $5 \mu\text{m}$ cada, e poros maiores que $30 \mu\text{m}$ representando 3% do total.

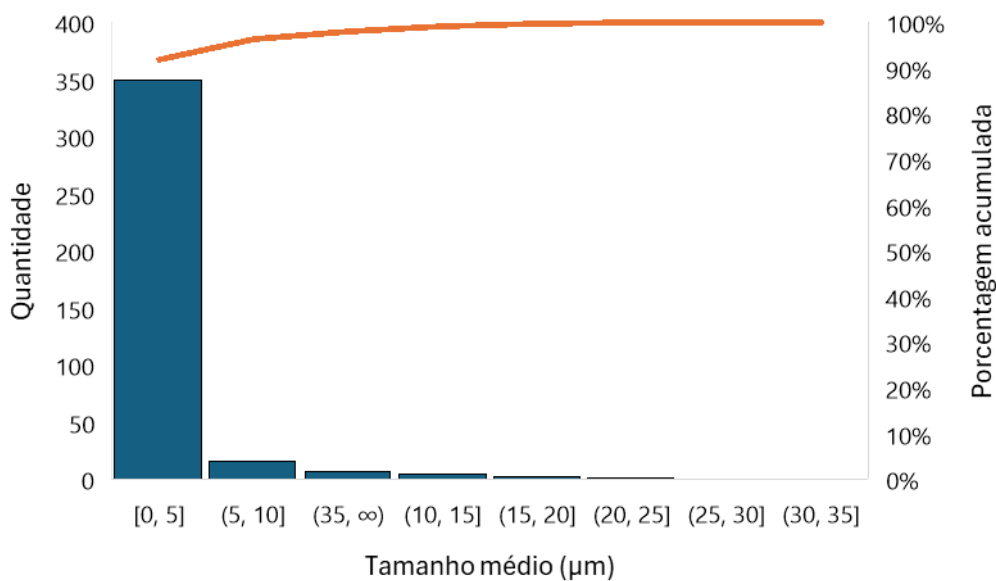


Figura 5.5 Distribuição do tamanho médio dos poros da peça produzida via SLM.

Fonte: a Autora.

Na amostra obtida por manufatura aditiva via FDM são encontrados dois tipos distintos de poros, como é possível observar na Figura 5.6. Poros relativamente grandes são resultado da estratégia de deposição do material e aparecem entre filamentos depositados de forma adjacente. Na camada analisada na Figura 5.6(a), a qual representa um corte longitudinal do corpo de prova, esses grandes poros se encontram em linhas verticais entre os filamentos depositados. No entanto, é possível observar poros relativamente menores transversalmente distribuídos, indicando que a camada seguinte pode ter sido depositada com um ângulo de 90° em relação à anterior, reproduzindo a mesma sequência de poros entre os filamentos. A Figura 5.6(b) representa o corte normal em relação à deposição das camadas de impressão e é possível notar a diminuição no tamanho dos poros entre os filamentos depositados. Essa maior densificação da amostra pode estar relacionada com o fato dessa superfície ter passado por um processo de usinagem.

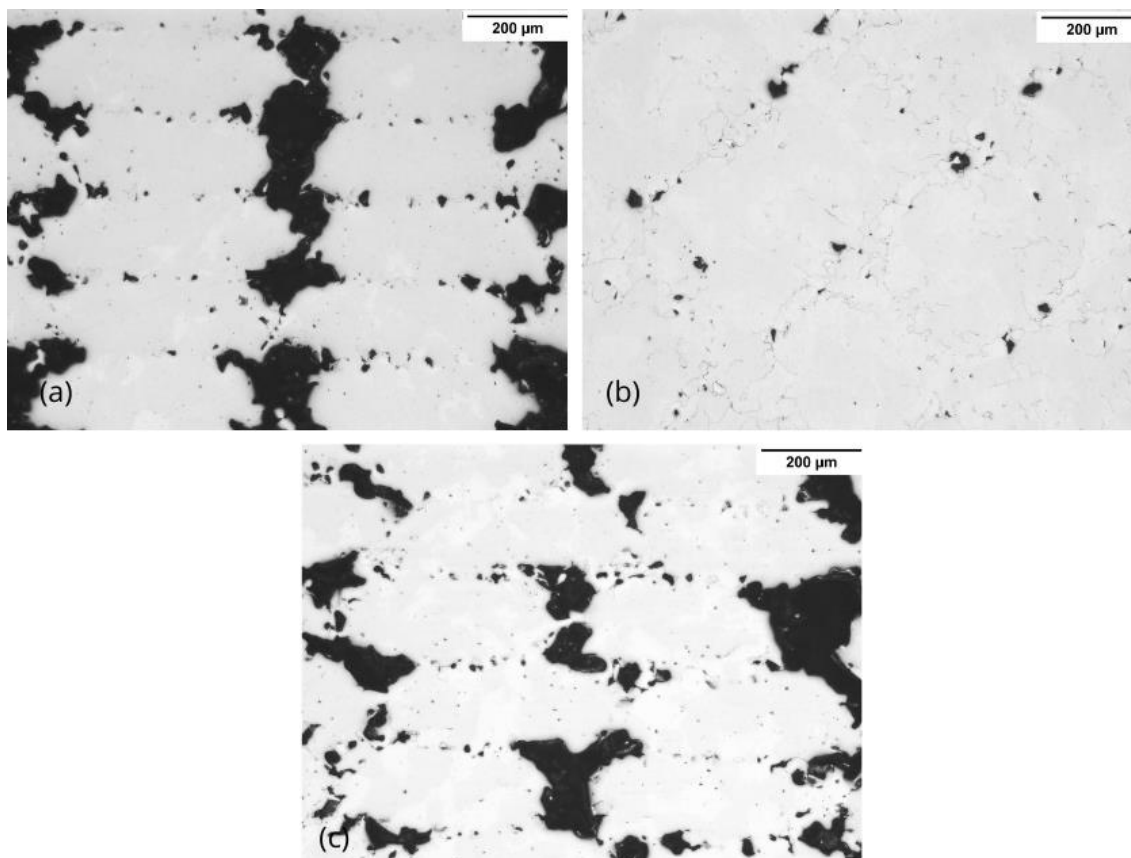


Figura 5.6 Porosidade resultante do processo de manufatura aditiva via FDM para os cortes (a) longitudinal, (b) normal e (c) transversal.

Fonte: a Autora.

A distribuição dos poros é bastante semelhante nos cortes longitudinal e transversal, ambas contabilizando aproximadamente 20% de porosidade na amostra fabricada via FDM. Esse valor, no entanto, baixa para 1,5% na análise dos poros do corte normal. Na Figura 5.7, está representada a distribuição do tamanho médio dos poros em função da quantidade. Os poros grandes, com áreas maiores que 35 μm , contabilizam 23% da quantidade total de poros, enquanto os poros pequenos, menores que 5 μm , são a maioria, e representam aproximadamente 64% dos poros. Poros pequenos, de poucos microns de tamanho, e distribuídos de forma aleatória são provenientes do processo de sinterização. A porosidade média obtida na amostra foi de $13,78\% \pm 8,24\%$. Considerando o alto desvio padrão obtido, pode-se assumir que a densificação total da amostra está de acordo com os valores encontrados na literatura. Sadaf (2021) obteve em seu trabalho aproximadamente 93% de densificação para uma amostra do aço inoxidável 316L fabricado via FDM após a sinterização. Raza et al. (2024) compararam a porosidade relativa de peças de 316L sujeitas a sinterização em atmosfera de argônio e à vácuo,

obtendo 9,8% de porosidade para a amostra sinterizada em atmosfera de argônio e 3,5% para a amostra sinterizada à vácuo. Como resultado, amostras ao argônio são relativamente mais dúcteis do que as amostras ao vácuo.

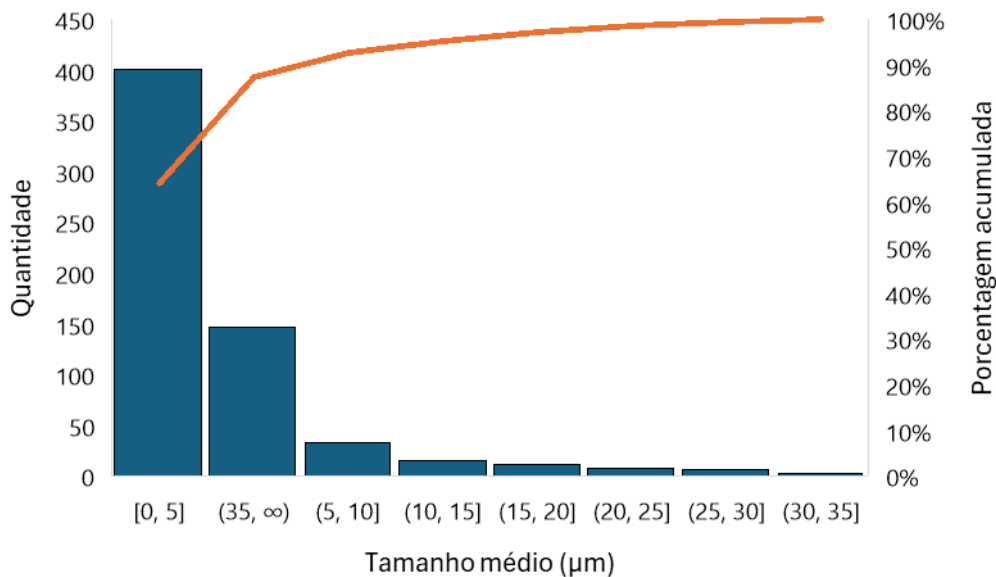


Figura 5.7 Distribuição do tamanho médio dos poros da peça produzida via FDM.

Fonte: a Autora.

A título de comparação, a análise de porosidade obtida para o material laminado é mostrada na Figura 5.8, onde é possível observar poros e precipitados alongados na direção da laminação do material na vista longitudinal.

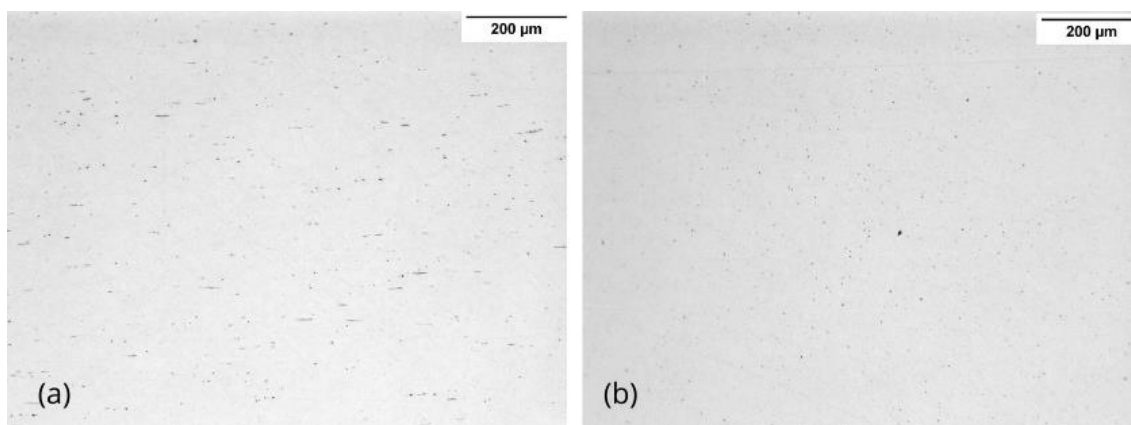


Figura 5.8 Porosidade resultante do processo de laminação para os cortes (a) longitudinal e (b) transversal.

Fonte: a Autora.

A Tabela 5.1 apresenta a comparação entre os valores de porosidade total para cada processo de manufatura com os respectivos desvios padrão. É possível observar que há uma maior densificação da peça fabricada pelo método de manufatura aditiva SLM em relação ao processo convencional de laminação e, principalmente, em relação ao processo de manufatura aditiva via FDM.

Tabela 5.1 Valores de porosidade total obtidos para os processos de manufatura analisados.

Processo	Porosidade média (%)	Desvio padrão
SLM	0,22	0,03
FDM	13,72	8,24
Convencional	0,41	0,05

Fonte: a Autora.

5.3 Microestrutura

As microestruturas obtidas para os três cortes da peça fabricada por SLM foram reveladas após o ataque e observadas em MO e MEV, a fim de entender o comportamento da solidificação das poças de fusão. Estão representadas as imagens das vistas longitudinal (Figura 5.9), transversal (Figura 5.10) e normal (Figura 5.11) à direção de impressão da peça em aumentos de 200 e 500x vezes no microscópio óptico. A microestrutura é formada quase totalmente pela fase austenita (γ). É possível observar o efeito da passagem do laser formando poças de fusão na microestrutura. Esse padrão é formado devido ao gradiente de temperatura causado pela passagem do laser que acaba fundindo novamente parte das poças de fusão formadas na varredura anterior. Grãos colunares são observados na Figura 5.9(a), mostrando uma certa heterogeneidade e anisotropia cristalográfica, os quais crescem na direção do gradiente de temperatura, isto é, devido ao rápido movimento do feixe de laser, são gerados enormes gradientes de temperatura e diferentes taxas de solidificação nas poças de fusão, como foi explicado por Saeidi et al. (2015). Como o laser está sempre exposto na superfície da peça sólida, esses grãos colunares podem crescer através dos contornos das poças de fusão, como mostra a Figura 5.9(b).

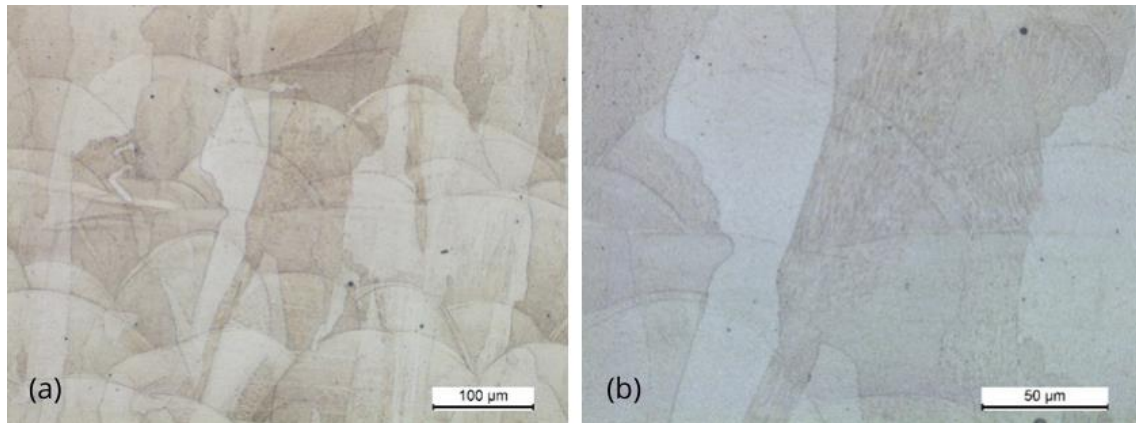


Figura 5.9 Microestrutura analisada em MO do corte longitudinal da peça produzida via SLM em (a) 200 e (b) 500x.

Fonte: a Autora.

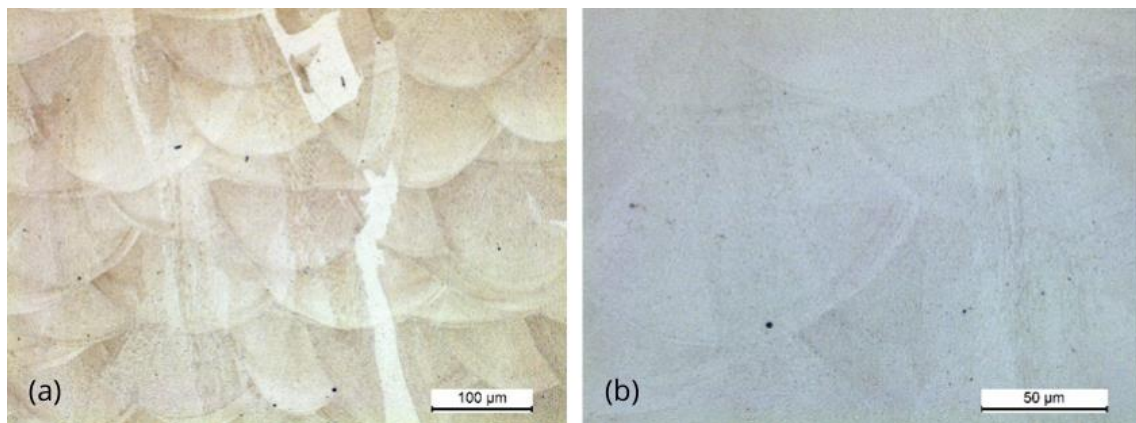


Figura 5.10 Microestrutura analisada em MO do corte transversal da peça produzida via SLM em (a) 200 e (b) 500x.

Fonte: a Autora.

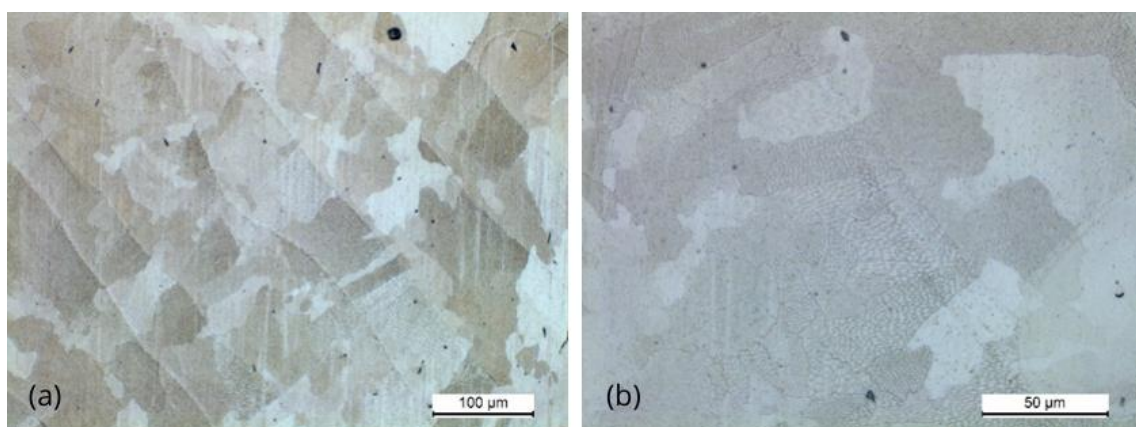


Figura 5.11 Microestrutura analisada em MO do corte normal da peça produzida via SLM em (a) 200 e (b) 500x.

Fonte: a Autora.

Também foi revelada uma estrutura de subgrãos dentro dos contornos de grãos maiores. Nas imagens de MEV (Figura 5.12 a 5.14) é possível observar essa estrutura em maiores aumentos. Dentro de cada grão são observados conjuntos de subgrãos, podendo ser alongados ou em formato equiaxial. Aparentemente, a orientação cristalográfica desses subgrãos segue a orientação cristalográfica dos grãos em que estão contidos. Dessa forma, grãos colunares apresentam subgrãos colunares alongados, enquanto grãos de aparência equiaxial, que estariam crescendo de forma transversal ao corte, contêm grãos de formato equiaxial, celulares. Portanto, é possível deduzir, através da vista longitudinal, que os subgrãos são influenciados pelo gradiente de temperatura, ficando com esse padrão colunar alongado paralelo à direção de construção da peça. Esse arranjo possui uma característica intragranular, ou seja, não pode ser interpretada como grãos, pois as células adjacentes possuem quase a mesma orientação cristalográfica (ZHONG et al., 2016). De acordo com Saeidi et al. (2015), provavelmente essa estrutura é formada em função da flutuação da composição resultante da cinética lenta da liga homogênea de átomos grandes de elementos mais pesados, e esses subgrãos estão confinados dentro de cada grão grande. Esses subgrãos possuem tamanhos variados dependendo da região, como é possível ver na Figura 5.13(b), mas sem exceder o tamanho 2 μm , aproximadamente. Liverani et al. (2017), chegaram à mesma conclusão quanto ao tamanho dessas células dos subgrãos em seu trabalho. Zhong et al. (2016), no entanto, acreditam que a formação dessa estrutura ainda é um ponto a ser discutido, pois o processo de manufatura aditiva via SLM envolve condições de fusão e de solidificação muito rápidas, as quais estão longe das condições de equilíbrio.

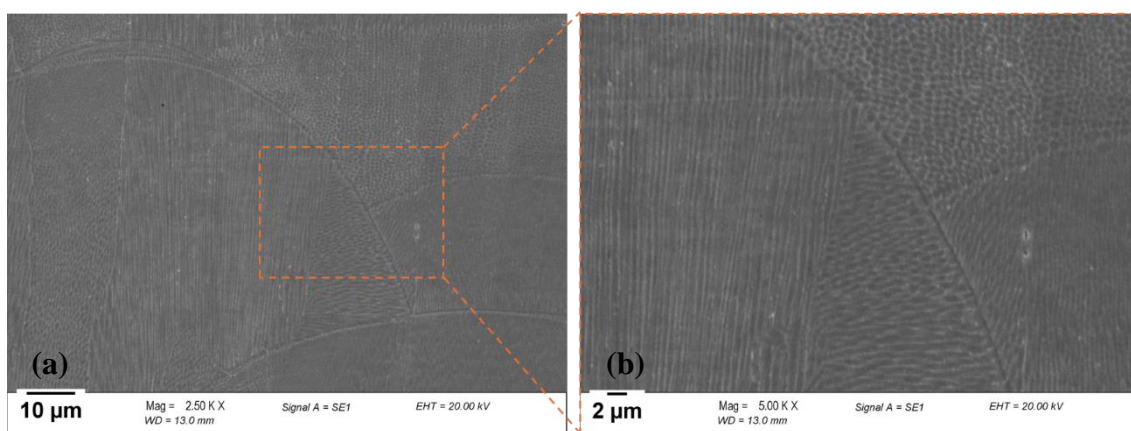


Figura 5.12 Microestrutura analisada em MEV do corte longitudinal da peça produzida via SLM em (a) 2500 e (b) 5000x.

Fonte: a Autora.

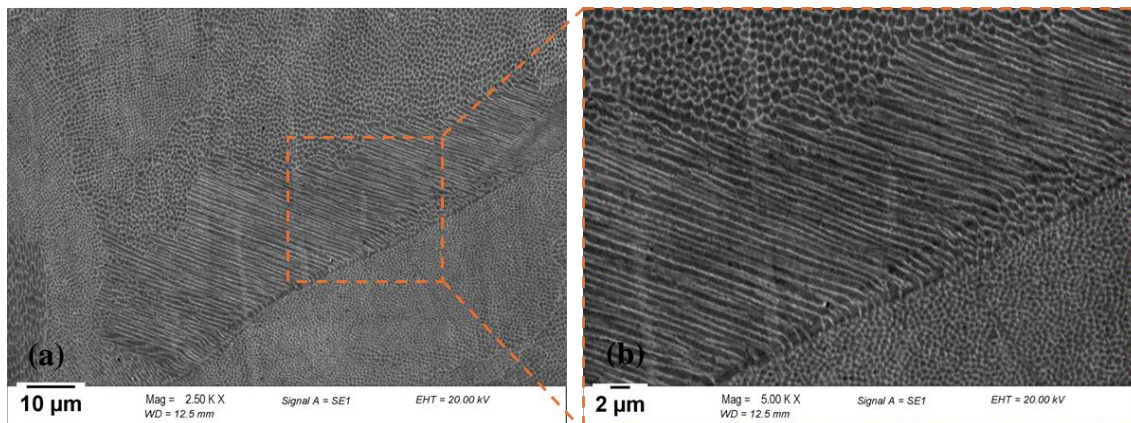


Figura 5.13 Microestrutura analisada em MEV do corte normal da peça produzida via SLM em (a) 2500 e (b) 5000x.

Fonte: a Autora.

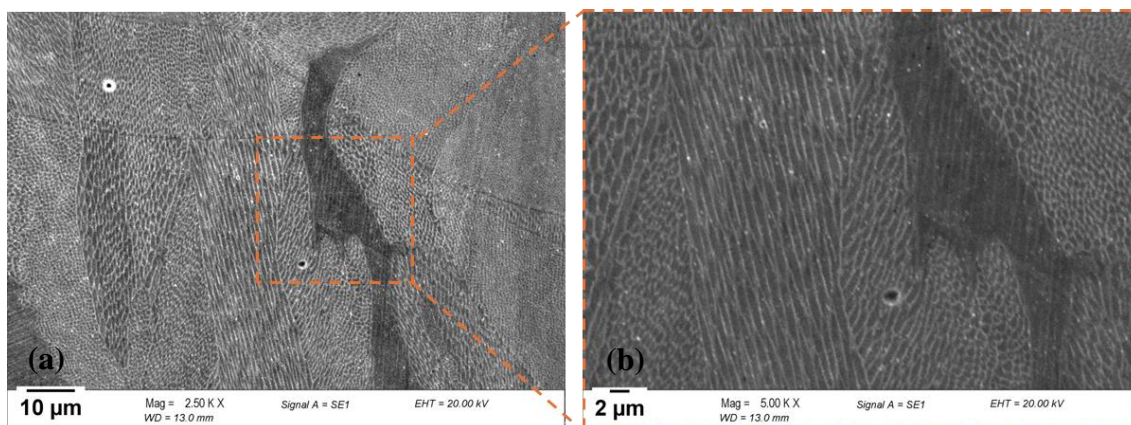


Figura 5.14 Microestrutura analisada em MEV do corte transversal da peça produzida via SLM em (a) 2500 e (b) 5000x.

Fonte: a Autora.

Nas microestruturas reveladas da peça fabricada via FDM (Figuras 5.15 a 5.17), é possível observar falhas nos contornos dos grãos, os quais são equiaxiais. São visíveis as cavidades resultantes do padrão de deposição do filamento, assim como os poros oriundos do processo de sinterização, formados no encontro dos grãos. Os grãos claros equiaxiais são austeníticos, como esperado para o aço inoxidável 316L. Há, no entanto, a presença marcante de uma estrutura lamelar intragranular, assim como nos contornos de grão. Essa estrutura diverge das encontradas na literatura para o aço 316L produzido via FDM e sinterizado em atmosfera de argônio (RAMAZANI, 2022, JIANG, 2022).

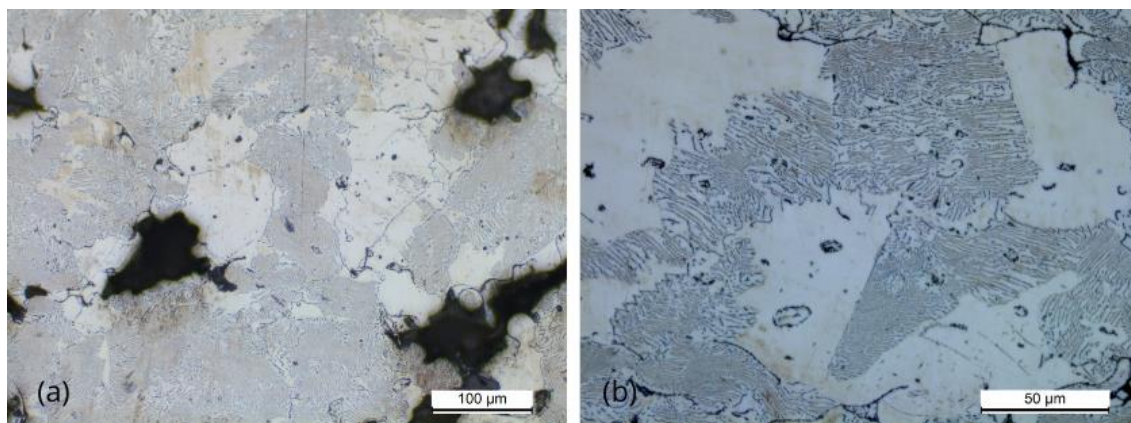


Figura 5.15 Microestrutura analisada em MO do corte longitudinal da peça produzida via FDM em (a) 200 e (b) 500x.

Fonte: a Autora.

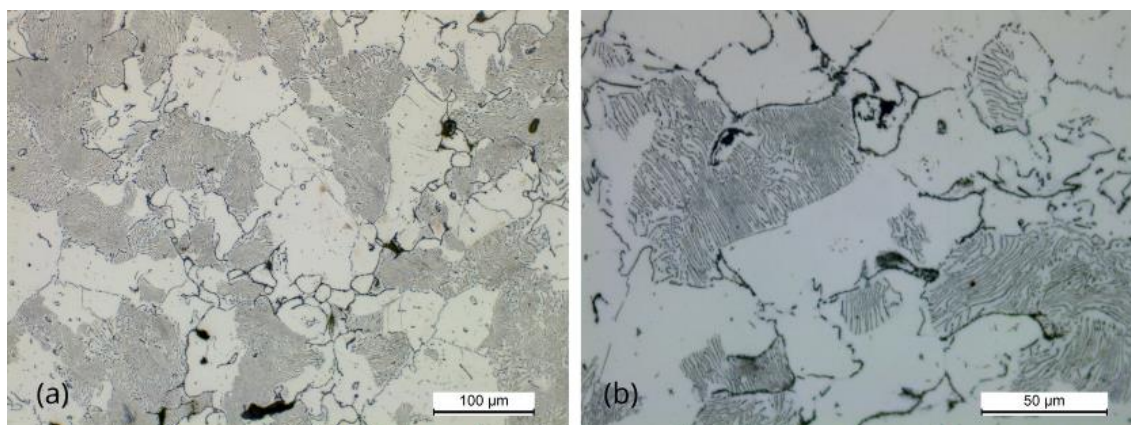


Figura 5.16 Microestrutura analisada em MO do corte normal da peça produzida via FDM em (a) 200 e (b) 500x.

Fonte: a Autora.

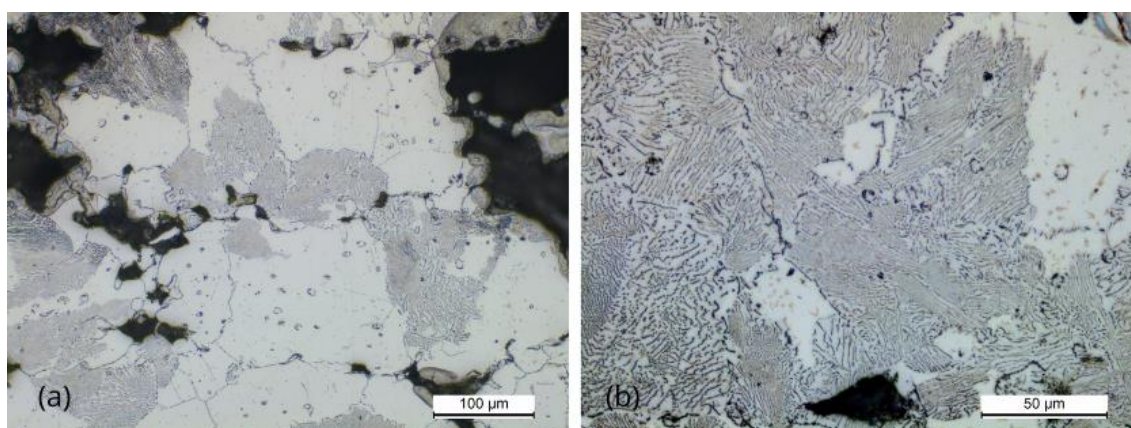


Figura 5.17 Microestrutura analisada em MO do corte transversal da peça produzida via FDM em (a) 200 e (b) 500x.

Fonte: a Autora.

As Figuras 5.18-20 mostram as análises do MEV para as amostras fabricadas via FDM. Na Figura 5.19(a), do corte normal em 2500x de aumento, é possível observar as maclas de recozimento no canto inferior esquerdo, provavelmente provenientes do processo de usinagem a que o material foi submetido pós sinterização, principalmente por essa análise estar tão próxima da superfície da peça. Em todas as figuras observa-se a estrutura lamelar e os contornos de grãos com falhas. É possível deduzir que essa estrutura se trata de um precipitado, que se forma em lamelas e nos contornos dos grãos. Esse padrão intragranular nos grãos de austenita será discutido com o auxílio de uma análise por EDS, a fim de entender a composição química desse precipitado.

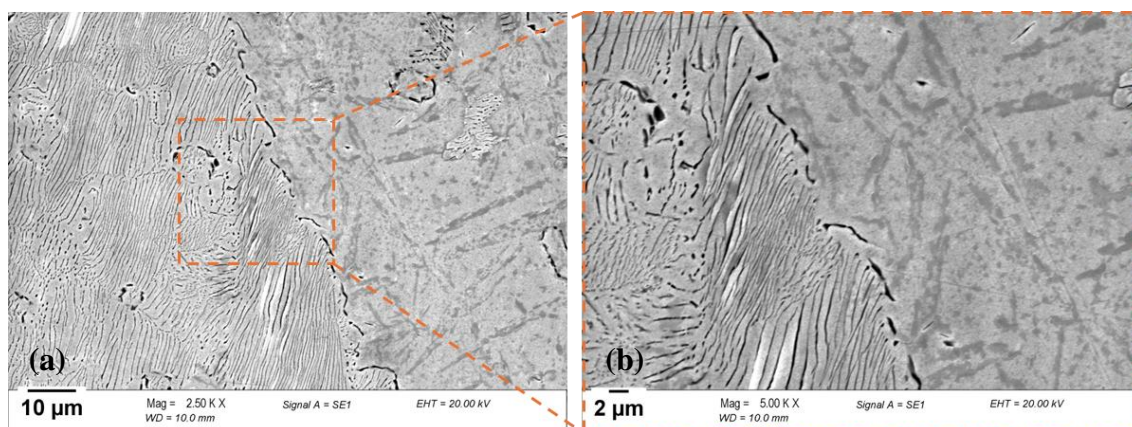


Figura 5.18 Microestrutura analisada em MEV do corte longitudinal da peça produzida via FDM em (a) 2500 e (b) 5000x.

Fonte: a Autora.

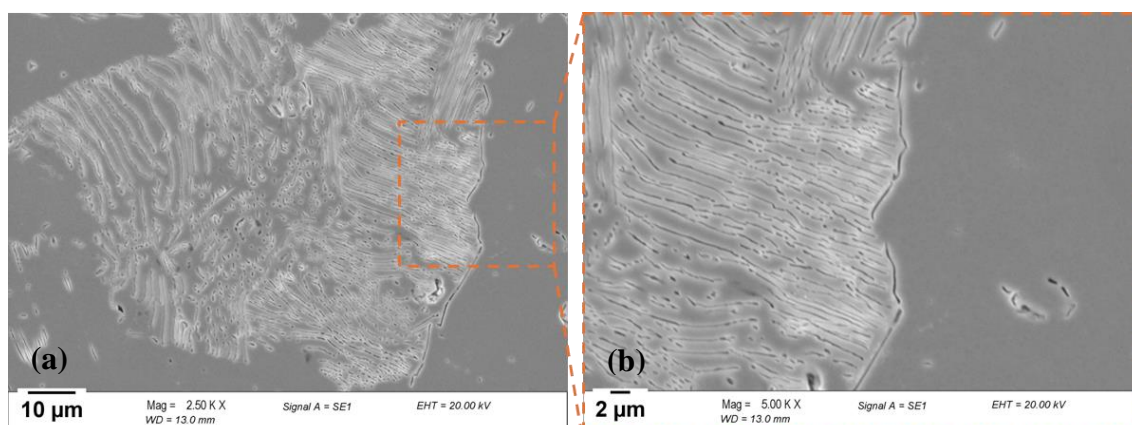


Figura 5.19 Microestrutura analisada em MEV do corte normal da peça produzida via FDM em (a) 2500 e (b) 5000x.

Fonte: a Autora.

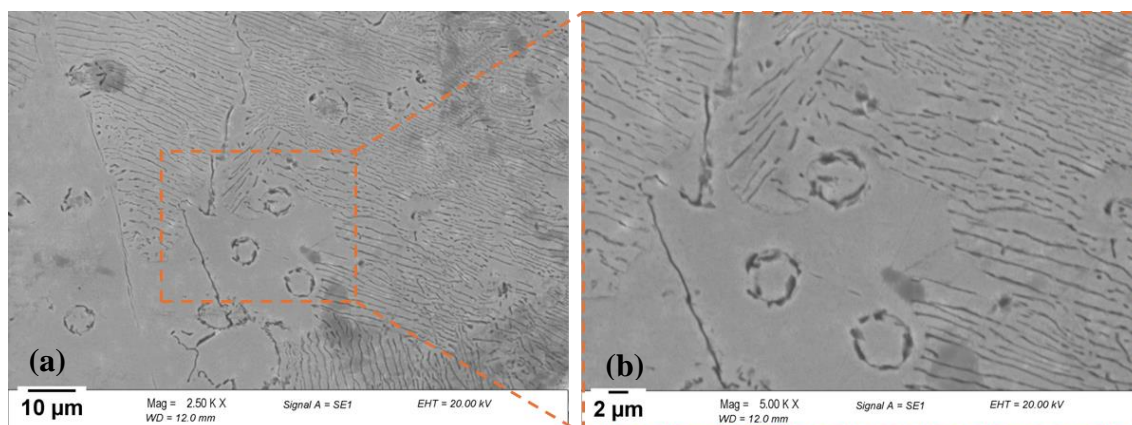


Figura 5.20 Microestrutura analisada em MEV do corte transversal da peça produzida via FDM em (a) 2500 e (b) 5000x.

Fonte: a Autora.

De acordo com a análise realizada via EDS, na Figura 5.21, esse padrão intragranular é rico em cromo (Figura 5.21(c)). Considerando que a sinterização foi realizada em atmosfera controlada de nitrogênio e hidrogênio e, de acordo com a literatura, é possível que esses precipitados sejam nitretos de cromo (Cr_2N). De acordo com Shvab et al. (2013), a sinterização de aços inoxidáveis em atmosfera contendo nitrogênio acarretam a absorção de nitrogênio pelo material, devido à alta afinidade do cromo pelo nitrogênio. Essa estrutura compreende lamelas alternadas desse precipitado rico em cromo e da matriz austenítica. Além disso, esse precipitado é observado nos contornos dos grãos. Ainda segundo Shvab et al. (2013), esse precipitado específico é consequência de uma baixa taxa de resfriamento na sinterização, pois a absorção do nitrogênio durante o resfriamento aumenta com o aumento da saturação da atmosfera de sinterização. García et al. (2009), também relataram encontrar essa estrutura lamelar para o aço inoxidável 316L sinterizado em atmosfera de nitrogênio em seu trabalho sobre a influência dessa atmosfera de sinterização nos aços inoxidáveis. No entanto, essa estrutura necessita de análises mais aprofundadas quanto a sua composição e condições de formação.

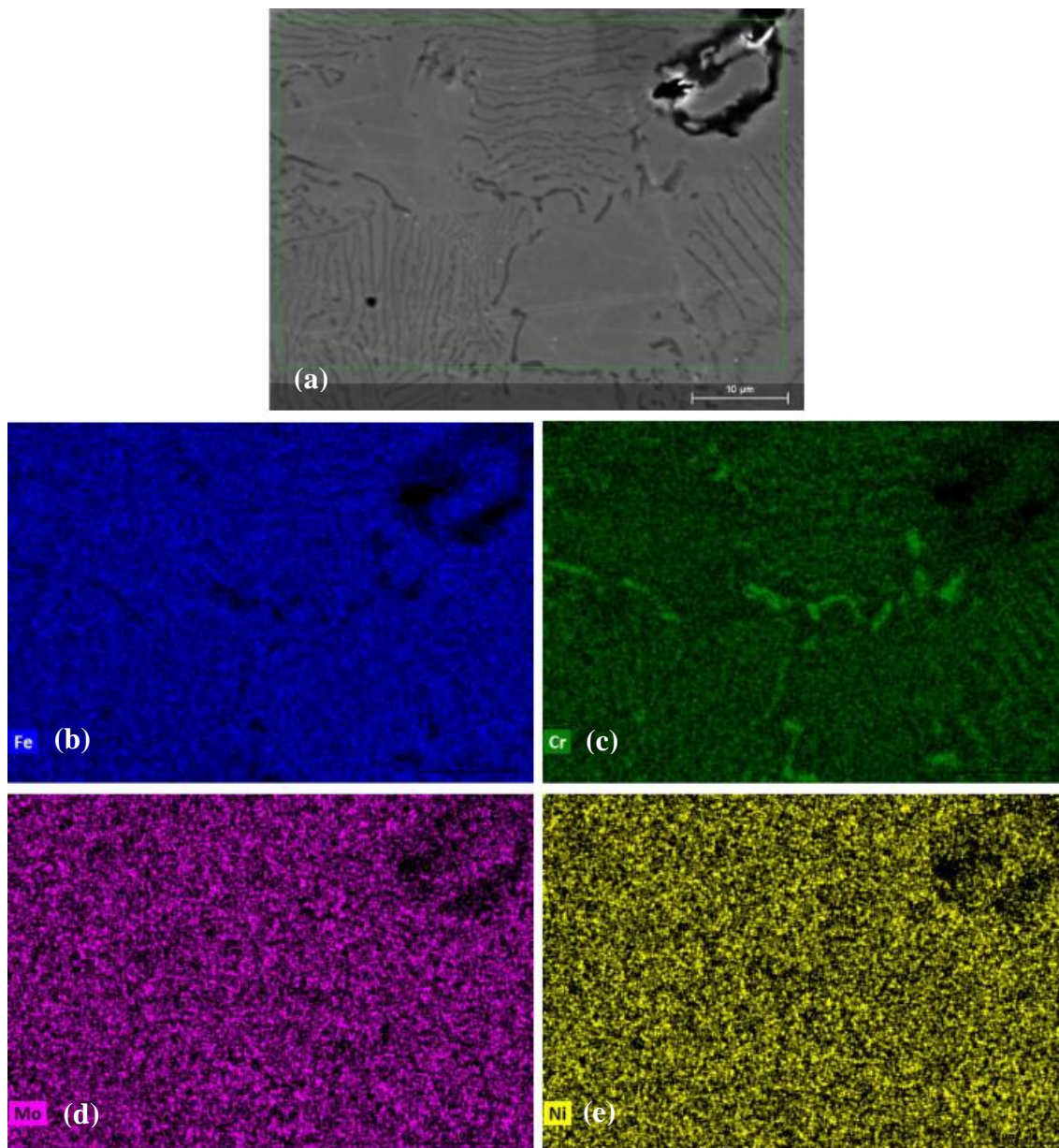


Figura 5.21 Análise de MEV-EDS do corte transversal da amostra produzida via FDM. (a) Imagem de elétrons secundários da região analisada e mapa dos elementos (b) Fe, (c) Cr, (d) Mo e (e) Ni.

Fonte: a Autora.

Para a peça produzida via processo de laminação (Figura 5.22-23), a microestrutura revelada apresenta contornos de grãos equiaxiais austeníticos finos, em função do baixo teor de carbono, que reduz a sensitização dos carbonetos de cromo nos contornos de grão. Nem todos os contornos de grão estão visíveis, o que pode ser em função do agente escolhido para o ataque. Também é possível observar uma grande quantidade de maclas de recozimento. Na vista longitudinal, é possível distinguir algumas bandas de ferrita- δ , orientadas na direção da laminação, como foi encontrado por Tiedra

(2013), resultantes da tensão residual do processo de conformação, que são geradas em função da segregação dos elementos que promovem a formação da ferrita durante a solidificação, como o cromo.

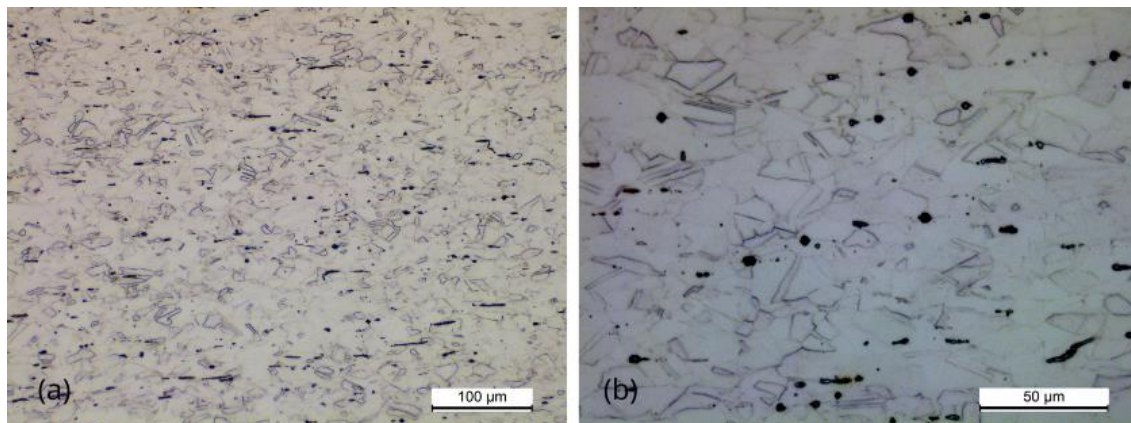


Figura 5.22 Microestrutura analisada em MO do corte longitudinal da peça produzida por laminação em (a) 200 e (b) 500x.

Fonte: a Autora.

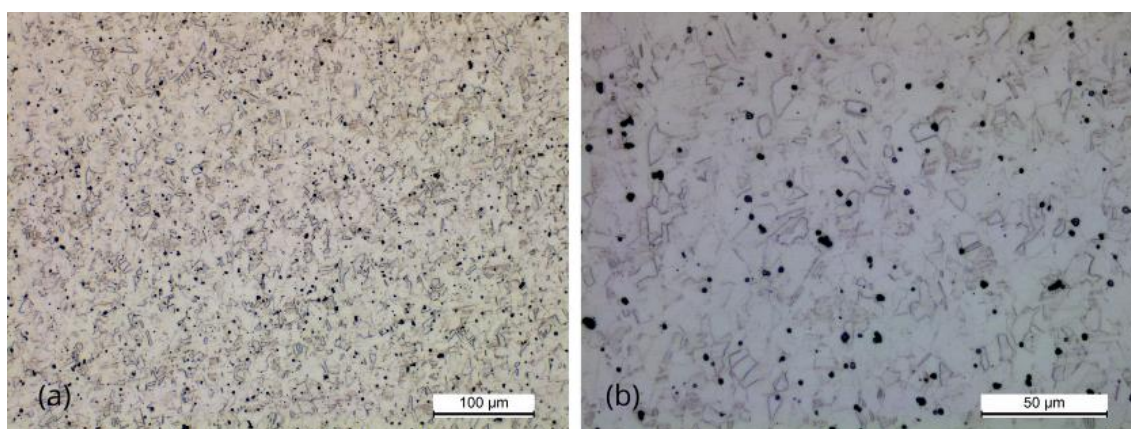


Figura 5.23 Microestrutura analisada em MO do corte transversal da peça produzida por laminação em (a) 200 e (b) 500x.

Fonte: a Autora.

A análise realizada em MEV para a amostra transversal confirma as informações encontradas no MO, onde é possível observar pouca definição dos contornos de grão e maclas de recozimento (Figura 5.24). Em termos comparativos de microestrutura, é possível admitir que as semelhanças entre as microestruturas obtidas nos três processos analisados não são muitas, além da matriz austenítica do aço inoxidável 316L.

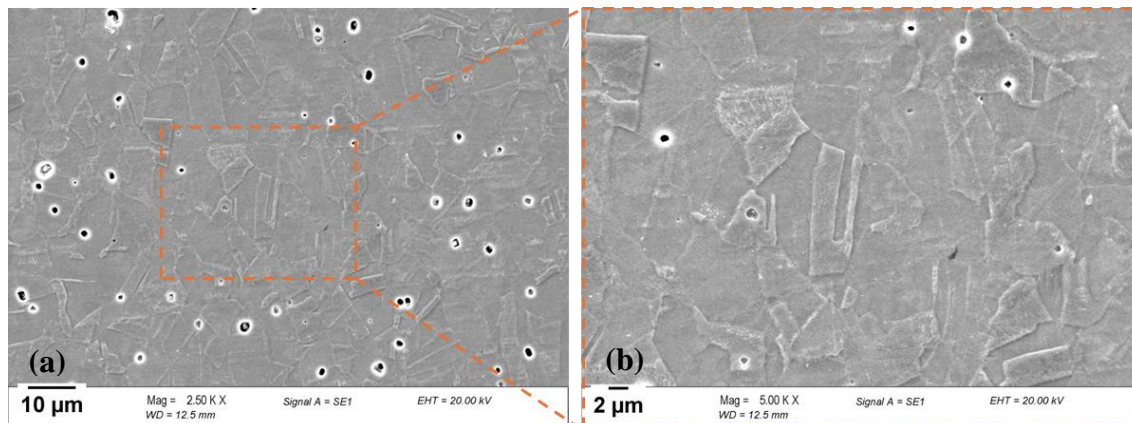


Figura 5.24 Imagens de MEV do corte transversal da amostra produzida por laminação em (a) 2500 e (b) 5000x.

Fonte: a Autora.

5.4 Microdureza Vickers

A microdureza Vickers das amostras foi medida em um padrão de três linhas com dez indentações em cada linha. A Tabela 5.2 mostra os valores médios obtidos para os trinta pontos de cada amostra, considerando os cortes longitudinal, transversal e normal. Para o processo de laminação, foi escolhido um corte para realizar a análise de dureza a fins de comparação.

Tabela 5.2 Valores de dureza obtidos para as amostras fabricadas por manufatura aditiva SLM e FDM e por laminação.

Técnica	Corte	Dureza média (HV)	Desvio padrão	Dureza mínima (HV)	Dureza máxima (HV)
SLM	Transversal	242	12	213	264
	Longitudinal	251	13	223	278
	Normal	242	11	219	262
FDM	Transversal	232	34	170	301
	Longitudinal	234	44	148	351
	Normal	303	71	203	456
Laminação	Transversal	286	12	256	314

Fonte: a Autora.

Para a técnica de MA via SLM, foi obtido 242 ± 12 HV para o corte transversal, 251 ± 13 HV para o corte longitudinal e 242 ± 11 HV para o corte normal, mostrando um certo padrão de dureza sem grandes variações de valores, considerando que esse padrão é respeitado para os valores mínimos e máximos de dureza nas três vistas. A variação de valores pode estar relacionada com a existência de microporos, que afetam a densificação da amostra. Wang et al. (2016) encontraram um valor máximo de 281 HV para sua amostra de 316L fabricada via SLM. Liverani et al. (2017) compararam os valores de dureza da parte inferior (mais próxima da plataforma de impressão) e superior das amostras, variando a potência do laser aplicada, obtendo um valor médio máximo de aproximadamente 240 HV de dureza.

Nos cortes da amostra fabricada via FDM é possível notar altos valores de desvio padrão, em função das grandes variações de dureza obtidas. Os cortes transversal e longitudinal da amostra apresentaram valores similares de dureza, com 232 ± 34 HV para o corte transversal e 234 ± 44 HV para o corte longitudinal, com durezas que variam de 148 a 351 HV. No corte normal, no entanto, essa variação dos valores mínimo e máximo aumenta consideravelmente e o valor médio de dureza obtido é de 303 ± 71 HV. Conhecendo a porosidade resultante da amostra analisada e o nível de densificação, é possível deduzir que esses resultados sejam em função dos poros provenientes da sinterização e até mesmo dos vazios formados na deposição que podem levar o local onde foi aplicada a carga a ceder. Os valores mais altos, no entanto, podem estar relacionados com o fato de que as indentações realizadas nesse corte estão muito próximas da superfície, onde a peça apresenta maior densificação. Sadaf et al. (2021) obtiveram uma dureza Vickers média de $285,5 \pm 5,5$ HV para suas amostras de 316L fabricadas via SLM. Raza et al. (2024), comparando o efeito das atmosferas de sinterização, encontraram um valor de 200 HV para amostras sinterizadas a vácuo e 177 HV para peças sinterizadas em atmosfera de carbono.

A peça produzida por laminação apresentou maior dureza média entre os três processos, com mínima de 256 HV e máxima de 314 HV, a média sendo 286 ± 12 HV. Esse valor diverge do encontrado por Yusuf et al. (2017), de 192 HV para o 316L produzido por método convencional, em comparação com a dureza de 228 HV para a peça fabricada por SLM no mesmo trabalho, onde eles atribuem a maior dureza do material fabricado por SLM à microestrutura refinada obtida nas peças, resultando em uma maior densidade de discordâncias nas células de austenita.

6. CONCLUSÕES

Por meio das análises de caracterização realizadas neste estudo, foi possível comparar as características microestruturais e mecânicas das três amostras de aço inoxidável 316L produzidas por métodos de manufatura distintos.

Em questão macroscópica, os resultados obtidos através das medições realizadas no rugosímetro são coerentes com o aspecto superficial das peças. As peças fabricadas por manufatura aditiva apresentam traços do seu processamento. A superfície das peças produzidas pelo método de MA possui um aspecto rugoso, característico da construção de camadas, seja pela varredura do laser (SLM) ou pela deposição de filamento (FDM), em comparação com o acabamento da peça produzida laminação. Assim, a peça laminada apresentou valores baixos de rugosidade, $R_a = 0,86 \mu\text{m}$ no sentido longitudinal, enquanto as peças fabricadas por SLM e FDM apresentaram $R_a = 6,93 \mu\text{m}$ e $R_a = 3,68 \mu\text{m}$, respectivamente.

O processo de manufatura aditiva via FDM produz peças com alta porosidade e, coerentemente, a porosidade média calculada foi de $13,72 \% \pm 8,24$. Comparativamente, a peça produzida via SLM apresentou densificação $> 99\%$, com porosidade de $0,22\% \pm 0,03$, teor de porosidade ainda mais baixo do que o obtido no processo de laminação ($0,41\%$).

A microestrutura revelada para o processo de laminação foi característica do material, com grãos equiaxiais de austenita e maclas de recozimento. Para as técnicas de manufatura aditiva, no entanto, pode-se concluir que a microestrutura foi alterada de acordo com o processo utilizado. O material fabricado via SLM apresentou microestrutura austenítica, com poças de fusão visíveis e, para além delas, grãos austeníticos colunares que possuem subgrãos celulares e alongados. Nas amostras da peça fabricada pela técnica FDM foi observada uma matriz austenítica com grãos equiaxiais grosseiros com um precipitado rico em cromo disposto em estruturas lamelares e nos contornos de grãos.

De modo geral, o material produzido por laminação apresentou maior microdureza que os materiais fabricados por manufatura aditiva, com dureza média de $286 \pm 12 \text{ HV}$ no corte transversal. O componente fabricado via SLM apresentou maior uniformidade nos valores obtidos, com valor médio de $251 \pm 13 \text{ HV}$ para o corte longitudinal, enquanto o componente da FDM apresentou dureza média de $234 \pm 44 \text{ HV}$ para o mesmo corte.

Diante desses resultados, ressalta-se que a escolha do processo mais eficiente para a construção de uma peça de aço inoxidável 316L por manufatura aditiva deve ser definida com base nas características do projeto, principalmente em função da complexidade da geometria desejada e da viabilidade orçamentária.

7. TRABALHOS FUTUROS

A fim contribuir com o conhecimento acerca dos processos de manufatura aditiva de ligas metálicas, principalmente para o aço inoxidável 316L, e complementar alguns resultados obtidos nesse trabalho, sugere-se como trabalhos futuros:

- Realizar ensaios mecânicos nos corpos de prova, como ensaio de tração, para obtenção das propriedades mecânicas em função do método de fabricação de MA;
- Analisar e identificar as fases formadas nas diferentes técnicas de manufatura aditiva, a fim de compreender a sua influência no comportamento mecânico dos componentes;
- Investigar a influência dos parâmetros de impressão nas propriedades e no comportamento mecânico do material em função da microestrutura gerada na impressão 3D;
- Analisar a influência da atmosfera de sinterização na microestrutura das peças fabricadas por manufatura aditiva via FDM.

8. REFERÊNCIAS

AHMAD, M.; JAVAID, M.; HALEEM, A. A study on fused deposition modeling (FDM) and laser-based additive manufacturing (LBAM) in the medical field. **Intelligent Pharmacy**, v. 2, n. 3, p. 381–391, 2024.

ASTAFUROV, S.; ASTAFUROVA, E. Phase composition of austenitic stainless steels in additive manufacturing: A review. **Metals**, v. 11, n. 7, p. 1052, 2021.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM A312: Standard Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

BANKAPALLI, N. K. et al. Filament fabrication and subsequent additive manufacturing, debinding, and sintering for extrusion-based metal additive manufacturing and their applications: A review. **Composites. Part B, Engineering**, v. 264, n. 110915, p. 110915, 2023.

BASF 3D Printing Solutions GmbH, Ultrafuse 316L: Technical Data Sheet. v. 02, 2022.

BASF 3D Printing Solutions GmbH, Ultrafuse 316L: Process Instructions. 2021.

BHUVANESH KUMAR, M.; SATHIYA, P. Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. **Thin-walled structures**, v. 159, n. 107228, p. 107228, 2021.

BOSCHETTO, A. et al. Roughness investigation of steel 316L parts fabricated by Metal Fused Filament Fabrication. **Journal of manufacturing processes**, v. 81, p. 261–280, 2022.

CHEN, X. et al. Correction to: Effect of layer-by-layer laser remelting process on the microstructure and performance of selective laser melting 316L stainless steel. **The international journal of advanced manufacturing technology**, v. 129, n. 3–4, p. 1915–1915, 2023.

DE TIEDRA, P.; MARTÍN, Ó. Effect of welding on the stress corrosion cracking behaviour of prior cold worked AISI 316L stainless steel studied by using the slow strain rate test. **Materials in engineering**, v. 49, p. 103–109, 2013.

DEBROY, T. et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in materials science**, v. 92, p. 112–224, 2018.

DUTT, A. K. et al. Optimization of selective laser melting (SLM) additive manufacturing process parameters of 316L austenitic stainless steel. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v. 76, n. 2, p. 335–345, 2023.

DAVIS, J. R. **ASM specialty handbook: stainless steels**. ASM, 1994.

GARCÍA, C. et al. Influence of sintering under nitrogen atmosphere on microstructures of powder metallurgy duplex stainless steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 40, n. 2, p. 292–301, 2009.

GOMES, J. F. B.; WILTGEN, F. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas. **Revista tecnologia**, v. 41, n. 1, 2020.

GONG, H. et al. Comparison of stainless steel 316L parts made by FDM- and SLM-based additive manufacturing processes. **JOM (Warrendale, Pa.: 1989)**, v. 71, n. 3, p. 880–885, 2019.

HAMIDI, M. F. F. A. et al. Microstructural comparison and mechanical properties of stainless steel 316L fabricated by selective laser melting and metal injection moulding processes. **International journal of manufacturing technology and management**, v. 33, n. 1/2, p. 76, 2019.

HEMMASIAN ETTEFAGH, A.; GUO, S. Electrochemical behavior of AISI316L stainless steel parts produced by laser-based powder bed fusion process and the effect of post annealing process. **Additive manufacturing**, v. 22, p. 153–156, 2018.

Inc., 3D systems, LaserForm 316L (A). Tech. rep; 2022.

IORGA, S. et al. Influence of the Carbo-chromization process on the microstructural, hardness, and corrosion properties of 316L sintered stainless steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 45, n. 7, p. 3088–3096, 2014.

JL, C. H. et al. Sintering study of 316L stainless steel metal injection molding parts using Taguchi method: final density. **Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing**, v. 311, n. 1–2, p. 74–82, 2001.

JIANG, D.; NING, F. Anisotropic deformation of 316L stainless steel overhang structures built by material extrusion based additive manufacturing. **Additive manufacturing**, v. 50, n. 102545, p. 102545, 2022.

KALE, A. B. et al. An investigation of the corrosion behavior of 316L stainless steel fabricated by SLM and SPS techniques. **Materials characterization**, v. 163, n. 110204, p. 110204, 2020.

LARIMIAN, T. et al. Effect of laser spot size, scanning strategy, scanning speed, and laser power on microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated via selective laser melting. **Journal of materials engineering and performance**, v. 31, n. 3, p. 2205–2224, 2022.

LEGUTKO, S. Additive techniques of manufacturing functional products from metal materials. **IOP conference series. Materials science and engineering**, v. 393, p. 012003, 2018.

LI, Y.; LI, L.; KHALIL, K. A. Effect of powder loading on metal injection molding stainless steels. **Journal of materials processing technology**, v. 183, n. 2–3, p. 432–439, 2007.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. New York, USA: Wiley-Interscience, 2008.

LIVERANI, E. et al. Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. **Journal of materials processing technology**, v. 249, p. 255–263, 2017.

MANSOURA, A. et al. Correction: Selective laser melting of stainless steels: A review of process, microstructure and properties. **Metals and materials international**, v. 30, n. 9, p. 2372–2372, 2024.

MAZURCHEVICI, A. D.; NEDELICU, D.; POPA, R.; Additive manufacturing of composite materials by FDM technology: A review. **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences**, v. 27, n. 02, p. 179-192, 2020.

MOGAN, J. et al. Thermo-mechanical properties of ABS/stainless steel composite using FDM. **Materials Today: Proceedings**, 2024.

MONTUORI, R. A. M. et al. Manufatura Aditiva de Aço Inoxidável 316L por Fusão Seletiva a Laser. **Soldagem e Inspecao / Welding and Inspection**, v. 25, 2020.

MURPHY-LEONARD, A. D. et al. Investigation of porosity, texture, and deformation behavior using high energy X-rays during in-situ tensile loading in additively manufactured 316L stainless steel. **Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing**, v. 810, n. 141034, p. 141034, 2021.

ÖRNEK, C. Additive manufacturing – a general corrosion perspective. **Corrosion Engineering Science and Technology**, v. 53, n. 7, p. 531–535, 2018.

PRAKASH, K. S.; NANCHARAIH, T.; RAO, V. V. S. Additive manufacturing techniques in manufacturing -an overview. **Materials today: proceedings**, v. 5, n. 2, p. 3873–3882, 2018.

RAFIEAZAD, M. et al. Microstructural evolution and mechanical properties of a low-carbon low-alloy steel produced by wire arc additive manufacturing. **The international journal of advanced manufacturing technology**, v. 105, n. 5–6, p. 2121–2134, 2019.

RAMAZANI, H.; KAMI, A. Metal FDM, a new extrusion-based additive manufacturing technology for manufacturing of metallic parts: a review. **Progress in additive manufacturing**, v. 7, n. 4, p. 609–626, 2022.

RAZA, A. et al. Experimental study and characterisation of 316L stainless steel parts fabricated with metal fused filament fabrication. **Journal of materials research and technology**, v. 30, p. 6686–6698, 2024.

RODRIGUES, V. P. et al. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. **Revista Gestão Da Produção Operações E Sistemas**, 12(3), 1, 2017.

- SADAF, M.; BRAGAGLIA, M.; NANNI, F. A simple route for additive manufacturing of 316L stainless steel via Fused Filament Fabrication. **Journal of manufacturing processes**, v. 67, p. 141–150, 2021.
- SAEIDI, K. et al. Hardened austenite steel with columnar sub-grain structure formed by laser melting. **Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing**, v. 625, p. 221–229, 2015.
- SARGINI, M. I. M. et al. Additive manufacturing of an automotive brake pedal by metal fused deposition modelling. **Materials today: proceedings**, v. 45, p. 4601–4605, 2021.
- SHVAB, R. et al. Effect of sintering atmosphere on the microstructure of high Cr-alloyed sintered stainless steel. **Powder Metallurgy Progress**, v. 13, n. 3-4, p. 103-108, 2013.
- SILVA, P. C. et al. Manufatura aditiva: revisão sistemática da literatura / additive manufacturing: a systematic review. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 84502–84515, 2020.
- SOUZA, L.B.O. Correlação entre processos de fabricação convencional e por manufatura aditiva com as propriedades do aço inoxidável 316L. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal de Uberlândia, 104f, 2022.
- SPEARS, T. G.; GOLD, S. A. In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing. **Integrating materials and manufacturing innovation**, v. 5, n. 1, p. 16–40, 2016.
- SPILLER, S.; KOLSTAD, S. O.; RAZAVI, N. Fabrication and characterization of 316L stainless steel components printed with material extrusion additive manufacturing. **Procedia structural integrity**, v. 42, p. 1239–1248, 2022.
- SPILLER, S.; OLSØYBAKK KOLSTAD, S.; RAZAVI, N. Fatigue behavior of 316L stainless steel fabricated via Material Extrusion Additive Manufacturing. **Engineering fracture mechanics**, v. 291, n. 109544, p. 109544, 2023.
- SUN, Z. et al. Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates. **Materials & design**, v. 104, p. 197–204, 2016.
- THOMPSON, Y. et al. Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel. **Additive manufacturing**, v. 30, n. 100861, p. 100861, 2019.
- TOFAIL, SYED AM et al. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. **Materials today**, v. 21, n. 1, p. 22-37, 2018.
- VERMA, R.; KAUSHAL, G. State of the art of powder bed fusion additive manufacturing: a review. **3D Printing and Additive Manufacturing Technologies**, p. 269-279, 2019.

WAGNER, M. A. et al. Filament extrusion-based additive manufacturing of 316L stainless steel: Effects of sintering conditions on the microstructure and mechanical properties. **Additive manufacturing**, v. 59, n. 103147, p. 103147, 2022.

WANG, D. et al. Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts. **Materials & design**, v. 100, p. 291–299, 2016.

WANG, F. et al. Microstructure evolution, phase formation, corrosion, and mechanical properties of stainless steel fabricated by extrusion-based sintering-assisted additive manufacturing. **Additive manufacturing**, v. 75, n. 103746, p. 103746, 2023.

WANG, Y. et al. On hot isostatic pressing sintering of fused filament fabricated 316L stainless steel – Evaluation of microstructure, porosity, and tensile properties. **Materials letters**, v. 296, n. 129854, p. 129854, 2021.

WONG, Kaufui V.; HERNANDEZ, Aldo. A review of additive manufacturing. **International scholarly research notices**, v. 2012, n. 1, p. 208760, 2012.

WU, Q. et al. Effect of Molten Pool Overlap on Mechanical Properties and Microstructure in Selective Laser Melting AISI 316L SS. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 33, p. 10822–10834, 2024.

YOON, T. S. et al. Effects of sintering conditions on the mechanical properties of metal injection molded 316L stainless steel. **ISIJ international**, v. 43, n. 1, p. 119–126, 2003.

YU, K. et al. Oxygen content control in metal injection molding of 316L austenitic stainless steel using water atomized powder. **Journal of manufacturing processes**, v. 50, p. 498–509, 2020.

YUSUF, S. et al. Investigation on porosity and microhardness of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. **Metals**, v. 7, n. 2, p. 64, 2017.

ZHONG, Y. et al. Intragranular cellular segregation network structure strengthening 316L stainless steel prepared by selective laser melting. **Journal of nuclear materials**, v. 470, p. 170–178, 2016.