



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**Avaliação de propriedades mecânicas e caracterização microestrutural de consolidados de pós de aço inoxidável AISI 316L fabricados por manufatura aditiva usando a fusão seletiva a laser**

**EDUARDO GAVIRA BONANI**

**Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais.**

**Orientador:  
Dr. MAURICIO DAVID MARTINS DAS NEVES**

**São Paulo  
2023**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

Avaliação de propriedades mecânicas e caracterização  
microestrutural de consolidados de pós de aço inoxidável AISI 316L  
fabricados por manufatura aditiva usando a fusão seletiva a laser

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

EDUARDO GAVIRA BONANI

Dissertação apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção do Grau  
de Mestre em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear Materiais.

**Orientador:**

**Dr. Mauricio David Martins das Neves**

São Paulo

2023

Fonte de Financiamento: FAPESP - processo nº 2017/076557-6

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

BONANI, E. G. ***Avaliação de propriedades mecânicas e caracterização microestrutural de consolidados de pós de aço inoxidável AISI 316L fabricados por manufatura aditiva usando a fusão seletiva a laser***. 2023. 100 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bonani, Eduardo Gavira

Avaliação de propriedades mecânicas e caracterização microestrutural de consolidados de pós de aço inoxidável AISI 316L fabricados por manufatura aditiva usando a fusão seletiva a laser / Eduardo Gavira Bonani; orientador Mauricio David Martins Das Neves. -- São Paulo, 2023.  
100 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2023.

1. Manufatura aditiva. 2. Aço inoxidável AISI 316L. 3. Porosidade. 4. Propriedades mecânicas. 5. Análise microestrutural. I. Neves, Mauricio David Martins Das, orient. II. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Eduardo Gavira Bonani

**Título: Avaliação de propriedades mecânicas e caracterização microestrutural de consolidados de pós de aço inoxidável AISI 316L fabricados por manufatura aditiva usando a fusão seletiva a laser**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data: 15/02/2023

### Banca Examinadora

Prof. Dr. Mauricio David Martins Das Neves

Instituição: IPEN – CCTM

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

Instituição: Escola Politécnica da USP

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Eurico Felix Pieretti

Instituição: Universidade Federal do ABC

Julgamento: \_\_\_\_\_

**DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho ao meu Pai, José Fernando Neves Bonani<sup>†</sup> por acreditar em mim.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa Senhora, por estar sempre comigo, me guiando, iluminando cada passo da minha da minha jornada.

Ao Prof. Dr. Maurício David Martins das Neves, pelo apoio nas horas mais difíceis, não deixando que as dificuldades encontradas durante esta trajetória atrapalhassem o desenvolvimento deste trabalho, por acreditar neste ideal, pela orientação, confiança, motivação, disponibilidade e tempo investido.

A Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”, por disponibilizar sua infraestrutura de máquinas e equipamentos.

Ao Mestre Luís Carlos Elias da Silva, por instruir no Laboratório de Materiais Particulado e Junção de Materiais, nos ataques das amostras.

Ao engenheiro Antônio Carlos Alvarez Fasano da empresa OMNITEK, por disponibilizar equipamentos de Fusão Seletiva a Laser.

Ao Sr. Willy Augusto de Carvalho Behmer, pelo apoio na fabricação das amostras por Fusão seletiva a laser.

Ao professor Dr. Eurico Felix Pieretti, membro das bancas de: exame de capacidade, qualificação e defesa de mestrado, que contribuiu com sugestões, conselhos. e interesse em contribuir para o desenvolvimento deste trabalho

Ao professor Dr. Gilmar Ferreira Batalha, membro da banca defesa de mestrado, que contribuiu com suas sugestões e conselhos.

Ao professor Dr. Jesualdo Luis Rossi, membro da banca de Qualificação, pelos conselhos e sugestões

A FAPESP, processo nº 2017/076557-6 pela aquisição dos pós atomizados de AISI 316L.

Ao IPEN e seus funcionários pela possibilidade de execução deste trabalho.

À Aparecida da Conceição Gemerias<sup>†</sup>, pela correção ortográfica do plano de trabalho.

Aos meus irmãos: Mônica, Daniela e Fernando e sobrinhos pelo apoio e incentivo à esta jornada.

À Sandra Aparecida Massacani Leme, minha companheira pelo amor, incentivo, força e apoio incondicional.

## EPÍGRAFO

*A alegria de ver e entender é o  
mais perfeito dom da natureza.*

*Albert Einstein*

## RESUMO

Neste estudo foi utilizado como material particulado o aço inoxidável AISI 316L, proveniente de dois fabricantes diferentes, para confecção de amostras consolidadas, usando do processo de Fusão Seletiva a Laser (FSL) em leito de pó, que é uma técnica de fabricação por manufatura aditiva (MA). Foram variados alguns parâmetros de processo tais como, potência e velocidade do feixe, distância entre passes do feixe laser (hachura) e estratégia de varredura, visando estudar o efeito na porosidade, rugosidade e propriedades mecânicas. A partir das condições selecionadas foram fabricadas amostras para: medidas de rugosidade, ensaios mecânicos de tração, medidas de dureza Rockwell B e caracterização da microestrutura. Observou-se que pós de diferentes fornecedores, mesmo que na especificação técnica, apresentaram diferentes propriedades de empacotamento e de fluidez ocasionando propriedades distintas no consolidado por FSL. Ainda foi verificado que o uso da relação potência do laser e velocidade de movimentação do laser com intervalos diferentes de distância entre os passes (hachura) foi acertado na fabricação de amostras consolidadas com porosidade aparente, em torno de 1 % e rugosidade menor do que 15  $\mu\text{m}$ . Verificou-se que a construção na posição horizontal propiciou a fabricação de amostras com menores porosidades (maior densidade geométrica) e maiores limites de ruptura e de escoamento e maior alongamento, no ensaio de tração, em relação à construção na direção na posição vertical. Observou-se que a presença de porosidade causa diminuição nas tensões de ruptura e escoamento. As amostras fabricadas com potência do feixe laser de 212 Watts, velocidade de 1600 mm/s, hachura de 0,07 mm e espessura de camada de 0,03 mm apresentaram porosidade em torno de 1,0 %, densidade geométrica de 7,65 g/cm<sup>3</sup> (> 95 % da densidade teórica), limite de resistência à tração de (612±43) MPa e limite de escoamento de (544±37) MPa, portanto acima de valores referenciados em normas vigentes. A microestrutura obtida era austenítica, refinada e de morfologia predominantemente celular. A morfologia de fratura indicou características dúcteis e formação de pequenos vazios (*dimples*), além da presença de descontinuidades.

Palavra-chave: Manufatura aditiva, AISI 316L, Fusão Seletiva a Laser, porosidade, propriedades mecânicas e análise microestrutural.

## ABSTRACT

In this study, AISI 316 L stainless steel was used as particulate material from two different producers, for the manufacture of consolidated, using the Selective Laser Melting (FSL) process in a powder bed, which is a manufacturing technique by additive manufacturing (AM). Some process parameters were varied, such as beam power and speed, distance between laser beam passes (hatching) and scanning strategy, to study the effect on porosity, roughness, and mechanical properties. From the selected conditions, samples were manufactured for: roughness measurements, mechanical tensile tests, Rockwell B hardness measurements and microstructural characterization. It was observed that powders from different producers, even in the technical specification, presented different packing and fluidity properties, causing different properties in the consolidated by FSL. It was also verified that the use of the laser power and laser movement speed ratio with different intervals of distance between the passes (hatching) was correct in the manufacture of consolidated samples with apparent porosity, around 1 % and roughness less than 15  $\mu\text{m}$ . It was verified that the construction in the horizontal direction favoured the fabrication of samples with smaller porosities (higher geometric density) and higher rupture and flow limits, in the tensile test, comparing construction in the vertical direction. It was observed that the presence of porosity causes a decrease in rupture and yield stresses. The samples manufactured with a laser beam power of 212 Watts, speed of 1600 mm/s, hatch of 0.07 mm and layer thickness of 0.03 mm showed porosity around 1.0 %, geometric density of  $7.65 \text{ g/cm}^3$  (> 95% of theoretical density), tensile strength limit of  $(612\pm 43)$  MPa and yield strength of  $(544\pm 37)$  MPa, therefore above the values referenced in current standards. The microstructure obtained was austenitic, refined with predominantly cellular morphology. Fracture morphology indicated ductile characteristics and formation of small voids (dimples) in addition to the presence of discontinuities.

Keywords: Additive manufacturing; AISI 316L, Selective Laser Fusion; porosity; mechanical properties and microstructural analysis.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Denominações de processos e materiais usadas na manufatura aditiva.....	8
Tabela 2 - Parâmetros principais do processo de FSL.....	18
Tabela 3 - Composição química do aço inoxidável AISI 316L para manufatura aditiva.....	26
Tabela 4 - Propriedades Mecânicas e físicas do aço inoxidável AISI 316L .....	27
Tabela 5 - Propriedades mecânicas obtidas em amostras de AISI 316L consolidadas por FSL.....	30
Tabela 6 - Defeitos encontrados no processo FSL .....	32
Tabela 7 - Composição química da liga AISI 316L antes da FSL (pó virgem), em relação referência da norma ASTM F3184-16 (% em massa). .....	48
Tabela 8 - Composição química de elementos residuais da liga AISI 316 L antes da FSL (pó virgem), em relação referência da norma ASTM F3184-16 (% em massa). .....	48
Tabela 9 - Distribuição granulométrica dos pós obtida por difração a laser. ....	49
Tabela 10 - Propriedades físicas dos pós dos dois fabricantes.....	49
Tabela 11 - Resultado da média e desvio padrão em relação aos índices de fluidez (escoabilidade) dos pós. Fonte: ASM Internacional, 1998.....	50
Tabela 12 – Matriz com 80 condições selecionadas para fabricação da plataforma nas condições de quatro potências do laser (53/73/93 e 132W) por nove velocidades de varredura (800 a 1600mm/s) e quatro hachuras (0,07/0,08/0,09 e 0,10mm) com respectivos valores de densidade volumétrica de energia do fabricante “A” em $Jmm^{-3}$ , sendo por exemplo, na coluna “4” e linha “E” as condições foram: potência de 132W, com velocidade de 1600mm/s e variando as hachuras em (0,07/0,08/0,09 e 0,1mm) e densidade volumétrica de energia de 29 a 39 $Jmm^{-3}$ .....	52
Tabela 13 - Resultado de porosidade de arranjos selecionados por análise visual com menor porosidade aberta da plataforma impressa da liga de aço inoxidável AISI 316 L, as amostras A16.07, A16.08, A20.07 e A20.10 apresentaram menor porosidade aparente entre 0,05 – 0,10 .....	55
Tabela 14 - Resultados das análises de rugosidade (Ra média e desvio), densidade hidrostática e porosidade das amostras selecionadas da liga de AISI 316 L – Fabricante “A”.....	56
Tabela 15 - Resultados de porosidade aparente das amostras consolidadas sob as diferentes estratégias de varredura para os fabricantes “A” e “B”. nas seções paralela e vertical ao sentido de crescimento. ....	57
Tabela 16 - Parâmetros de potência, velocidade e hachura utilizados, em relação às amostras, em relação aos valores da porosidade aberta (2º lote) -fabricante “B”. e densidade volumétrica de energia. ....	59
Tabela 17 – Condições 3, 6 e 13 selecionadas para ensaio de tração fabricadas por FSL nas direções horizontal e vertical. ....	61

Tabela 18 - Valores médios das propriedades mecânicas, ( $\sigma_R$ ) Limite de resistência [MPa], ( $\sigma_{Esc}$ ) Limite de escoamento e ( $\Delta L\%$ ) Alongamento. .... 70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Vendas globais de produtos (verde escuro) e serviços (verde claro) de manufatura aditiva entre os anos de 1993 a 2018. Vendas em milhões de dólares. ....	5
Figura 2 – Sequência sugerida para produzir peças por MA. ....	7
Figura 3 – Manufatura Aditiva e seus processos segundo NBR ISO 17296-2:2019 .....	8
Figura 4 – Processo de MA com base no estado físico da matéria prima.....	9
Figura 5 – Representação esquemática do processo Jateamento de aglutinante.....	10
Figura 6 – Representação do processo de MA de extrusão de material .....	10
Figura 7 - Esquema de funcionamento por MA do processo por jateamento de material.....	11
Figura 8 - Laminação de chapas .....	12
Figura 9 - Fotopolimerização em cuba .....	12
Figura 10 - Deposição por energia direta .....	13
Figura 11 - Representação esquemática de processos PBF (a) e (b) feixe de elétrons.....	14
Figura 12 - Estrutura trabecular de um implante. ....	15
Figura 13 - Esquema de um equipamento de Fusão Seletiva a Laser.....	16
Figura 14 - Representação do processo de consolidação da técnica FSL, (a) detalhe da região de fusão do pó metálico pela ação do feixe laser e (b) variáveis de consolidação. ....	17
Figura 15 - Parâmetros de processo que influenciam na consolidação por FSL com sistemas de coordenadas SD (direção de escaneamento), TD (direção transversal) e BD (direção de construção). ....	21
Figura 16 - Exemplos de estratégias de direcionamento da varredura do feixe laser.....	22
Figura 17 - Partículas obtidas por atomização a gás. ....	24
Figura 18 – Componentes fabricados por FSL usando o aço inoxidável AISI 316 L – Hélice de barco (a), prótese do quadril (b) e Parafuso para implante (c). ....	27
Figura 19 - Esquema de fabricação de corpos de prova na posição vertical e horizontal. Eixo z representa a direção de crescimento .....	30
Figura 20 - Imagem obtida por microscopia óptica de porosidades indicada por setas.....	33
Figura 21 - Imagens obtidas por microscopia óptica das discontinuidades: (a) falta de fusão e (b) partículas de pós não fundidas. ....	34
Figura 22 - Imagem obtida por MEV indicando a presença de <i>balling</i> no aço inoxidável AISI 316L fabricado com velocidade de 800 mm/s.....	35

Figura 23 – Representação esquemática para produzir amostras (a) Geração do modelo CAD, (b) conversão para extensão STL e (c) disposição das amostras na plataforma de fabricação por FSL. ....	37
Figura 24 - (a) Equipamentos de FSL OmniSint 160.e (b) oxímetro –(c) interior da câmara de fabricação usando argônio ultrapuro. [69] .....	38
Figura 25 - Imagens do interior da câmara de fabricação usado argônio ultrapuro (a) durante a execução de camada e (b) após finalização de camada .....	38
Figura 26 - Representação do arranjo adotado, onde “A1” contém 5 amostras (A1.1 – linha única, A1.07 – amostra com H = 0,07 mm, A1.08 – amostra com H = 0.08 mm, Arranjo - “A1” (1 = relação de potência X velocidade de varredura). Fabricante “A”. .....	39
Figura 27 - Representação esquemática das estratégias de varredura para consolidação das amostras do fabricante “B”: a) sequencial com rotação de 0°/90° (S0/90), b) sequencial com rotação de 67° por camada – (S67) e (c) referência. ....	40
Figura 28 – Aparatos utilizados para a realização dos testes de: (a) análise de densidade hidrostática e (b) análise de rugosidade. ....	41
Figura 29 - Parâmetro de rugosidade Ra .....	42
Figura 30 – Medidas da perpendicularidade das amostras fabricadas por FSL na MMC. ....	43
Figura 31 - Dispositivo construído para planificar a superfície das amostras. ....	43
Figura 32 - Posicionamento utilizado para obter as imagens em cinco pontos diferentes. ....	44
Figura 33 - (a) Imagem obtida por microscopia ótica da amostra e (b) Imagem processada por programa computacional “ <i>Image J</i> ” da mesma amostra e região da Figura a. ....	45
Figura 34 - – (a) Máquina de ensaio universal modelo TR6128SB, (b) Durômetro Rockwell e Brinell modelo LC200RB e (c) Desenho do corpo de prova para ensaio de tração. ....	46
Figura 35 - Fluxograma de experimentos usados na metodologia para a realização deste estudo. ....	47
Figura 36 - Imagens obtidas por MEV das partículas de pós de aço inoxidável AISI 316L dos fabricantes “A” (a) e “B” (b). ....	51
Figura 37 - Primeira plataforma impressa na liga de aço inoxidável AISI 316L do fabricante “A” em uma matriz 4x5 conforme a Tabela 12 (4 potências de laser: 53/ 73/ 93/ 132 W usando várias velocidades de varredura: 800 - 1600 mm/s e 4 hachuras (H) nas dimensões de 0,07; 0,08; 0,09 e 0,10 mm. As setas indicam a construção em uma única hachura. ....	53
Figura 38 - Defeitos de consolidação (a), (b) e (c) falta de fusão entre as camadas com trincas e delaminação, devido a tensão residual supera o limite de escoamento. ....	54

Figura 39 - Gráfico representativo da porosidade aparente de arranjos selecionadas da plataforma impressa do aço inoxidável AISI 316 L – Fabricante A.....	55
Figura 40 - Esquema representativo das estratégias de varredura usadas em relação a escoabilidade do pó pelo “recoater” (direção das setas) da máquina: (a) sequencial com rotação de 0°/90° (S0/90) e (b) sequencial com rotação de 67° .....	57
Figura 41 - Imagem das amostras consolidadas em diferentes estratégias.....	58
Figura 42 - Amostras para ensaio de tração fabricadas por FSL nas direções horizontal e vertical - condição 3 (a), condição 6(b) e condição 13 (c). .....	62
Figura 43 - Imagens obtida por M.O. representativas das amostras consolidadas dos fabricantes “A” e “B” na estratégia S67 (a) fabricante “A” e (b) fabricante “B” .....	63
Figura 44 - Imagens obtidas por M.O. das amostras consolidadas das condições 6 (a) e (b), 3 (c) e (d) e 13 (e) e (f) no sentido vertical e horizontal, as regiões em pretos são vazios. ....	65
Figura 45 - Imagens obtidas por microscopia óptica das condições 6, 3, e 13. Imagens (a), (c) e (e) com sentido de construção na direção horizontal e imagens (b), (d) e (f) sentido de construção vertical. ....	66
Figura 46 - (a) e (b) Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da condição 6, sentido de construção horizontal. ....	68
Figura 47 - Imagem obtida por MEV região de fratura de uma amostra fabricada por FSL (a) condição 6 e (b) condição 3.....	68
Figura 48 - Imagem obtida por MEV região de fratura de uma amostra fabricada por FSL na condição 13.....	69
Figura 49 – Difractograma de raios X de uma amostra fabricada – condição 6 (horizontal). ....	70
Figura 50 - (a) Limite de resistência na direção horizontal de fabricação (b) Limite de resistência na direção vertical de fabricação, (c) Limite de escoamento na direção horizontal e (d) Limite de escoamento na direção vertical, valores em [MPa].do fabricante “B”, nas condições 3, 6 e 13. ....	71
Figura 51 - a) alongamento na direção horizontal de fabricação, (b) alongamento na direção vertical de fabricação, (c) dureza (HRB) na direção horizontal de fabricação e (d) dureza (HRB) na direção vertical de fabricação nas condições 3, 6 e 13. ....	72
Figura 52 - Corpos de prova do ensaio de tração – Condição 3 na posição vertical (a) e na posição horizontal (b). ....	72
Figura 53 – Representação esquemática das seções transversais, apresentando falhas nas direções horizontal (a) e vertical (b) de fabricação por FSL em relação ao carregamento no ensaio de tração. ....	73

**LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLA**

- ABS - *Acrylonitrile Butadiene Styrene*
- AMF - *Additive manufacturing format*
- ASTM - *American Society for Testing and Materials*
- CAD - Desenho assistido por computador
- DED - *Direct Energy Deposition*
- EBAN - Electron beam additive manufacturing
- EBM - *Electron Beam Melting*
- EDS - *Energy dispersive X-ray detector*
- FSL - Fusão Seletiva a Laser
- FDM - *Fused deposition modeling*
- ISO - *International Organization for Standardization*
- LENS - *Laser engineered net shaping*
- MA - Manufatura aditiva
- MMC - Máquina de Medir por Coordenadas
- MO - Microscopia óptica
- PBF - *Powder bed fusion*
- PPSF - *Polyphenylsulfone*
- RP - *Rapid prototyping*
- SLM - *Selective Laser Melting*
- STL - *STereoLithography*
- UV - Ultravioleta

## LISTA DE SIMBOLOS

SIMBOLO	DESCRIÇÃO	DIMENSÃO
HB	Dureza Brinell	Kgf/mm <sup>2</sup>
$E$	<i>Densidade de energia volumétrica</i>	J/mm <sup>3</sup>
$P$	<i>potência do laser</i>	W
$H$	<i>distância entre passe (hachura)</i>	mm
$v$	<i>velocidade de escaneamento</i>	mm/s
$e_c$	<i>espessura de camada</i>	mm
$\rho_{amostra}$	<i>Densidade aparente da amostra</i>	g/cm <sup>3</sup>
$M_{amostra}$	Massa da amostra	g
$M_{cpi}$	Massa do contrapeso quando imerso em água	g
$\rho_{água}$	Densidade da água	1 g/cm <sup>3</sup>
$M_{ci}$	Massa do conjunto corpo de prova e contrapeso, quando imerso em água	g
Ra	Rugosidade aritmética	μm
% poros	<i>Porcentagem de poros</i>	%
$A_p$	<i>Área de pretos</i>	Pixel
$A_T$	<i>Área total</i>	Pixel
CI	Índice de Carr	%
DC	<i>Densidade compactada</i>	g/cm <sup>3</sup>
D0	<i>Densidade aparente</i>	g/cm <sup>3</sup>
H	Relação de Hausner	%
$\sigma_R$	Limite de resistência	MPa
$\sigma_{Esc}$	Limite de escoamento	MPa
$\Delta L\%$	Alongamento	%

## SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	I
DEDICATÓRIA .....	II
AGRADECIMENTOS .....	III
EPÍGRAFO.....	IV
RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VI
LISTA DE TABELAS .....	VII
LISTA DE FIGURAS .....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLA .....	XII
LISTA DE SIMBOLOS.....	XIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO .....	3
Sumário gráfico .....	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 MANUFATURA ADITIVA.....	6
3.1.1 Jateamento de aglutinante ( <i>binder jetting</i> ).....	9
3.1.2 Extrusão de material ( <i>material extrusion</i> ).....	10
3.1.3 Jateamento de material ( <i>material jetting</i> ) .....	11
3.1.4 Laminação de chapas ( <i>sheet lamination</i> ) .....	11
3.1.5 Fotopolimerização em cuba ( <i>vat photopolymerization</i> ) .....	12
3.1.6 Deposição por energia direta ( <i>DED - Direct Energy Deposition</i> ) .	13
3.1.7 Fusão em leito de pó ( <i>powder bed fusion</i> ) .....	13
3.2 FUSÃO SELETIVA A LASER (FSL).....	16
3.2.2 Parâmetros de Fabricação do processo de FSL .....	18
3.3 Parâmetros do Feixe Laser.....	19
3.3.1 Potência - Densidade de energia volumétrica .....	19
3.3.2 Diâmetro do Feixe Laser .....	20
3.3.3 Velocidade de Varredura .....	20
3.4 Parâmetros de Consolidação .....	21
3.4.1 Espessura de Camada.....	21
3.4.2 Espaçamento de hachuras do laser - <i>hatch</i> .....	22
3.4.3 Estratégia de Varredura quanto à orientação de fabricação.....	22
3.5 Propriedades do material particulado .....	23
3.5.1 Composição Química .....	23
3.5.2 Tamanho de partícula .....	23
3.5.3 Morfologia do Pó.....	23
3.5.4 Variáveis Importantes no processo de FSL.....	25
3.6 Aço Inoxidável AISI 316 L – Propriedades e Aplicações.....	25
3.7 Fusão Seletiva a Laser em aço inoxidável AISI 316L .....	27
3.8 Avaliação de Propriedades Mecânicas e Microestrutura.....	28

<b>3.9</b>	<b>Defeitos em amostras de FSL .....</b>	<b>32</b>
<b>3.9.1</b>	<b>Porosidade .....</b>	<b>33</b>
<b>3.9.2</b>	<b>Delaminação .....</b>	<b>33</b>
<b>3.9.3</b>	<b>Tensão residual e Trincas .....</b>	<b>34</b>
<b>3.9.4</b>	<b>Aglomerados esféricos na superfície “<i>Balling</i>” .....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Material particulado.....</b>	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Caracterização Química e Física dos Pós .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3</b>	<b>Fusão Seletiva a Laser .....</b>	<b>37</b>
<b>4.4</b>	<b>Determinação dos Parâmetros .....</b>	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>Caracterização Física e Química do Material de Partida.....</b>	<b>48</b>
<b>5.2</b>	<b>Fabricação de Amostras por FSL - Fabricante A.....</b>	<b>51</b>
<b>5.3</b>	<b>Fabricação de Amostras por FSL Fabricante “B” (2º Lote) .....</b>	<b>59</b>
<b>5.4</b>	<b>Caracterização microestrutural das amostras .....</b>	<b>63</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Caracterização por microscopia óptica .....</b>	<b>63</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Caracterização por Microscopia Eletrônica de Varredura.....</b>	<b>67</b>
<b>5.4.3</b>	<b>Caracterização por Difração de raios X .....</b>	<b>69</b>
<b>5.5</b>	<b>Propriedades mecânicas das amostras – fornecedor “B”.....</b>	<b>70</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>74</b>
	<b>Bibliografia.....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma forma de consolidação em desenvolvimento é a Manufatura Aditiva (MA), que tem propiciado grandes inovações, redução de tempo e de custos nos diversos setores industriais. Na MA é propiciada a fabricação de produtos com formas complexas e alta dificuldade de serem criados por manufatura subtrativa convencional, como por exemplo, os processos de usinagem [1].

Uma técnica muito empregada na MA é o processo de fusão seletiva a laser (FSL), em leito de pó. O processo ocorre por meio da incidência de um feixe laser que é o responsável por fornecer a energia térmica necessária para fundir uma camada pó metálico. Neste processo de FSL consolida-se camada a camada, formando de forma volumétrica o componente fabricado, por meio de uma impressão em 3D.

A FSL possui vários parâmetros que devem ser selecionados, de acordo, com as propriedades desejadas do consolidado, que estão relacionadas a: porosidade, rugosidade e propriedades mecânicas. Os principais parâmetros de processo da FSL são: intensidade e diâmetro do feixe laser, velocidade e sentido de escaneamento, vazão de composição gás de proteção e outros. As características da matéria prima também interferem nas propriedades finais de desempenho do consolidado (produto).

Pós de aço inoxidável AISI 316 L são usados como materiais de partida, para fabricação de componentes empregados em diversos segmentos industriais, que devem atender os requisitos específicos de: porosidade, rugosidade, propriedades mecânicas compatíveis ao uso e outras características de desempenho (corrosão e desgaste). Um setor de grande utilização deste aço inoxidável é a área da saúde, em razão da biocompatibilidade e propriedades de desempenho do AISI 316 L.

Em razão da FSL ser um processo de fabricação recente, ainda existe a necessidade de entender as influências dos parâmetros de processo, desta técnica de fabricação e das propriedades do material particulado, no desempenho do consolidado produzido. Esta tecnologia tem sido considerada apta para modificar os processos de fabricação usados na atualidade, existindo uma tendência de aumento de utilização, à medida que sejam fabricados componentes com maior precisão dimensional e melhor acabamento. Este estudo procura contribuir com o entendimento da relação entre os parâmetros de processo de fabricação, com as

características da matéria prima do aço inoxidável AISI 316 L e com as propriedades de desempenho em consolidados por FSL.

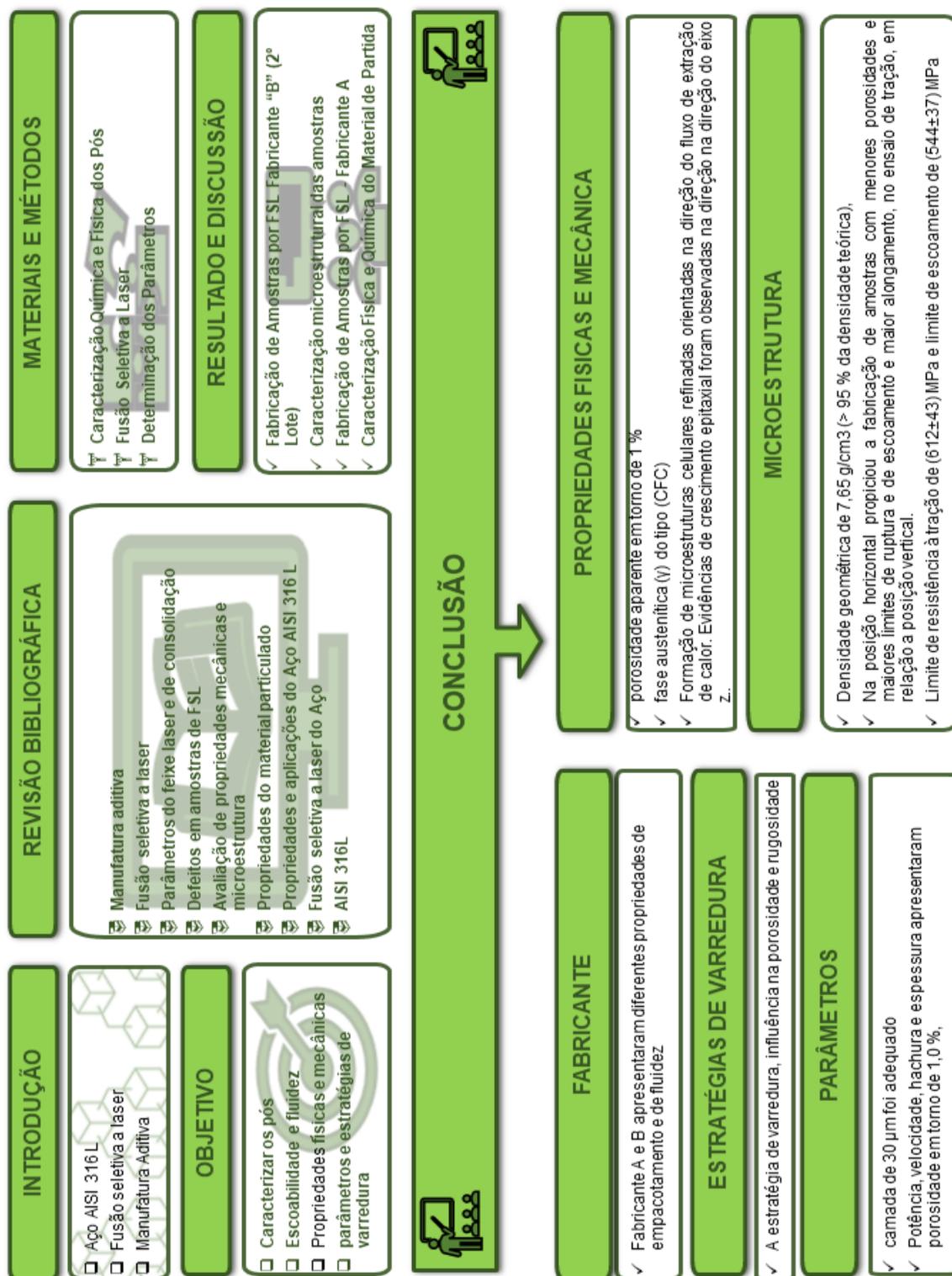
## 2 OBJETIVO

O objetivo geral é estudar as influências dos parâmetros do processo de fusão seletiva a laser – FSL (potência, velocidade, hachura e estratégias de varredura), em leito de pó na consolidação de amostras usando pós do aço inoxidável AISI 316L (ASTM F139).

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar os pós esféricos de dois fabricantes para o processo FSL;
- Consolidar amostras por FSL, usando pós atomizados a gás com distintas qualidades de escoabilidade e fluidez;
- Comparar as propriedades físicas, envolvendo, análise dimensional, densidades (geométrica e hidrostática) e rugosidade, além de propriedades mecânicas (tração e dureza) de amostras padronizadas obtidas de diferentes matérias primas e fabricadas com diferentes parâmetros de consolidação FSL;
- Definir janelas de processamento (parâmetros e estratégias de varredura com sentido, orientações de varredura do laser e posição de fabricação) na consolidação de componentes.

## Sumário gráfico

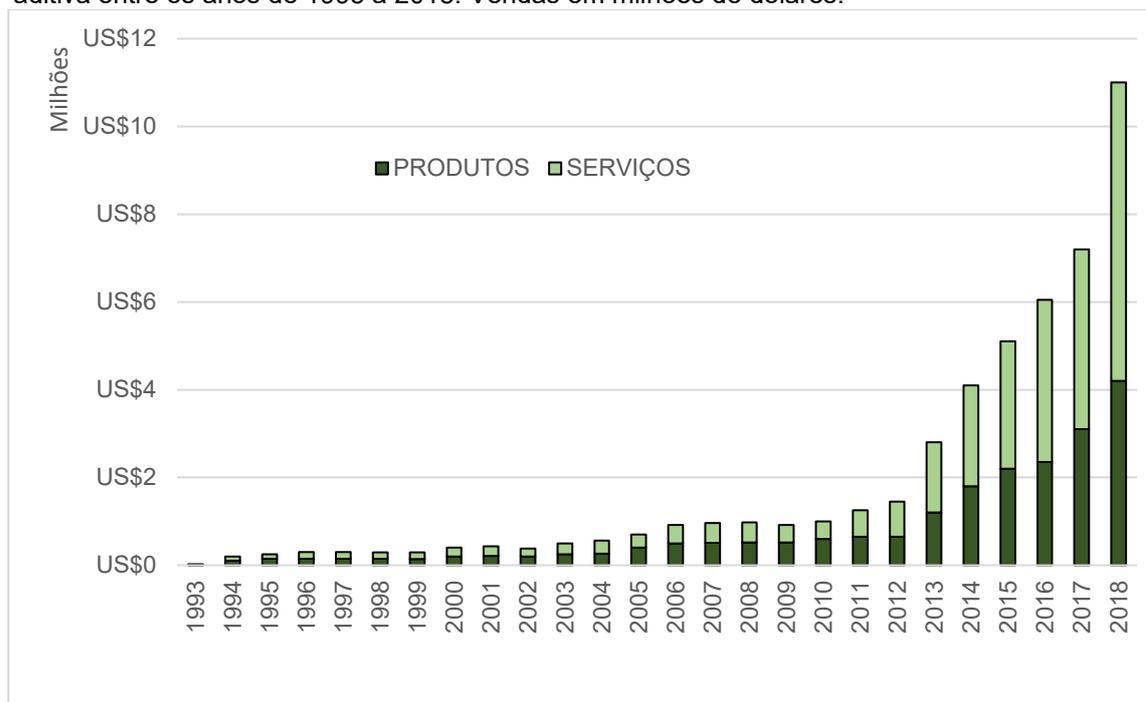


Fonte: Autor

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A crescente importância científica, tecnológica e econômica da manufatura aditiva (MA) pode ser verificada na Figura 1, onde observa-se o crescimento de vendas de produtos e serviços relacionados MA. Observa-se um crescimento maior nos últimos anos, em especial por: uso de programas computacionais mais simples, maior conhecimento dos processos, patentes de proteção encerradas e redução nos custos dos equipamentos e insumos [2] e [3].

Figura 1 -Vendas globais de produtos (verde escuro) e serviços (verde claro) de manufatura aditiva entre os anos de 1993 a 2018. Vendas em milhões de dólares.



Fonte: Adaptada de [4].

Na literatura são mostrados estudos [2] e [5] sobre o constante avanço de produtos, tecnologias de fabricação e de projetos, envolvendo o emprego da Manufatura Aditiva em diversas áreas, tais como: biomédica, aeroespacial, eletrônica, petróleo e gás, indústria de transporte e produtos de consumo de rápido ajuste ao projeto final entre outras. Estes avanços têm diversas limitações, se considerados os métodos convencionais de manufatura, tais como: considerável tempo de produção e projeto, desperdício inerente de materiais em processos de natureza subtrativa e dificuldade ou impossibilidade de fabricar determinadas geometrias, como as limitações mais relevantes [1] e [5]. Essas limitações, vêm sendo superadas com o avanço da utilização das diversas técnicas de MA [6].

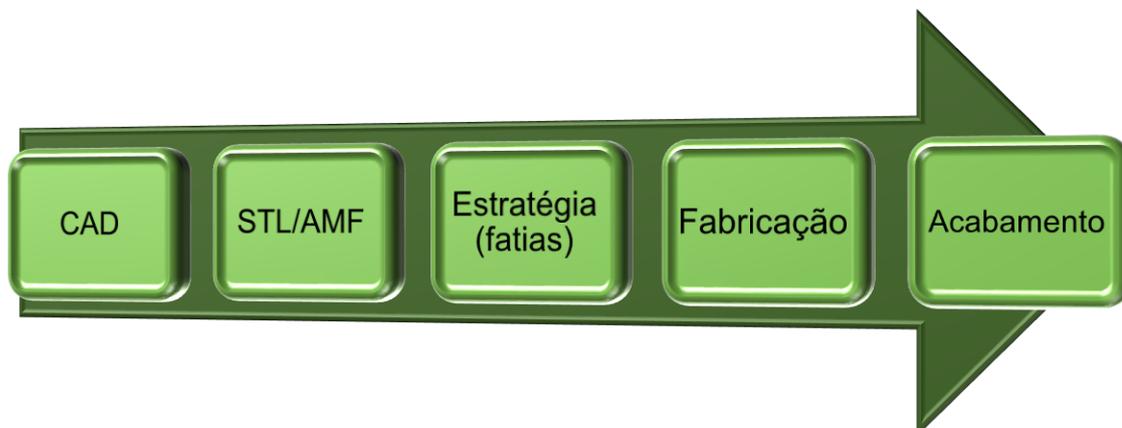
### 3.1 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva (MA) teve a sua origem com a prototipagem rápida (RP – *rapid prototyping*), que é um processo desenvolvido a partir da década de 80, com o intuito de fabricar de forma rápida protótipos tridimensionais, tendo como partida um arquivo digital (CAD-3D), por isso esse processo também ficou conhecido como “impressão 3D” [1], [7], [8] e [9]. Este processo se desenvolveu para atender a indústria, sendo que, na atualidade é usado na fabricação de componentes funcionais e não somente de protótipos, podendo ser produzidos em diversos materiais metálicos, poliméricos, cerâmicos e compósitos [1] e [7].

A MA é um processo de fabricação que pode ser definido como a fabricação de um determinado modelo digital tridimensional, gerado por um software CAD 3D, por meio de sobreposição sucessiva de camadas de material particulado, até a completa finalização do componente. Com o desenvolvimento desta tecnologia tornou-se evidente que, esta utilização não só possibilita a obtenção de protótipos, mas também de produtos funcionais com elevada qualidade e complexidade [10]. Para obter peças produzidas por esta técnica devem ser seguidos os passos:

- Obter modelagem tridimensional, podendo ser por scanner ou, gerando um modelo geométrico 3D do objeto a ser desejado, utilizando plataforma CAD;
- Gerar um arquivo específico para MA, a partir do modelo digital em 3D, em geral por uma malha de triângulos representando a superfície da peça, este arquivo pode ter o padrão STL (*STereoLithography*), AMF (*Additive Manufacturing Format*);
- Elaborar o planejamento do processo para gerar as camadas (fatias) e o suporte quando necessário. Neste planejamento definem-se as estratégias de deposição do material;
- Enviar estas informações para a máquina e iniciar a fabricação do objeto e
- Realizar limpeza por etapas de usinagens convencionais adicionais e acabamento se necessário.

Figura 2 – Sequência sugerida para produzir peças por MA.



Fonte: Autor

A partir do crescimento da MA necessitou-se atualizar sua nomenclatura, uma vez que, esse processo é executado pela sobreposição de camadas, em oposição aos processos de metalurgia subtrativa, onde o produto é obtido pela remoção de material. Diversos autores [11] e [12] exprimiram a definição de MA usada pela ISO (*International Organization for Standardization*) e pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) como sendo: “Um processo de unir materiais para construir objetos a partir de modelos de dados 3D, usualmente camada por camada, em oposição às tecnologias de manufatura subtrativas”.

A MA é classificada pela NBR ISO17296-2 [13] em sete categorias de processos, como observado na Figura 3. A seguir está indicada a sequência de categorias de processos de MA, dividida de acordo com a técnica aplicada na deposição das camadas e estão denominadas por:

- a) Jateamento de aglutinante (*binder jetting*);
- b) Extrusão de material (*material extrusion*);
- c) Jateamento de material (*material jetting*);
- d) Laminação de chapas (*sheet lamination*);
- e) Fotopolimerização em cuba (*vat photopolymerization*);
- f) Deposição por energia direta (DED - *Direct Energy Deposition*) e
- g) Fusão de camada em pó (*powder bed fusion*).

Figura 3 – Manufatura Aditiva e seus processos segundo NBR ISO 17296-2:2019



Fonte: Autor

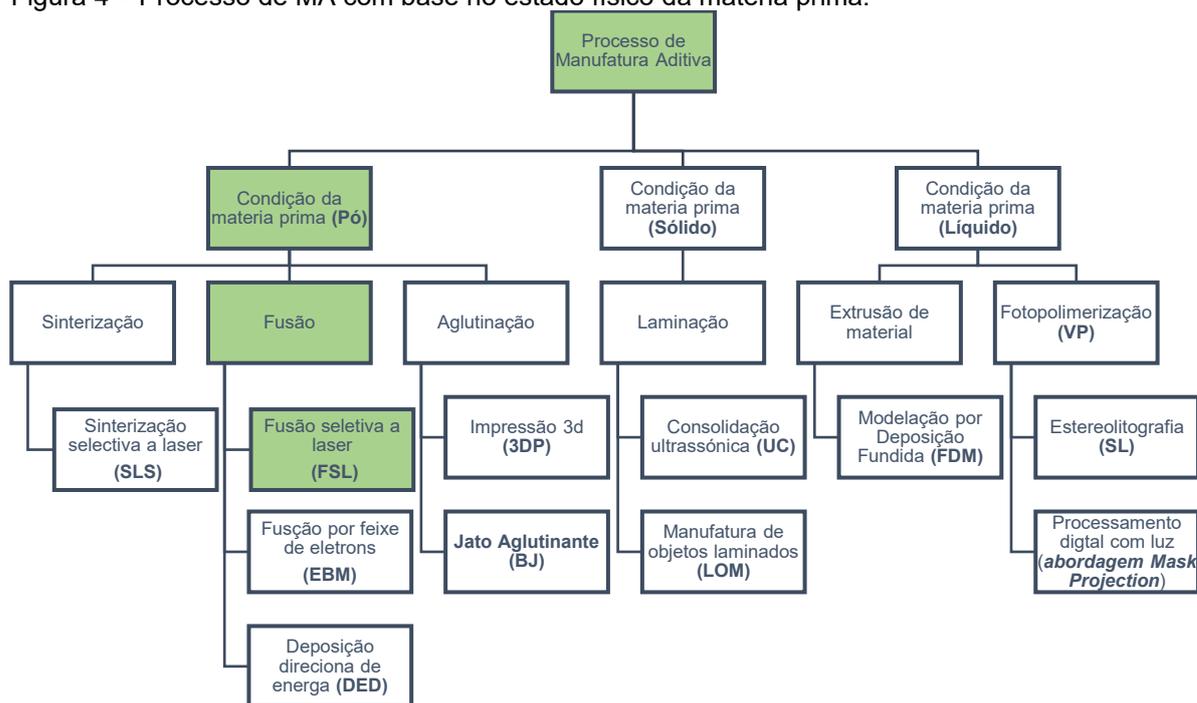
Na Tabela 1 é mostrada a categoria dos processos e as possibilidades dos diversos materiais quer sejam metais, polímeros, cerâmicos e compósitos que podem ser usados na MA. Na Figura 4 está apresentada uma classificação dos processos de MA em relação ao estado físico do material de partida.

Tabela 1- Denominações de processos e materiais usadas na manufatura aditiva

Materiais	Exemplo de materiais	Processo de Manufatura Aditiva						
		Fotopolimerização em cuba	Jateamento de material	Jateamento de aglutinante	Fusão em um leito de pó	Extrusão de material	Deposição direta de energia	Laminação de placas
Metais	Ti6Al4V			X	X		X	X
	Cobalto cromo			X	X		X	X
	<b>Aço inoxidável</b>			X	X		X	X
	Inconel 625 e 718			X	X		X	X
	Alumínio AlSi10Mg.			X	X		X	X
Cerâmicos industriais	Alumina, zircônio, silicone	X		X	X			X
Cerâmicos estruturais	Cimentos, areia de fundição			X	X	X		
Polímeros termorrígidos	Epóxis e acrílicos	X	X					
Polímeros termoplásticos	Poliamida, ABS, PPSF		X	X	X	X		X

Fonte: adaptada de [14].

Figura 4 – Processo de MA com base no estado físico da matéria prima.

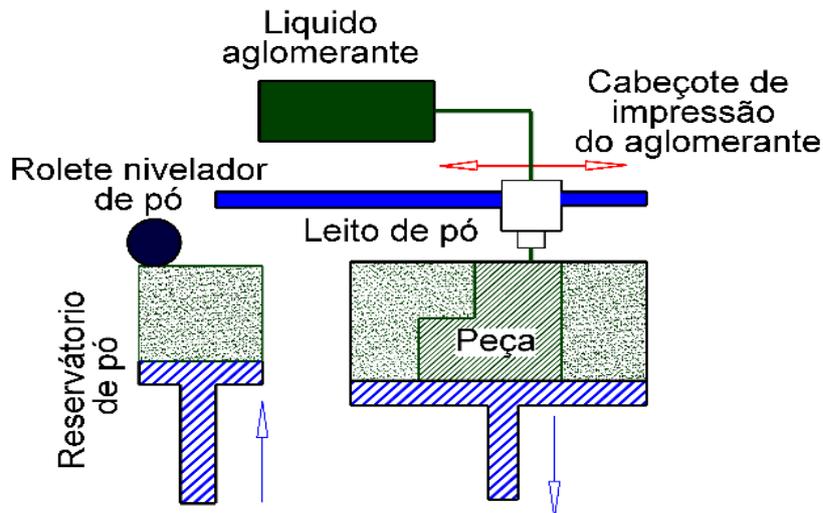


Fonte: Adaptada de [2].

### 3.1.1 Jateamento de aglutinante (*binder jetting*)

No processo jateamento de aglutinante o cabeçote deposita de forma seletiva um material líquido aglutinante, no leito de um material particulado que possuem diâmetros de 15 a 45 $\mu$ m. É um processo cujas partículas são unidas, por meio de um agente de ligação líquido e cria uma estrutura tridimensional na peça fabricada, no entanto, ainda sem resistência final (peça verde). Após a camada ser finalizada, a plataforma de sustentação se move para baixo e o rolete nivela a superfície do pó. O processo é então repetido até que toda a peça esteja concluída. Neste processo é requerido um pós-processamento, como a sinterização, para aumentar propriedades mecânicas e reduzir a porosidade, sendo esta a principal diferença de outras técnicas de MA. Uma representação esquemática deste processo está mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Representação esquemática do processo Jateamento de aglutinante.

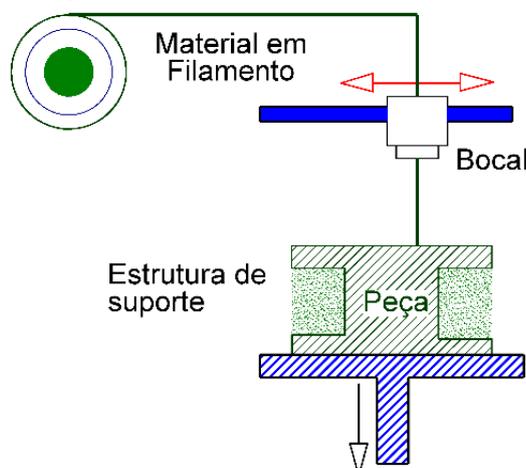


Fonte: Autor

### 3.1.2 Extrusão de material (*material extrusion*)

Esta é a técnica mais usada na MA, em razão de menor custo de matéria prima e do equipamento. A modelagem por fusão e deposição (*FDM fused deposition modeling*) é o processo mais usado neste grupo. Nesta técnica um polímero termoplástico é extrudado, através de um bocal aquecido e se deposita de forma seletiva camada por camada, conforme observado na Figura 6. O bocal pode se mover na direção horizontal, enquanto a plataforma (estrutura de suporte da peça) movimenta-se na direção vertical, após a deposição completa de uma nova camada de material.

Figura 6 – Representação do processo de MA de extrusão de material

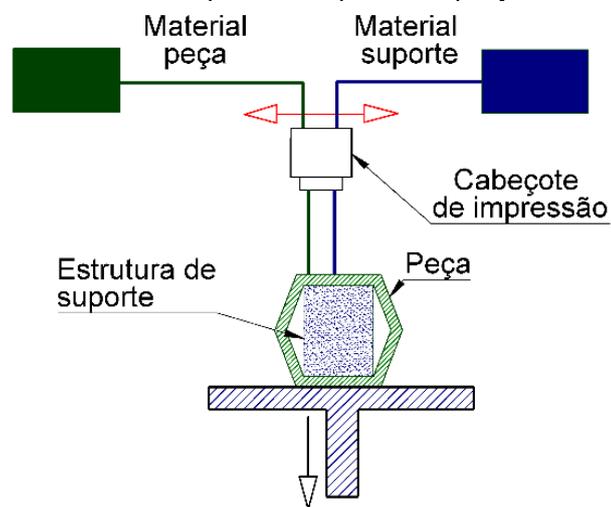


Fonte: Autor

### 3.1.3 Jateamento de material (*material jetting*)

Neste processo cabeçotes do equipamento se movem horizontalmente depositam uma resina termofixa camada a camada, conforme apresentado na Figura 7. Este material fica líquido até ser submetido a fonte de luz ultra violeta (UV), que provoca a cura da resina termofixa, sendo, portanto, um material fotossensível. As peças fabricadas usando esta técnica possuem um bom acabamento de superfície, precisão dimensional e homogeneidade de propriedades mecânicas.

Figura 7 - Esquema de funcionamento por MA do processo por jateamento de material.

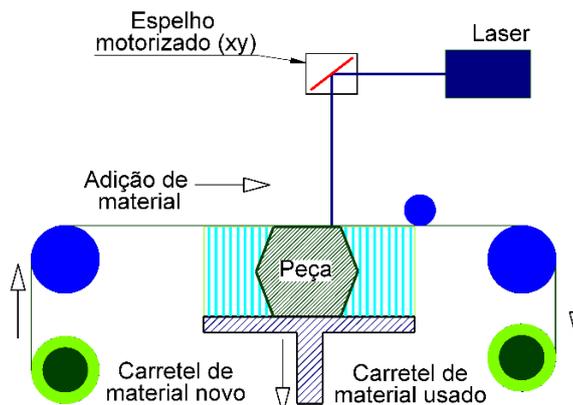


Fonte: Autor

### 3.1.4 Laminação de chapas (*sheet lamination*)

Nesta técnica são usadas placas finas de diversas classes de materiais, tais como, papel, metais ou polímeros. As placas finas de material são fornecidas por um sistema de rolos de alimentação e unidas camada por camada para formar uma única peça que é cortada em um objeto 3D. A diferença fundamental está na construção das camadas que são cortadas por sistemas mecânico ou feixe laser. Na sequência do processo, as placas cortadas são acomodadas para realização da consolidação, no entanto esta sequência pode ser invertida. A união das camadas é realizada por pressão de rolos, sistemas ultrassônicos, adesivos ou sistemas com baixa fonte de calor, conforme indicado na Figura 8. Esta sequência deve ser repetida até completar a construção da peça.

Figura 8 - Laminação de chapas

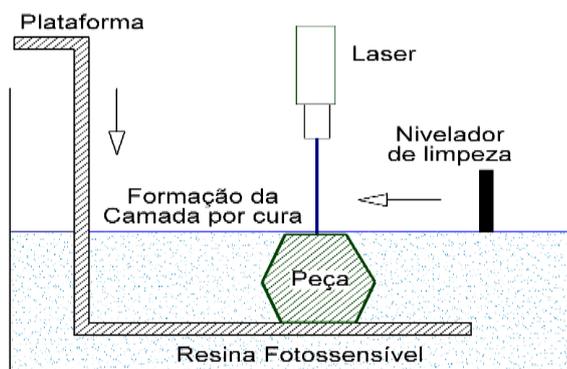


Fonte: Autor

### 3.1.5 Fotopolimerização em cuba (*vat photopolymerization*)

Os processos de fotopolimerização garantem a consolidação camada a camada e usam resinas poliméricas líquidas junto com a radiação laser ou na faixa do UV, como ilustrado na Figura 9. Quando da incidência da radiação de UV na resina, o feixe foto iniciador interage com uma molécula de monômero, iniciando e construindo uma cadeia polimérica com a criação de ligações fortes entre as cadeias. O componente é fabricado sobre uma plataforma imersa numa cuba, que está preenchida por resina fotossensível. A cura da resina ocorre de forma seletiva formando o desenho programado. As principais variantes são estereolitografia (SL) e o processamento de luz direta. A técnica é flexível com a facilidade de suportar diversas configurações e possibilita obter elevada precisão e ótimo acabamento na superfície. No entanto, uma desvantagem é a limitação de uso de acrilatos e epóxis como matéria prima.

Figura 9 - Fotopolimerização em cuba

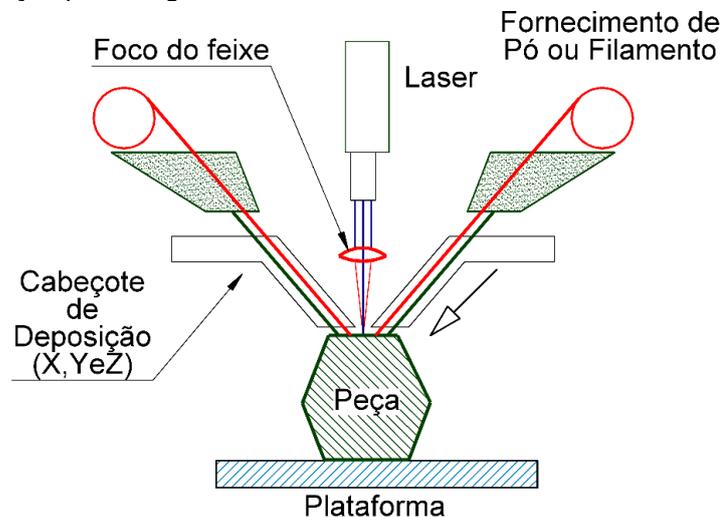


Fonte: Autor

### 3.1.6 Deposição por energia direta (*DED - Direct Energy Deposition*)

No processo DED, a deposição de material ocorre pela ação de uma fonte de calor direcionada para um substrato ou material de base. A fonte de calor pode ser procedente de um: feixe laser, feixe de elétrons ou a arco elétrico. O material a ser depositado pode estar na forma de arame ou material particulado, este é fundido e lançado por meio de um bocal. O fluxo de material fundido e a fonte de calor movem-se em conjunto, depositando o material no substrato e criando o efeito de camada sobre camada como pode-se observar na Figura 10. As vantagens desta técnica em relação aos outros processos de MA estão relacionadas às maiores taxas de deposição e capacidade de fabricar componentes de maior dimensão. Estes processos necessitam de etapas após o processo de fabricação para melhorar a precisão dimensional, reduzir rugosidade e aliviar tensões internas. Entre os processos desta categoria destacam-se as variantes LENS (*laser engineered net shaping*) e o EBAN (*electron beam additive manufacturing*).

Figura 10 - Deposição por energia direta



Fonte: Autor

### 3.1.7 Fusão em leito de pó (*powder bed fusion*)

A técnica de fusão em leito de pó (*powder bed fusion - PBF*) é a tecnologia de impressão 3D mais utilizada [15]. A fusão seletiva a laser (*Selective Laser Melting - SLM*) e fusão por feixe de elétrons (*Electron Beam Melting - EBM*) são dois processos de fabricação aditivos, baseados na fusão em leito de pó, que usam uma fonte de calor concentrada, incidindo na superfície do

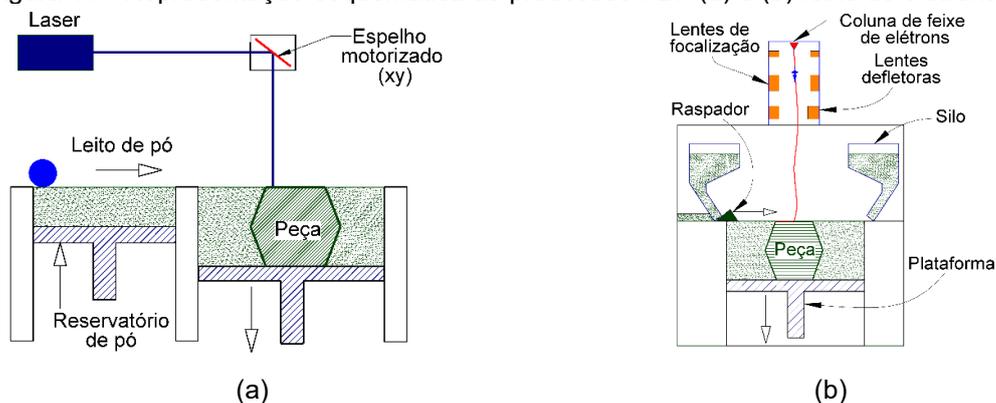
leito de pó, para fabricar peças metálicas mediante a construção de camada a camada [15]. Após o término da camada, a mesa é movimentada para baixo na espessura da camada para manter constante a distância entre leito e fonte. Este processo se repete até que sejam completadas todas as camadas da construção da peça. As representações esquemáticas podem ser observadas na Figura 11.

Os processos de manufatura aditiva FSL e EBM são tecnologias que vêm sendo difundidas e usadas em vários segmentos da indústria, em especial, na aeroespacial e de implantes médicos e odontológicos. Ambas as tecnologias são similares, no entanto, o processo de fabricação por EBM ocorre em vácuo, enquanto a FSL acontece sob atmosfera de gás inerte.

A principal razão para o crescimento destas tecnologias é a viabilidade de projetos, que pode ser obtida por propiciar: menor tempo no desenvolvimento de protótipo, melhores propriedades de desempenho, fabricação de geometrias complexas que não poderiam ser obtidas com processamentos tradicionais e economia de matéria prima [16], [17] e [18].

A partir deste leque de vantagens e de soluções foi inevitável a inclusão da FSL e da EBM no segmento de bioengenharia e médica. Portanto, geometrias anatômicas com altas complexidades de fabricação podem ser obtidas nestes processos, possibilitando, por meio de tomografias ou escaneamentos previamente realizados, a confecção de próteses feitas sob medida (customizadas), isto é, personalizadas ao paciente, tomando sua singular anatomia como parâmetro a ser usado nas condições de fabricação. Outra possibilidade destes processos é a construção de estruturas com porosidade controlada do tipo *scaffolds* [19] e [20].

Figura 11 - Representação esquemática de processos PBF (a) e (b) feixe de elétrons.



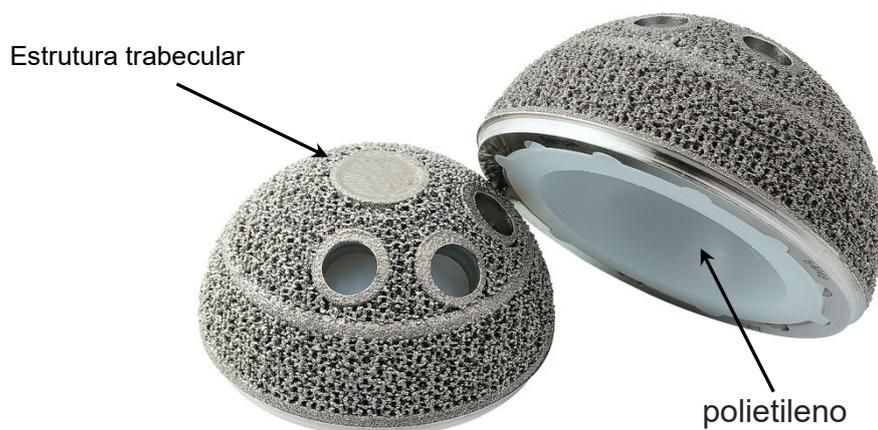
Fonte: Autor

O processamento envolvendo as tecnologias de MA vem sendo usado para obter componentes de geometrias complexas, em um processo de fabricação camada por camada. O procedimento de formar um modelo de desenho assistido por computador (CAD) em três dimensões (3D) de uma peça, realizar cortes de forma virtual em camadas finas (20 a 100  $\mu\text{m}$ ) e, na sequência, efetuar a construção de forma real por deposição repetitiva em camadas de matéria-prima revelou-se adequado em vários setores [15] e [16].

As partículas devem ter geometria esférica, normalmente, obtidas por atomização a gás ou a plasma. Em relação ao tamanho granulométrico na FSL utilizam-se um intervalo de 15-45 $\mu\text{m}$ , enquanto para o EBM utilizam-se partículas maiores no intervalo de 44 a 105 $\mu\text{m}$ , em razão da maior densidade de potência deste processo.

A tecnologia da MA tem potencial para aumentar a produtividade de itens de elevado valor, reduzir custos de fabricação, produzir peças metálicas personalizadas e reduzir o peso da estrutura, por meio do uso de porosidade controlada (estrutura trabecular) e complexa [17], conforme pode ser observado na Figura 12. No entanto, apesar do aumento de pesquisas em MA, ainda é possível verificar inconsistências na qualidade da peça, trincas, porosidades, regiões não fundidas e problemas de rugosidade.

Figura 12 - Estrutura trabecular de um implante.



Fonte: Retirada de [21].

### 3.2 FUSÃO SELETIVA A LASER (FSL)

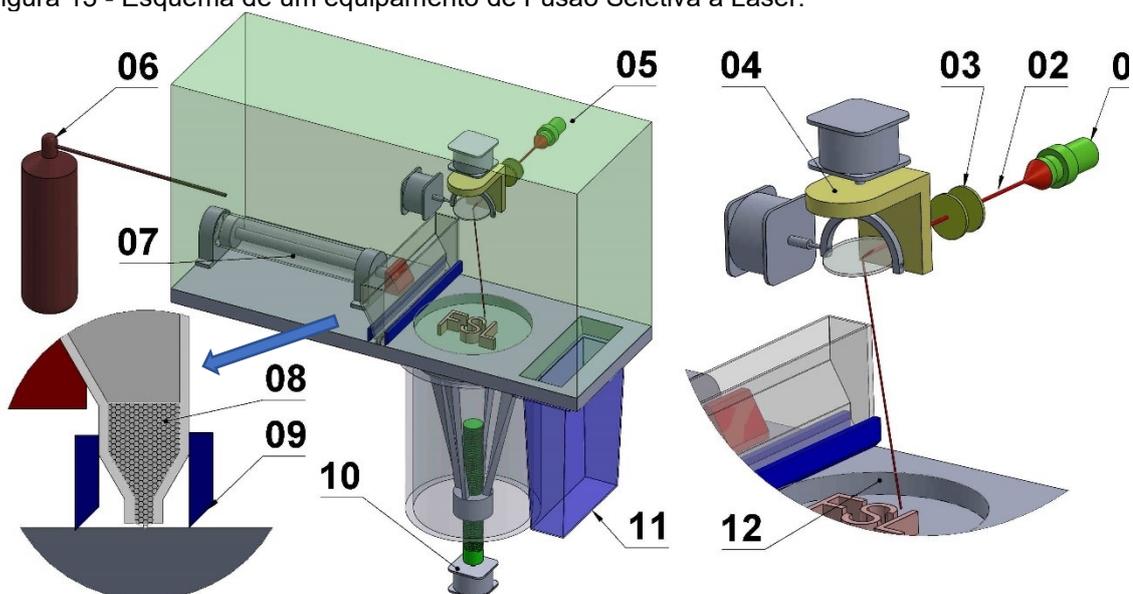
A Fusão Seletiva a Laser (FSL) é uma técnica de Manufatura Aditiva baseada na adição sucessiva de camadas de material. Inicialmente, utiliza-se um modelo computacional tridimensional (3D CAD) para definir a geometria do material a ser fabricado. Em seguida os dados são exportados para um equipamento de FSL, onde o produto é obtido.

#### 3.2.1 Equipamento de FSL

O equipamento, cujo exemplo está esquematizado na Figura 13, contém os seguintes itens:

- 01 - Fonte emissora do Laser;
- 02 - Feixe laser;
- 03 - Lentes focais;
- 04 - Espelho móvel para direcionar o feixe laser no plano cartesiano (X e Y);
- 05 - Atmosfera controlada;
- 06 - Gás inerte (Argônio);
- 07 - Sistema de abastecimento de pó metálico;
- 08 - Silo;
- 09 - Raspador para nivelar e suavizar a superfície do pó;
- 10 - Sistema para abaixar a câmara de trabalho na construção de camadas (z);
- 11 - Cesto para receber o excesso de pó e
- 12 - Leito de fusão.

Figura 13 - Esquema de um equipamento de Fusão Seletiva a Laser.

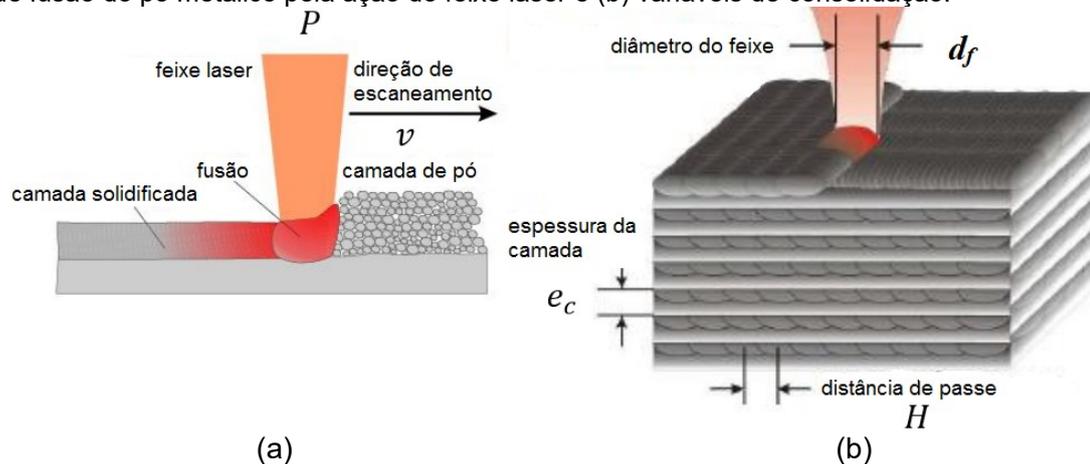


Fonte: Autor

O feixe Laser é gerado em uma fonte emissora, sendo seu diâmetro controlado pelas lentes focais. O feixe é refletido em um espelho móvel do sistema de escaneamento, que faz seu redirecionamento para a câmara de trabalho. A ferramenta apresentada na Figura 13 se desloca sobre a câmara de trabalho, homogeneizando a superfície do pó contido nesta região. Posteriormente, uma camada de pó é atravessada pelo feixe de laser e o calor gerado deve ser suficiente para fundir as partículas, formando assim uma poça de fusão, que se solidifica na geometria pré-determinada segundo um modelo computacional. Após a solidificação de cada camada, o piso de trabalho se movimenta para baixo, para que uma nova camada seja produzida. Estas atividades se repetem até que a geometria desejada seja alcançada [22], [23] e [24].

O processo de fusão seletiva a laser (FSL) utiliza material metálico na forma de pó para consolidar objetos 3D. O processo ocorre por meio de um feixe laser que é o responsável por fornecer a energia térmica necessária para ocorrer a total fusão da camada de pós-metálicos, consolidando o objeto de camada a camada, conforme observado na Figura 14.

Figura 14 - Representação do processo de consolidação da técnica FSL, (a) detalhe da região de fusão do pó metálico pela ação do feixe laser e (b) variáveis de consolidação.



Fonte: Adaptado de [24].

Comparando-se com as técnicas convencionais de manufatura, a FSL conta com uma série de vantagens, em relação aos outros processamentos como por exemplo: não ter a necessidade de usar moldes, sem necessidade de troca

frequente de ferramentas, alta flexibilidade em relação à geometria e *design* e contar com um menor desperdício de material, entre outros [11] e [12].

Com a flexibilidade de projeto da FSL, na indústria biomédica, por exemplo, é possível imprimir instrumentos cirúrgicos e protótipos com excelente precisão dimensional, produção de implantes ortopédicos e odontológicos com excelente acabamento de superfície e qualidade, sendo usado em outras aplicações [22].

### 3.2.2 Parâmetros de Fabricação do processo de FSL

Em trabalho publicado [25] foi mencionado que o processo de FSL apresenta mais de 130 variáveis de processo, que estão relacionadas ao fabricante do equipamento. Segundo Kaufui V e outros autores [26] diversos parâmetros são de efeito secundário, assim vinte parâmetros seriam os mais importantes. De acordo com Germarovich [27] os parâmetros cruciais na fabricação de um componente com qualidade adequada são: a potência do laser ( $P$ ), a espessura de camada ( $e$ ), a distância entre varreduras ( $DV$ ) e a sua velocidade ( $v$ ), a temperatura da plataforma e a composição da atmosfera. Portanto, uma combinação deles pode gerar resultados adequados e aumentar a aplicação de FSL. Em outro estudo realizado por Pinto [2], foi considerado uma dezena de parâmetros, que se repetem na literatura e podem ser importantes para seu controle. Estes parâmetros estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros principais do processo de FSL

Matéria-prima	Feixe Laser	Processo
Composição química	Potência do feixe	Distância entre linhas ( <i>hatch</i> )
Tamanho da partícula	Diâmetro de Feixe	Distância entre pontos
Formato da partícula	Velocidade do feixe	Espessura de camada Ângulo de orientação de camadas

Fonte: Adaptada de [2].

O número de variáveis do processo FSL que influencia na qualidade e propriedade de componentes fabricados é muito extenso. Para a análise dos parâmetros chave se tornarem menos dispendiosos, com redução de tempo e custo, pode-se optar pela utilização de técnicas de modelagem estatísticas, como o projeto de delineamento de experimentos (DOE), usando a análise de regressão e análise estatística pelo método da análise de variância (ANOVA) [28].

### 3.3 Parâmetros do Feixe Laser

#### 3.3.1 Potência - Densidade de energia volumétrica

A potência do feixe usada no processo de FSL está diretamente relacionada a energia fornecida ao pó. No entanto, não deve ser analisada de forma isolada, mas em conjunto com a massa de material particulado fundido ou de uma forma mais ampla com a energia por volume cedido ao material. Segundo Marques [29], a potência pode ser responsável por até 85% do tempo total de fabricação, uma vez que, com maiores potências, as velocidades de escaneamento do feixe laser devem ser maiores. Assim, existe uma relação direta da potência com a velocidade de movimentação do feixe laser [30].

A densidade de energia volumétrica ( $E$ ) [ $J \cdot mm^{-3}$ ] é uma relação entre a potência do feixe laser - ( $P$ ) [Watts] pelo produto da velocidade de varredura do feixe laser - ( $v$ ) [mm/s] pela distância entre linhas de escaneamento ( $H$ ) [mm] e pela distância ou espessura entre camadas ( $t$ ) [mm]. A densidade de energia ( $E$ ) [ $Joule \cdot mm^{-3}$ ] pode influenciar na qualidade dos materiais produzidos pela técnica de FSL, afetando a densificação dos componentes fabricados. A relação de densidade de energia volumétrica está apresentada na equação 1.

$$E = \frac{P}{(H \times v \times t)} \quad (1)$$

Segundo os autores [31] [32], a relação do aporte de calor dado pelo feixe laser é importante na definição das propriedades de desempenho nas características de superfície e nas porosidades do consolidado.

A partir da equação (1) é possível avaliar de forma mais completa as características da peça consolidada. Assim, uma elevação da potência do feixe laser pode não aumentar o volume de material fundido, desde que o produto do denominador da equação (1) tenha um maior aumento proporcional em relação à potência. Maiores valores de densidade de energia provocam maior área fundida, podendo alterar densidade e padrão de acabamento. Assim, as propriedades e acabamento, tais como, precisão dimensional e rugosidade das peças, além da densidade não dependem somente da potência aplicada, que em muitas vezes é tomada como referência.

Apesar da densidade de energia ser utilizada como parâmetro de processo, apresenta algumas limitações por não considerar o impacto de fenômenos físicos na geometria e solidificação da poça de fusão [16].

### **3.3.2 Diâmetro do Feixe Laser**

O diâmetro do feixe é uma característica importante no ajuste dos parâmetros de processamento. Este é determinante tanto para o cálculo da densidade de energia, quanto para o controle da porcentagem de sobreposição entre as passadas do feixe. As características de sobreposição são decisivas para o controle do grau de sinterização e fusão, que influencia nas propriedades da peça, como por exemplo, a variação da densidade da peça [33].

O diâmetro do feixe interfere de forma direta na largura da linha de escaneamento na construção das camadas. Quando a potência for mantida constante e usar-se um menor diâmetro do feixe, a densidade de potência (energia pontual) tem seu valor aumentado. O laser possui uma distribuição de densidade de potência gaussiana, com maior intensidade na região central [34].

### **3.3.3 Velocidade de Varredura**

A velocidade de varredura do feixe laser é um parâmetro determinante nas propriedades e características finais da peça consolidada. Uma baixa velocidade aumenta a quantidade de energia no material, pois o tempo é mais prolongado em um ponto específico, neste caso pode causar empenamento da peça por excesso de retração. Em contrapartida, uma velocidade elevada pode não fornecer energia suficiente para a cinética de sinterização ou de fusão do material particulado [35].

A estabilidade da poça de fusão é afetada pelo aumento de velocidade de varredura. Pode-se controlar o tempo necessário para a fabricação, porém para velocidades mais altas, é requerida uma potência mais elevada para garantir a fusão completa do material [9] e [10].

Em elevadas velocidades de movimentação do laser ( $1000 \text{ mm}^{-\text{s}}$ ) foram observadas a presença de grãos finos com alta fração de contornos de grão de baixo ângulo e microestrutura de morfologia fina do tipo celular. Nestas amostras foram obtidas uma resistência à tração de até 707 MPa, com um alongamento de 30% no total. As amostras fabricadas com velocidade de varredura de 800 mm/s

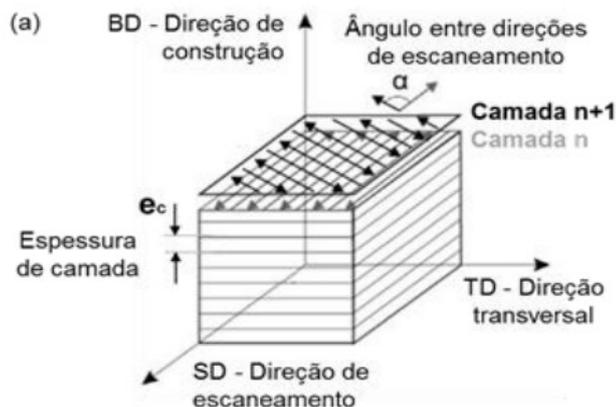
apresentaram alta ductilidade com alongamento total até a ruptura de 55% [36]. Segundo Liu [37] o valor da ductilidade foi melhorado pela eliminação de poros residuais nos limites da poça de fusão.

Diversos autores em seus estudos consideraram a velocidade de movimentação do laser o parâmetro de maior influência na densidade das peças fabricadas por FSL [2], [29] e [37].

### 3.4 Parâmetros de Consolidação

Os parâmetros de consolidação do componente fabricado por FSL estão relacionados aos itens de: espessura de camada, espaçamento entre camadas (*hatch*), sentido e orientação de escaneamento do feixe laser, ângulo de rotação entre as camadas e número de passadas do feixe laser em cada camada [38], [32] e [39]. Na Figura 15 é mostrada uma representação esquemática dos parâmetros de processo que influenciam na consolidação por FSL com sistemas de coordenadas SD (direção de escaneamento), TD (direção transversal) e BD (direção de construção).

Figura 15 - Parâmetros de processo que influenciam na consolidação por FSL com sistemas de coordenadas SD (direção de escaneamento), TD (direção transversal) e BD (direção de construção).



Fonte: Adaptada de [17].

#### 3.4.1 Espessura de Camada

A utilização de maiores espessuras de camada implica em menor o tempo requerido para a fabricação, portanto, aumento de produtividade, no entanto é necessário aumentar a potência ou diminuir a velocidade de movimentação do feixe para fusão completa em sua profundidade. O aumento da espessura de

camadas, também pode resultar no aumento da rugosidade da superfície e redução da acurácia dimensional por dificultar a fusão completa nesta região [5]. A conexão entre as camadas somente pode ser possível, quando as camadas anteriores também forem parcialmente refundidas, portanto existe limitação na dimensão da espessura a ser empregada na FSL.

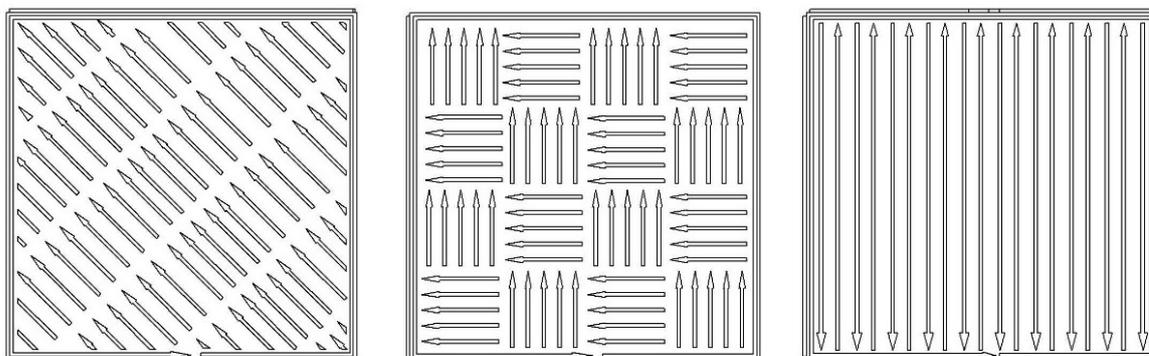
### 3.4.2 Espaçamento de hachuras do laser - *hatch*

O termo “*hatch*” é o espaço de hachura entre as faixas adjacentes de incidência do feixe laser que influenciam na sobreposição e adesão das trajetórias consecutivas. A dimensão do “*hatch*” afeta a rugosidade e porosidade da superfície dos componentes [40]. Valores muito elevados nesta dimensão podem provocar falta de fusão nas extremidades da hachura, podendo ocasionar a presença de partículas de pó sem fusão. Esta dimensão é inversamente proporcional a densidade volumétrica de energia.

### 3.4.3 Estratégia de Varredura quanto à orientação de fabricação

A orientação de fabricação conhecida como estratégia de varredura, também conhecido como “*scan pattern*” pode ser realizada de várias formas, consistindo tipicamente em trajetórias de escaneamento retilíneas e paralelas. A direção pode ser alterada tanto em uma única camada, como entre camadas consecutivas. Como evidenciado em pesquisas anteriores [40] e [41] a estratégia de varredura quanto à orientação de fabricação é um dos principais fatores que influencia o direcionamento preferencial dos grãos, consequentemente possibilidade de anisotropia e textura.

Figura 16 - Exemplos de estratégias de direcionamento da varredura do feixe laser



Fonte: Adaptada de [40].

### **3.5 Propriedades do material particulado**

Em métodos de leito de pó onde são criadas camadas sucessivas o tamanho e a forma da partícula estão relacionados ao nível de empacotamento, podendo afetar na espessura da camada e densidade relativa da camada depositada. O conhecimento da distribuição do tamanho das partículas é essencial para caracterização do pó e influencia a seleção de parâmetros de processamento. Componentes fabricados por FSL para terem alta qualidade e padronização devem utilizar partículas esféricas sem satélites, o que auxilia uma boa fluidez, homogeneidade na distribuição do pó no leito de fusão e alta densidade aparente durante o processamento segundo Vayssette [17] e Sieniawski [40].

#### **3.5.1 Composição Química**

A composição química pode influenciar nas propriedades termodinâmicas e físico-químicas dos materiais, além de alterações da microestrutura e propriedades mecânicas. Para a FSL são utilizadas ligas, como aço inoxidável austenítico AISI 316 L, ligas de Cobalto-Cromo e de titânio. O aço inoxidável AISI 316L é uma liga que apresenta biocompatibilidade, alta resistência à corrosão e elevada resistência mecânica, sendo muito utilizada na fabricação de diversos componentes na área da saúde [42].

#### **3.5.2 Tamanho de partícula**

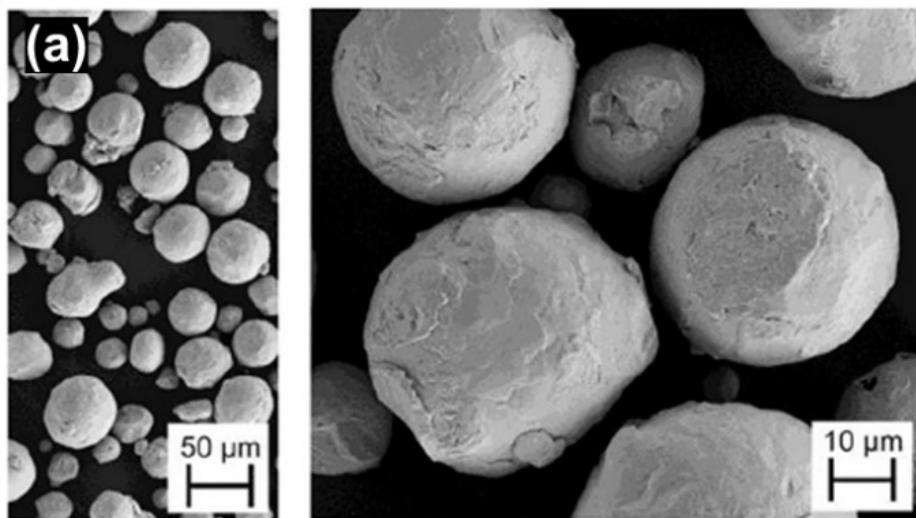
Em relação ao tamanho granulométrico na FSL utilizam-se partículas esféricas no intervalo de 15 - 45  $\mu\text{m}$ . A uniformidade no empacotamento do leito de uma camada para outra é importante para melhorar a densidade do componente fabricado. A presença de vazios pode reduzir a condutividade térmica do leito e em consequência, a absorção da potência do laser e o fluxo de metal líquido [43]. Portanto, são preferidos pós esféricos com um pequeno intervalo granulométrico para gerar um empacotamento e porosidade mais uniforme possível na camada.

#### **3.5.3 Morfologia do Pó**

No processo de FSL uma variável importante é a morfologia da matéria prima. A geometria esférica, conforme apresentado na Figura 17 é a mais indicada para se obter o melhor rendimento no processo, por permitir alta fluidez,

empacotamento padronizado e porosidade uniforme. Portanto, a partir de pós de geometria esférica é possível obter uma camada homogênea e densa de material particulado, que são características desejáveis para a técnica de FSL. Pós de geometria esférica podem ser obtidos, em especial por atomização a gás e atomização a plasma.

Figura 17 - Partículas obtidas por atomização a gás.



Fonte: Adaptada de [44].

No processo de atomização a gás um filete de metal líquido é vazado por um orifício no fundo de um cadinho. Este filete é desintegrado pela incidência de um gás, normalmente, argônio, ar, nitrogênio ou hélio. Este processo possui elevado custo, em especial pelo pequeno rendimento na faixa granulométrica empregada no processo de FSL, além do alto custo de gás inerte usado na atomização. No entanto, ainda é um processo de tecnologia conhecido e desenvolvido, sendo o processo de atomização o mais utilizado na FSL.

Estudos mostraram [44] e [45] que o processo de atomização a gás pode criar partículas esféricas, mas com alguns satélites (pequenas partículas aderidas na superfície das partículas maiores), vazios e rugosidade reduzidos, além de oferecer um grau de pureza superior à outras técnicas, como por exemplo a atomização a água. Portanto, características de uniformidade de geometria e de tamanho, além de pequena presença de satélites contribuem para elevar as características de fluidez e de empacotamento do material.

No processo de atomização à plasma o desperdício gerado pela técnica é muito pouco ou inexistente, reduzindo significativamente os custos para o usuário

final. Neste processo é utilizado um arame como matéria prima. Este arame é fundido e atomizado em pequenas gotas esféricas pela ação de um uma tocha de plasma [44] e [45].

#### **3.5.4 Variáveis Importantes no processo de FSL**

Outros autores [32], [24], [46] e [47] consideraram a região do ambiente de consolidação como parâmetro relevante do processo de FSL. No ambiente de consolidação os principais parâmetros são: atmosfera protetora, temperatura ambiente, tipo e volume de gás e porcentagem de O<sub>2</sub> presente no interior da câmara. A camara deve ficar sujeita a um fluxo do gás contínuo ao longo do processo, para garantir uma porcentagem mínima de oxigênio na atmosfera.

A composição da atmosfera influencia o grau de contaminação no interior câmara e em consequência, a qualidade do consolidado. Grande parte dos metais necessitam de alguma de proteção contra a oxidação quando submetidos a elevada temperatura. A formação de uma camada de óxido na superfície dos pós dificulta a ligação entre as partículas e a obtenção de propriedades adequadas.

No caso de aço inoxidável AISI 316 L na FSL, a atmosfera mais indicada é o gás inerte argônio. Outras atmosferas redutoras podem ser usadas, como misturas com hidrogênio, no entanto, a solubilidade do hidrogênio aumenta na austenita com a temperatura, provocando uma quantidade elevada nos intersticiais e fissuras. Atmosferas mistas, como N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>, também podem ser usadas, no entanto, pode ocorrer um aumento de dureza pela formação de nitretos do tipo Cr<sub>2</sub>N presentes em solução na fase austenítica e pode diminuir a resistência a corrosão.

### **3.6 Aço Inoxidável AISI 316 L – Propriedades e Aplicações**

O aço inoxidável AISI 316 L é uma liga Ferro e Carbono com cromo-níquel e molibdênio, sendo o cromo responsável pelo aumento da resistência a corrosão e à abrasão, já o níquel é responsável pelo aumento da resistência ao impacto e o molibdênio aumento da resistência à corrosão a altas temperaturas. Este aço tem uma estrutura austenítica, não temperável, não magnético. Possui resistência à oxidação até a temperatura de 875 °C, porém a resistência à corrosão é garantida até a temperatura de 300 °C. A presença de molibdênio na composição

química deste aço eleva sua resistência mecânica, além de aumentar a resistência ao ataque corrosivo em meios clorados e não oxidantes.

Em processos de fabricação tais como, soldagem ou conformação a quente no aço inoxidável AISI 316 L, a carepa formada na superfície deve ser eliminada para evitar uma diminuição da resistência à corrosão. Esta liga apresenta boa capacidade de conformação a frio, embora exija maiores esforços de conformação do que os aços não ligados. No estado solubilizado pode apresentar leve magnetismo que se eleva pelo grau de deformação a frio [48].

A composição química do aço inoxidável AISI 316 L, pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do aço inoxidável AISI 316L para manufatura aditiva.

Elementos	Fe	C máx	Mn máx	P máx.	S máx	Si máx	Ni	Cr	Mo
%	Bal.	0,03	2,00	0,045	0,03	0,75	10 - 14	16 -18	2 - 3

Fonte: Retirada de [49].

As principais aplicações do aço inoxidável AISI 316 L são na fabricação de peças que exigem alta resistência à corrosão, tais como válvulas, tubos, recipientes, equipamentos hospitalares e farmacêuticos e implantes. O baixo teor de carbono reduz a tendência de corrosão. O baixo teor de carbono é controlado em um máximo de 0,03% ficando assim reduzida a possibilidade de ocorrer a sensitização, que é a corrosão intergranular. De forma adicional é diminuída a reação com o oxigênio dando ao material a característica de biocompatibilidade, sendo indicado para uso em ambientes onde exista o ataque de corrosivo, tais como: fluidos corpóreos como em implantes, diversos ácidos, banhos clorados, soluções alcalinas e salinas [49].

O aço inoxidável 316L na condição solubilizada apresenta as propriedades mecânicas indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades Mecânicas e físicas do aço inoxidável AISI 316L

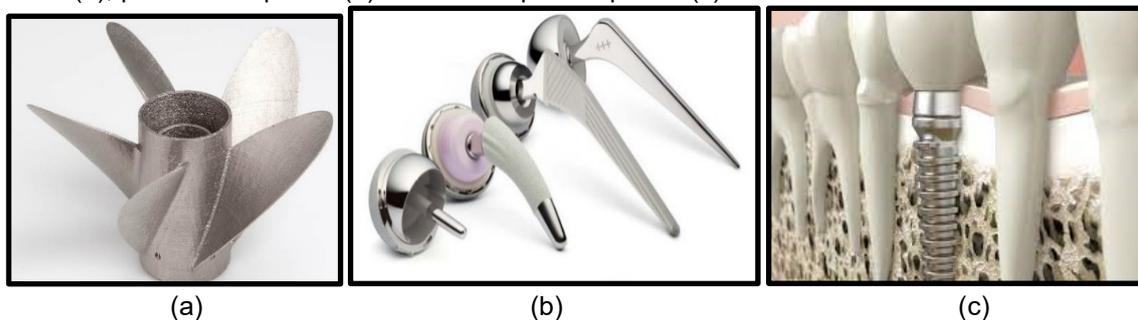
Propriedades	Referencias	Unidade
Dureza	160	Kgf/mm <sup>2</sup>
Limite de resistência	485	MPa
Limite de escoamento	170	MPa
Alongamento	40	%
Estricção	60	%
Módulo de elasticidade	193 – 200	GPa
Calor específico (0°C a 100°C)	69 – 108	J/Kg.K
Condutividade térmica (100°C)	18,7 – 22,8	W/mK
Densidade	7,8 – 8,0	gcm <sup>-3</sup>

Fonte: adaptado de [1] e [50].

### 3.7 Fusão Seletiva a Laser em aço inoxidável AISI 316L

Pós-metálicos de aço inoxidável AISI 316 L são matéria prima na fabricação de componentes em setores, tais como: óleo e gás, automotivo, aeronáutico, aeroespacial, alimentício e em outros como na área da saúde (médica e odontológica). Produtos destinados para estes setores, de forma especial na fabricação de instrumentais e implantes na área da saúde necessitam atender requisitos específicos, como por exemplo: propriedades mecânicas adequadas, baixo coeficiente de expansão térmica, rugosidade controlada e elevada resistência à corrosão e oxidação. Na Figura 18 podem ser observados alguns componentes fabricados em aço inoxidável e FSL.

Figura 18 – Componentes fabricados por FSL usando o aço inoxidável AISI 316 L – Hélice de barco (a), prótese do quadril (b) e Parafuso para implante (c).



Fonte: Retirado de (a) - [49], (b) - [51] e (c) [52].

O aço inoxidável AISI 316 L é muito usado no Brasil, em razão do seu baixo custo, alta resistência à corrosão (alta resistência à degradação, pouca liberação de íons metálicos aos tecidos vizinhos e reduzido efeito metabólico [51] ) e adequada

biocompatibilidade em relação aos demais biomateriais (ligas de titânio e das ligas de Co-Cr). No setor da saúde, a utilização de implantes e próteses vem aumentando em quantidade e qualidade, uma vez que, estão sendo privilegiadas características como: durabilidade (maior tempo de uso sem trocas ou necessidade de cirurgias posteriores) e redução de rejeição durante seu uso.

Dentro do cenário de desenvolvimento de tecnologias usadas para o bem estar dos seres humanos, a manufatura aditiva (MA), empregando a impressão 3D, vem sendo utilizada na área da saúde na fabricação de componentes de AISI 316 L [49], [51] e [53]. No caso da MA com o uso da FSL encontram-se como aspectos positivos, entre eles, fabricar componentes com dimensão próxima da final e personalizados ao usuário, obter elevadas propriedades de desempenho e redução do uso de matéria prima.

### **3.8 Avaliação de Propriedades Mecânicas e Microestrutura**

Os aços inoxidáveis podem ter na temperatura ambiente as fases: austenítica, ferrítica, martensítica, duplex ou endurecíveis por precipitação, além da presença de precipitados na temperatura ambiente. No caso da presença apenas da fase austenítica, na temperatura ambiente, o aço tem característica paramagnética que associada com suas resistências, mecânica, de corrosão quando exposto a temperaturas entre 400°C e 900°C e de oxidação quando submetido a determinadas condições climáticas, faz da família dos aços austeníticos, em especial o AISI 316 L, indicado para aplicação em diversos setores e em especial na área da saúde [50].

Em relação ao processamento por FSL, o aço inoxidável é um material bastante usado, pois não ocorrem transformações de fase significativas no aquecimento e resfriamento. No entanto, é necessário entender o comportamento do AISI 316 L e sua relação com os parâmetros empregados na fusão seletiva a laser e características de resfriamento [53], [54] e [55].

A qualidade da superfície em componentes fabricados por SLM é inferior aos outros processos de fabricação, como a usinagem. O valor de rugosidade média típico de um componente fabricado por retífica é de 1-2  $\mu\text{m}$ . No entanto, o valor médio da rugosidade de componentes fabricadas com SLM situa-se entre 10 e 30  $\mu\text{m}$ . Diversos aspectos influenciam na rugosidade de componentes fabricados por SLM, tais como: propriedades do material particulado, parâmetros

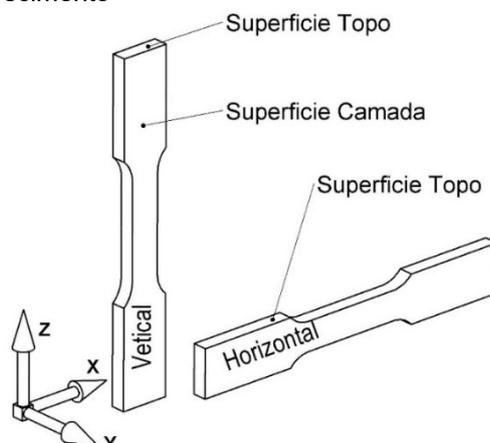
do processo, complexidade da peça e a localização no substrato [56].

As propriedades mecânicas dos materiais produzidos por FSL, estão ganhando grande atenção na indústria e no cenário acadêmico [55] e [57]. Em estudo realizado em amostras de AISI 316 L [58] fabricadas por FSL foi observado maiores limites de resistência à ruptura e escoamento e menor alongamento em ensaios de tração, se comparado com a fabricação por fusão ou prensagem isostática a quente. Correlação entre processos de fabricação convencional e por manufatura aditiva com as propriedades do aço inoxidável AISI 316 L [59].

As peças produzidas por FSL podem apresentar certa quantidade de defeitos volumétricos com porosidade, delaminação, falta de fusão, trincas e rugosidade da superfície que podem afetar o comportamento do material, quando submetido aos esforços mecânicos. Outra particularidade deste processo é que, as peças podem apresentar a presença de tensões residuais provenientes da alta densidade de energia aliada às altas taxas de solidificação. Estes dois fatores, juntamente com a natureza da microestrutura, impactam diretamente no comportamento mecânico das peças [57].

A posição de fabricação (direção de crescimento da peça) influencia as propriedades mecânicas. As amostras preparadas na posição horizontal apresentam maior resistência e ductilidade do que os espécimes preparados na posição vertical. A posição dos limites das camadas em relação à direção do carregamento durante um ensaio de qualificação é considerada a principal causa da menor resposta mecânica das amostras construídas na direção vertical, pois ocorrem alta concentrações de defeitos, poros e áreas não fundidas na direção perpendicular ao esforço. Partículas de aço parcialmente fundidas foram expostas nas superfícies de fratura dos corpos de prova e acredita-se que sejam responsáveis pelo aumento da dispersão no alongamento, até a falha e falha prematura de amostras fabricadas no sentido vertical. Acredita-se que também sejam responsáveis pela redução da resistência devido à redução na área de seção transversal efetiva [60] e [57].

Figura 19 - Esquema de fabricação de corpos de prova na posição vertical e horizontal. Eixo z representa a direção de crescimento



Fonte: Adptado de [57].

As propriedades mecânicas podem mudar de acordo com a direção da construção e a estratégia de fabricação na fabricação por FSL. Menores valores dos limites de ruptura e de escoamento e alongamento são atribuídos a presença de defeitos microestruturais, tais como: poros, trincas e falta de fusão. Além destes defeitos, as condições de resfriamento influenciam as propriedades mecânicas do consolidado [10]. Na Tabela 5 são mostrados estudos de avaliação de propriedades mecânicas de consolidados por FSL e sua condição de fabricação em AISI 316 L.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas obtidas em amostras de AISI 316L consolidadas por FSL.

processo	Condição	Microestrutura	Limite de escoamento [MPa]	Limite de resistência [MPa]	Alongamento [%]
BF*	Recozido	Austenítica	170	485	40
FSL	Como fabricado	Austenítica	590 ±17	705±15	44±7
FSL	Recozido (1050°C/1h)	Austenítica	375±11	635±17	51±3
FSL	Como fabricado	Austenítica	462	565	53,7
FSL	Como fabricado	Não informado	444±27	567±19	8±3
LENS	Como fabricado	91% Austenítica 9% Ferrita	410±5	640±20	36±4
LENS	TT (1150°C/2h)	Austenítica	340±15	610±5	42,5±0,5

\* BF - Bruta de fusão, TT - Tratado termicamente, LENS - *Laser engineered net shaping*

Fonte: Adaptada de [53].

A microestrutura obtida na FSL pode apresentar heterogeneidades e anisotropias, que estão relacionadas a alta velocidade do feixe de laser e a elevada velocidade de solidificação, o que resulta em alto gradiente de temperatura e diferentes taxas de solidificação ao longo da zona fundida [2].

As condições de formação da microestrutura no aço inoxidável AISI 316 L em processos de MA como na FSL são diferentes daquelas observadas nos processos tradicionais como, por exemplo, fundição [1]. Nos processos de FSL é possível observar as seguintes condições para o desenvolvimento da microestrutura: (i) rápido aquecimento [1]; (ii) solidificação rápida após a movimentação da fonte de calor (taxas de resfriamento entre  $5 \times 10^6$  a  $6 \times 10^6$  [2]); (iii) gradientes de temperatura e velocidade da interface de solidificação relativamente elevadas [1]; (iv) quantidade de calor acumulada [1]; (v) rea aquecimento e resfriamento devido a passagem do laser nas camadas ou trilhas vizinhas.

Essas condições de processamento resultam na formação de microestruturas (fases, morfologia de crescimento dendrítico ou celular, estrutura de grãos) diferentes das obtidas com os processos tradicionais. Por isso, compreender quais são essas condições e suas relações com a composição química e o desenvolvimento microestrutural podem permitir o controle de processo para obtenção das microestruturas e, portanto, das propriedades desejadas. A formação de uma estrutura com elevada fração de austenita, que é uma fase com elevada tenacidade, permite que estes aços não sofram trincas devido a tensões residuais e, portanto, sejam adequados aos processos de MA.

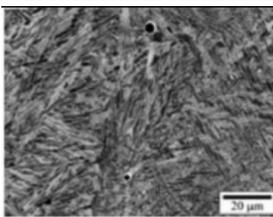
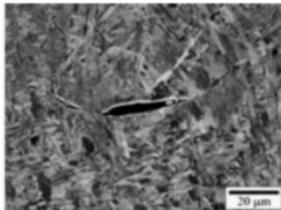
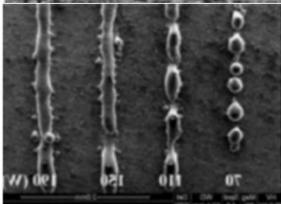
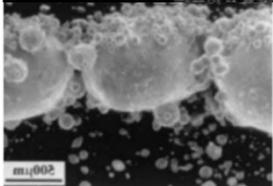
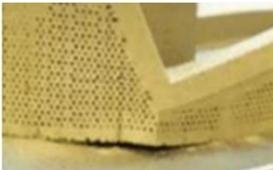
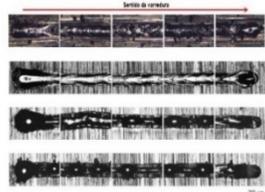
Considerando que os ciclos térmicos nos processos de MA são complexos, compreender como ocorre a evolução microestrutural é um desafio sendo que os impactos das variáveis de processo nessa evolução ainda são pouco compreendidos [2]. Além disso, tendo em vista que a microestrutura determina as propriedades, é fundamental a compreensão das relações entre composição química – processo – microestrutura [61].

A utilização de técnicas de caracterização microestrutural e de modelagem matemática [61] pode contribuir decisivamente para o entendimento e, assim, definição dos parâmetros de processo para obtenção de uma microestrutura específica.

### 3.9 Defeitos em amostras de FSL

Na microestrutura obtida numa consolidação de pós por FSL pode-se observar vários defeitos metalúrgicos, tais como poros esféricos e alongados, aglomerados na superfície (bolha), pós não fundidos, trincas, delaminação e tensões residuais, conforme apresentado na Tabela 6. Estes defeitos provocam redução de propriedades mecânicas, tais como, resistência ao escoamento, à ruptura, ao alongamento e outras propriedades [2].

Tabela 6 - Defeitos encontrados no processo FSL

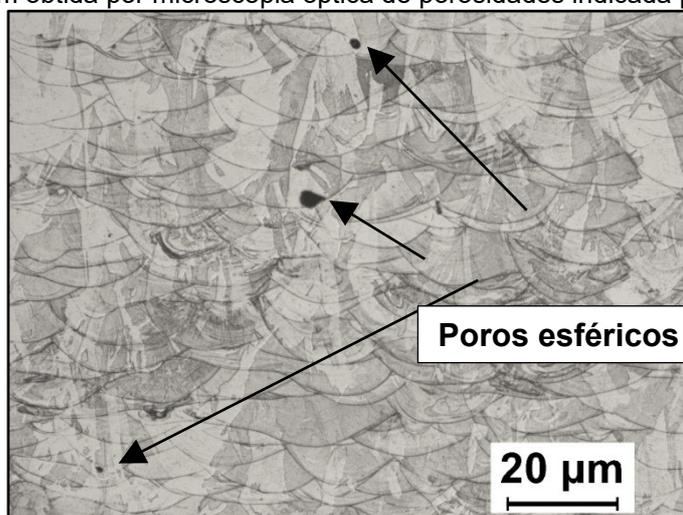
Defeito	Exemplo	Descrição	Tamanho típico
Poros (esféricos)		Poros aprisionados internamente no volume de material	~ 10 µm Feixe de elétrons e 5 a 20 µm FSL
Poros (alongados)		Poros gerados, principalmente, pela falta de fusão entre camadas nos processos de MA	50 a 500 µm
Aglomerados superficiais ( <i>balling</i> )		O material fundido não "molha" a superfície da camada, ao invés disso, cria grandes partículas esféricas na superfície da peça	Dependente das características da peça
Pós não fundidos		A poça de fusão várias em tamanho gerando regiões não fundidas	Aglomerados de partículas 100 a 150 µm
Trincas e delaminação		Trincas podem estar dentro do componente ou de forma mais comum, uma fissura entre o substrato e a peça é evidenciada	Quando a tensão residual supera o limite de escoamento
"humping"		Defeitos criados quando se usam altas velocidade de varredura, o leva ao acúmulo de líquidos na extremidade final da trilha de fusão, criando um inchaço na parte final da linha.	Profundidade 0,93mm. Alta densidade de energia volumétrica Largura 0,109 mm

Fonte: Retirada de [2] [62].

### 3.9.1 Porosidade

Porosidade é um defeito comum em ligas metálicas obtidas por MA [12] e possui uma distribuição aleatória no consolidado. De forma geral, a formação de porosidade pode ser relacionada a quatro aspectos: (i) operação com a condição denominada de “*keyhole*” (elevada profundidade de fusão na região de incidência do feixe laser) que ocorre quando os parâmetros de processos estão operando em elevada densidade de energia; provocando elevada profundidade de fusão no local de incidência do feixe laser [12], (ii) porosidade de gás proveniente do aprisionamento de gás pelas partículas do pó durante o processo de atomização [12] e [63]. (iii) aprisionamento de gás de proteção durante o processo de FSL; (iv) fusão incompleta de partículas do pó [12], [63]. Geralmente, considera-se que a formação de porosidade pode ser evitada por meio de adequação dos parâmetros de processo e, em uma primeira abordagem, os parâmetros de processamento por MA são definidos pelas combinações que resultam no menor nível de porosidade. Na Figura 20 pode ser observada a presença de porosidades.

Figura 20 - Imagem obtida por microscopia óptica de porosidades indicada por setas.



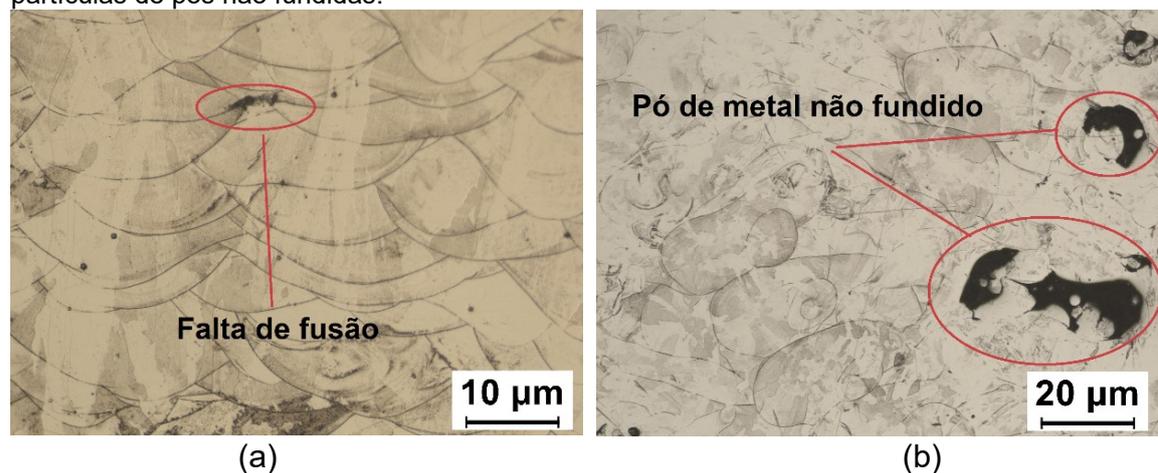
Fonte: Autor

### 3.9.2 Delaminação

Este defeito denominado por delaminação é a falta de fusão em razão da falta de energia, isto é, baixa densidade volumétrica de energia na FSL. Segundo estudo realizado por Pinto [2] a formação dos defeitos acontece em razão dos pós metálicos não são fundidos em sua totalidade, dificultando a formação de uma nova camada na camada anterior, apresentando uma sobreposição insuficiente. Existem dois tipos desta descontinuidade: (1) defeito de união não adequado em

razão de quantidade de metal fundido ser insuficiente durante a solidificação, gerando uma falta de fusão entre as camadas, como indicado na Figura 21a, (2) defeitos gerados por não ocorrer a fusão do material particulado, como mostrado na Figura 21b.

Figura 21 - Imagens obtidas por microscopia óptica das discontinuidades: (a) falta de fusão e (b) partículas de pós não fundidas.



Fonte: Autor

### 3.9.3 Tensão residual e Trincas

Os altos gradientes de temperatura combinado com as tensões residuais podem provocar a nucleação e a propagação de trincas em componentes fabricados por FSL. A nucleação de trincas ocorre com maior frequência na superfície construída, que possui pós metálicos fundidos parcialmente. Os aços inoxidáveis e as superligas à base de níquel, quando processados por FSL, em razão de sua baixa condutividade térmica e elevado coeficiente de expansão térmica são vulneráveis à nucleação de trincas. Alguns estudos de aquecimento do substrato no interior da câmara foram realizados e indicaram a redução de nucleação de trincas no consolidado por FSL [64], [65] e [45]. Para reduzir os problemas de nucleação de trincas e de elevada tensão residual nestes estudos recomenda-se pré-aquecer o substrato e aumentar a temperatura ambiente para peças fabricadas por FSL [64] e [65].

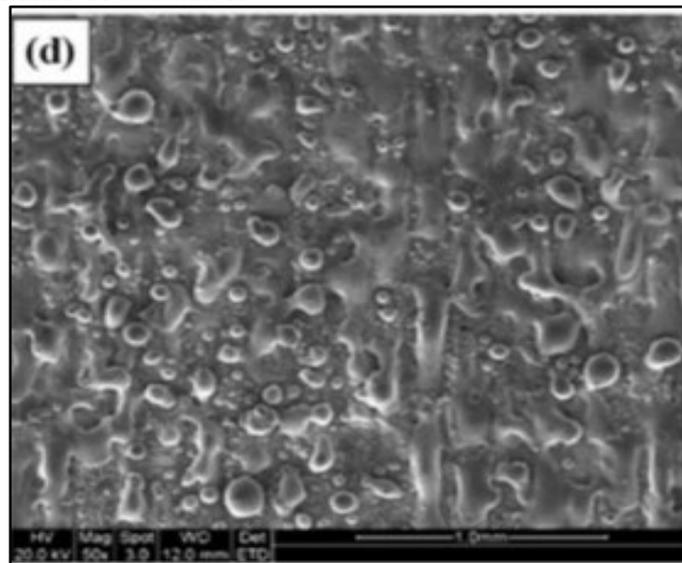
### 3.9.4 Aglomerados esféricos na superfície “*Balling*”

O defeito denominado por *balling* acontece na FSL, quando o material fundido não molha de forma adequada a superfície da camada. Nesta situação o aumento do ângulo de molhamento entre o material fundido e a superfície dificulta a união entre as superfícies, conforme mostrado na Figura 22. Este defeito causa

queda de propriedades mecânicas, diminuição de precisão dimensional e a rugosidade alta.

Em estudo realizado por [36] duas são as principais causas do *balling* e ambas estão relacionadas à estabilidade da poça de fusão. Numa primeira situação a baixa potência do laser não funde corretamente a partícula de pó, dificultando a fluidez e ainda provoca a aglomeração com outras partículas. A segunda situação é consequência da elevada velocidade de movimentação do feixe laser que pode estar relacionada com a elevada potência do feixe laser, gerando um regime turbulento no metal líquido com elevada possibilidade de gerar respingos na superfície da camada a ser construída.

Figura 22 - Imagem obtida por MEV indicando a presença de *balling* no aço inoxidável AISI 316L fabricado com velocidade de 800 mm/s.



Fonte: Retirada de [36].

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Material particulado

Os pós de aço inoxidável AISI 316 L utilizados foram atomizados a gás e adquiridos de dois fabricantes diferentes, denominados neste estudo, respectivamente, por fabricante “A” e por fabricante “B”.

### 4.2 Caracterização Química e Física dos Pós

A análise de composição química dos pós das ligas foi realizada, por meio do espectrômetro de fluorescência de raios X, usando energia dispersiva da Shimadzu modelo EDX-720. As análises dos elementos residuais de oxigênio, carbono, nitrogênio e enxofre foram efetuadas por um analisador elementar LECO modelo CS-400. Estes equipamentos estavam alocados no IPEN.

As propriedades físicas foram obtidas por metodologias de caracterização de pós-metálicos, segundo a norma ASTM F3049-14 [66] para processos de manufatura aditiva. Os ensaios foram realizados para determinar os valores de: densidade aparente, densidade batida, escoabilidade, densidade por picnometria de hélio, distribuição granulométrica, morfologia e formato de partícula.

Ensaio de escoabilidade e de densidade aparente dos pós foram realizados segundo as normas vigentes, respectivamente ASTM B213 [67] e ASTM B527-15 [68]. As medidas de escoabilidade devem apresentar uma diferença no tempo de escoamento de no máximo 0,4 segundos, entre cada medida de tempo aferida. A densidade aparente (DA) foi obtida pelo escoamento do pó pelo funil de Hall, até preencher o recipiente de volume de 25 cm<sup>3</sup>, sendo pesado e obtida a massa do pó contido neste volume. A relação da massa pelo volume fornece o valor de DA. As medidas destas propriedades são relevantes para a formação de um leito de pó homogêneo.

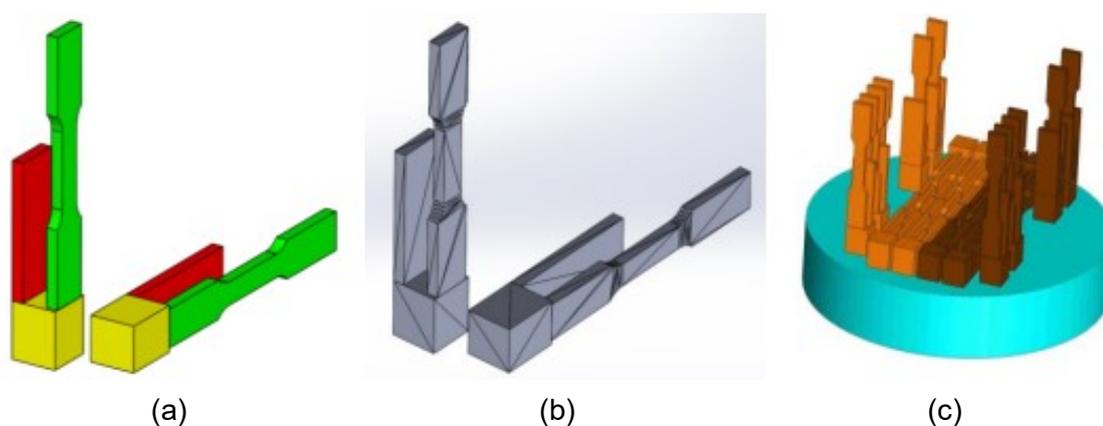
A partir dos resultados das propriedades físicas dos pós (densidade aparente “DA” e densidade batida “DB”) calculou-se o índice de fluidez dos pós denominados por índice de Carr “CI” e razão de Hausner “HR”. Estes índices proporcionaram a avaliação da qualidade dos pós, que tenham o requisito de elevadas, fluidez e empacotamento das partículas, como no caso do processo de FSL. Para tanto, os cálculos dos índices são relações entre (DA) e (DB) dos pós, o índice de Carr é calculado pela razão da diferença entre DB e DA por DB, enquanto a razão Hausner é o resultado da relação DA por DB.

O formato das partículas foi avaliado por microscopia eletrônica de varredura. No ensaio de análise granulométrica foi utilizado um analisador de partículas CILAS 1180 via úmida, (Modelo 1064, faixa: 0,004  $\mu\text{m}$  – 500,00  $\mu\text{m}$  / 100), alocado no Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CECTM) do IPEN. Uma quantidade de até 8 gramas foi adicionada em meio líquido e submetida ao ultrassom para homogeneização. A contagem de partículas foi feita por feixe de luz monocromático (*laser*). A técnica está baseada no princípio que a partícula iluminada é uma fonte de emissão de radiação secundária de maneira, que indica seu tamanho de partícula. A partir da curva de distribuição granulométrica obteve diâmetro mediano (D50) e diâmetros característicos D10 e D90. Onde D10 e D90 são os diâmetros máximos medidos e apresentados na unidade de micrométrica [ $\mu\text{m}$ ], respectivamente, por 10 % e 90 % das partículas.

### 4.3 Fusão Seletiva a Laser

Para produzir as amostras por FSL foi necessária a criação de um modelo eletrônico produzido por desenho assistido por computador CAD, neste trabalho utilizou-se o programa SolidWorks e foi gerado o arquivo na extensão STL. Na Figura 23 é apresentada a sequência utilizada para produção das amostras por FSL. Esta sequência foi empregada em todas as etapas deste estudo, independente da geometria das amostras utilizada em sua fabricação.

Figura 23 – Representação esquemática para produzir amostras (a) Geração do modelo CAD, (b) conversão para extensão STL e (c) disposição das amostras na plataforma de fabricação por FSL.

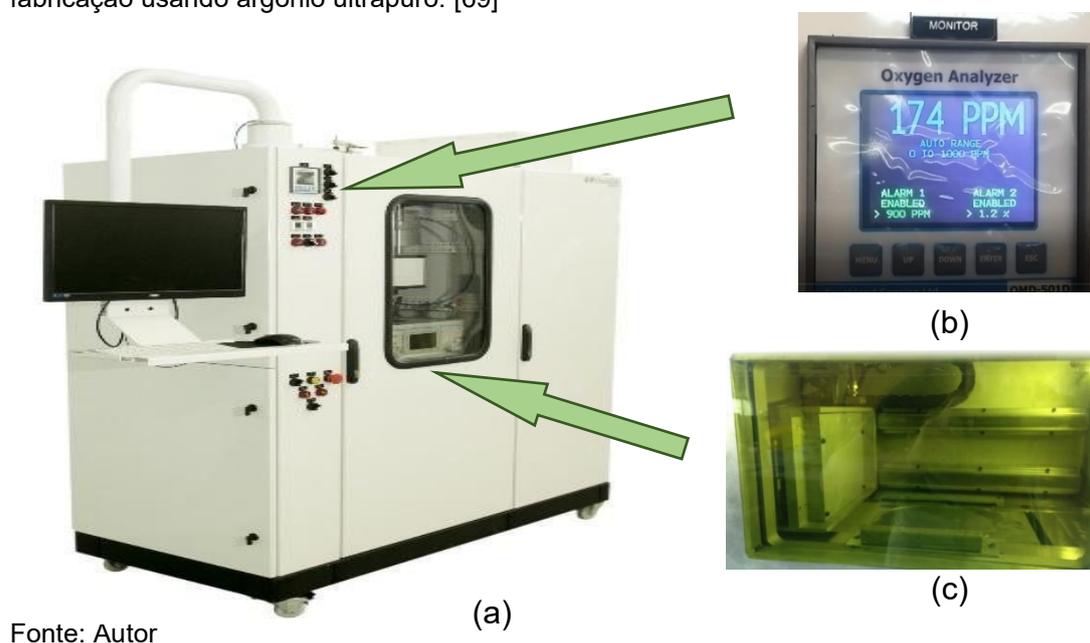


Fonte: Autor

Neste trabalho foi utilizado o equipamento de Fusão Seletiva a Laser, denominado OmniSint 160 de fabricação da Omnitek Tecnologia, conforme ilustrado na Figura 24a.

Essa máquina é equipada com um laser de fibra ótica dopado com itérbio (Yb) com a potência de 500 W. O diâmetro de foco do feixe laser situou-se entre 100 a 120  $\mu\text{m}$ . A atmosfera utilizada foi de argônio ultrapuro com teor máximo de 200 PPM de  $\text{O}_2$ . Na Figura 24b é mostrado o monitor de oxigênio na fabricação das amostras de aço inoxidável AISI 316 L. Na Figura 24 (c) e Figura 25 observam-se o interior da câmara com material particulado parcialmente consolidado.

Figura 24 - (a) Equipamentos de FSL OmniSint 160.e (b) oxímetro –(c) interior da câmara de fabricação usando argônio ultrapuro. [69]



Fonte: Autor

Figura 25 - Imagens do interior da câmara de fabricação usado argônio ultrapuro (a) durante a execução de camada e (b) após finalização de camada



Fonte: Autor

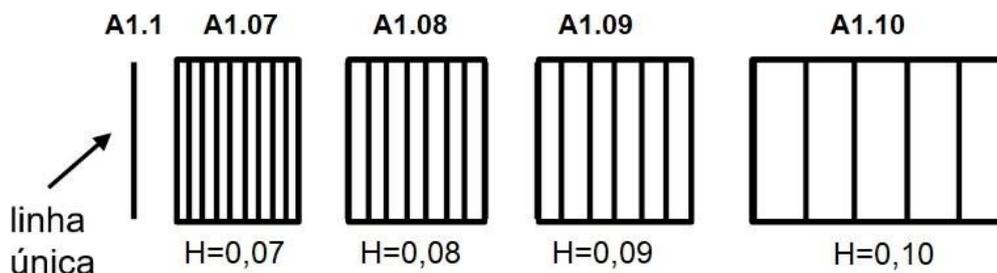
Foram fabricadas amostras nas dimensões reduzidas (10x10x10), procurando atender requisitos de: adequado acabamento da superfície, isto é, baixa rugosidade, densidade elevada (com baixo índice de porosidade) e

adequadas propriedades mecânicas, conforme norma referente a materiais metálicos obtidos por manufatura aditiva (ASTM F3122-14) [70].

#### 4.4 Determinação dos Parâmetros

Foram selecionadas as condições de: potências com intensidade de 53, 73, 93 e 132 Watts (intervalo de 10 até 27 % da potência do laser de 500 W) e velocidade de varredura de 800, 900, 1000, 1100 e 1200 mm/s. O valor da hachura nestas condições foi de 0,07, 0,08, 0,09 e 0,10 mm, atingindo o total de 80 condições diferentes. A espessura de camada foi mantida fixa em 30  $\mu\text{m}$ . A nomenclatura adotada nas amostras está mostrada na Figura 26. A estratégia de varredura usada nos testes iniciais foi de 0 e 90° entre as camadas.

Figura 26 - Representação do arranjo adotado, onde "A1" contém 5 amostras (A1.1 – linha única, A1.07 – amostra com  $H = 0,07$  mm, A1.08 – amostra com  $H = 0,08$  mm, Arranjo - "A1" (1 = relação de potência X velocidade de varredura). Fabricante "A".



Fonte: Autor

A retirada das amostras do suporte (placa de aço) foi realizada por eletroerosão a fio, com corte a distância de 0,5 mm do suporte e na sequência numeradas. O equipamento de eletroerosão está alocado no SENAI – SP CFP5.01.

Na plataforma de construção (“*build*”) havia oitenta amostras nas medidas de 10x10x10 mm e cada amostra foi fabricada em condições diferentes.

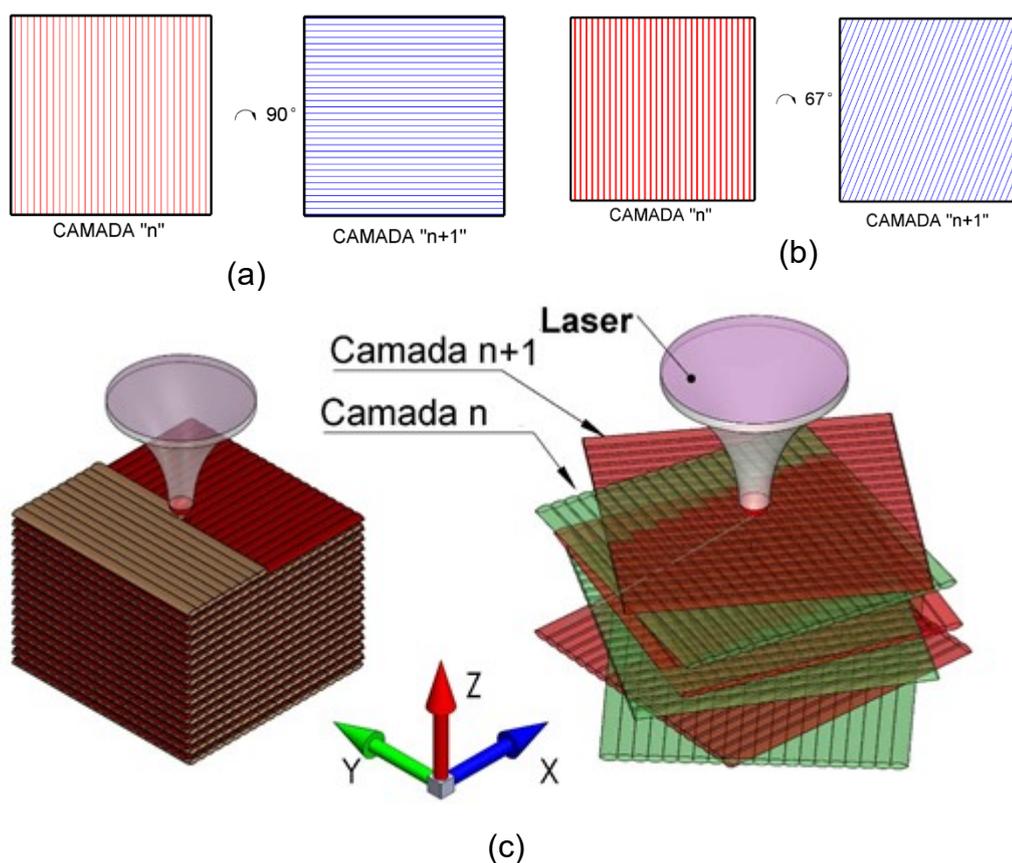
Parâmetros selecionados a partir de amostras produzidas pelo fabricante “A” foram usados na consolidação de amostras do fabricante “B” para estudar a influência das estratégias de varredura desenvolvidas durante o estudo, usando o equipamento OmniSint-160, em relação, aos pós de propriedades de empacotamento e fluidez distintas. As estratégias de varredura utilizadas são apresentadas na Figura 27 e corresponderam a:

(a) varreduras sequenciais e rotação de 0° e 90° entre camadas, denominada de sequencial 0/90 ou **S0/90**;

(b) varreduras sequenciais e rotação de  $67^\circ$  por camada, denominada de sequencial 67 ou **S67**;

Um segundo lote de amostras foi produzido com os pós do fabricante “B”. Utilizaram-se potências e velocidades maiores, em relação ao 1º lote. Estes parâmetros de potência do feixe laser ( $P$ ) e velocidade de varredura ( $v$ ) foram selecionados para reduzir o tempo de fabricação. As hachuras foram de 0,07, 0,08, 0,09 e 0,10 mm. A estratégia de varredura usada foi a rotação de  $67^\circ$  por camada. Os parâmetros usados e a porosidade aparente estão mostrados na tabela 21 no item de resultados e discussão.

Figura 27 - Representação esquemática das estratégias de varredura para consolidação das amostras do fabricante “B”: a) sequencial com rotação de  $0^\circ/90^\circ$  (S0/90), b) sequencial com rotação de  $67^\circ$  por camada – (S67) e (c) referência.



Fonte: Autor

## 4.5 Caracterização das Amostras

### 4.5.1 Medidas de Rugosidade e Cálculo de Densidade

A porosidade aparente foi determinada pelo analisador de imagens Image Analyzer PRO-PLUS, apenas em amostras sem defeitos, aprovadas após a realização de inspeção visual. As amostras para análise de porosidade aparente

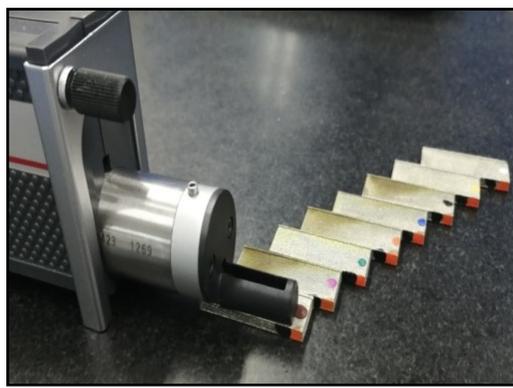
foram preparadas por técnicas de metalografia. A partir dos resultados obtidos de cada região foi feita a média destes valores, que indicou o valor médio da porosidade aparente de cada amostra.

Nas amostras de menor porosidade aparente foram medidos os valores de densidade hidrostática com base na norma NBR10838 de 05/1988 [13] e a rugosidade segundo DIN 4776 [71]. Os aparatos para realização destes testes estão mostrados na Figura 28. A densidade geométrica foi medida pela relação massa pelo volume da amostra. As medidas de densidade hidrostática e geométrica foram realizadas no Centro de Ciência e Tecnologia (CECTM) do IPEN.

Figura 28 – Aparatos utilizados para a realização dos testes de: (a) análise de densidade hidrostática e (b) análise de rugosidade.



(a)



(b)

Fonte: Autor

A densidade hidrostática foi calculada com base na *NBR10838* [13] e o resultado foi obtido a partir equação 2.

$$\rho_{\text{amostra}} = \frac{(M_{\text{amostra}} \times \rho_{\text{água}})}{(M_{\text{amostra}} + M_{\text{cpi}} - M_{\text{ci}})} \quad (2)$$

$\rho_{\text{amostra}}$  = densidade aparente da amostra  $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$

$M_{\text{amostra}}$  = Massa da amostra [g]

$M_{\text{cpi}}$  = Massa do contrapeso quando imerso em água [g]

$\rho_{\text{água}}$  = densidade da água (considerar igual a  $1 \text{ g/cm}^3$ )

$M_{\text{ci}}$  = Massa do conjunto corpo de prova e contrapeso, quando imerso em água [g]

A rugosidade é uma medida das variações do relevo de uma superfície, se o valor da rugosidade for alto implica na formação micro entalhes, facilitando o início de uma fratura originada a partir de uma superfície. Rugosidade elevada

diminui a capacidade da peça em deslizar, resistência à fadiga ao desgaste e à corrosão.

A rugosidade, na superfície das amostras, foi medida em 4 diferentes posições angularmente equidistante, através do Rugosímetro Mahr modelo M300C com leitor e impressora integrada e apalpador PHT 5 µm, como ilustrado na Figura 29 alocado na Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”. Os parâmetros utilizados para a medição do Ra foram “cut-off” de 2,5 mm e comprimento de amostragem igual a 12,5 mm. Segundo a norma ASME B46.1 [72] e NBR ISO 4287 [73], o parâmetro Ra é a média aritmética dos valores absolutos dos desvios do perfil ( $Y_i$ ) é dada pela equação (3).

$$R_a = 1/N \sum_{i=1}^N |Y_i| \quad (3)$$

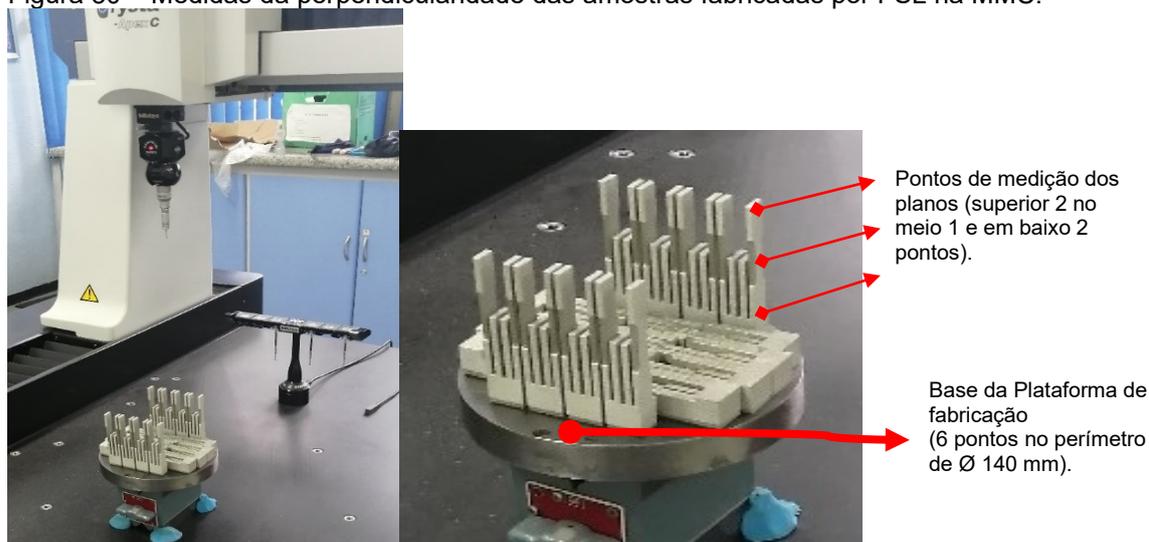
Figura 29 - Parâmetro de rugosidade Ra



Fonte: Autor (a) e [74].

Para verificar a perpendicularidade das amostras fabricadas por FSL foi utilizada a **Máquina de Medir por Coordenadas** modelo 475 da Mitutoyo e o programa **GEOPAK MCOSMOS** alocada na Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”. Na norma NBR ISO 2768-2 [75] são mencionados os desvios e o procedimento para esta medição, que consiste em realizar um plano de referência localizado na base da plataforma, que estava retificada com uma planicidade de 0,01 mm, após a definição deste plano são medidos os planos nas superfícies a serem verificadas conforme ilustra a Figura 30.

Figura 30 – Medidas da perpendicularidade das amostras fabricadas por FSL na MMC.

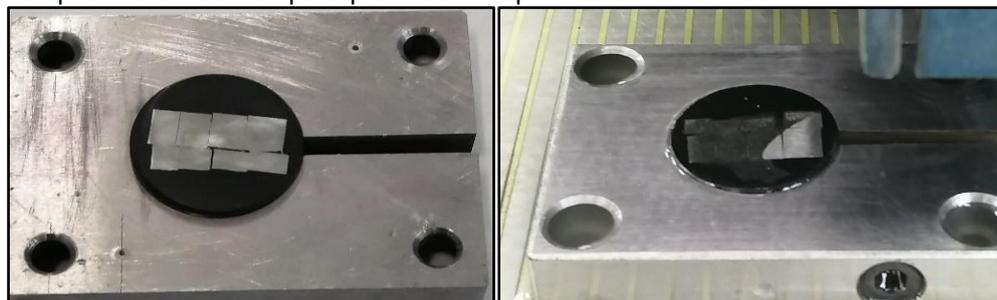


Fonte: Autor.

### Análise da Microestrutura

As amostras foram submetidas ao corte, em equipamento de disco diamantado com refrigeração usando meio líquido, em duas seções, respectivamente, paralela ao eixo Z (paralela ao sentido de construção) e perpendicular ao eixo Z (perpendicular ao sentido de construção) e preparadas por técnicas de metalografia (lixamento, polimento). Para facilitar a preparação foi necessário realizar o desenvolvimento de um suporte visando a padronização da altura das amostras conforme mostrado na Figura 31. Este dispositivo auxiliou nas etapas de lixamento e retificação.

Figura 31 - Dispositivo construído para planificar a superfície das amostras.



Fonte: Autor

As amostras foram embutidas em baquelite, lixadas em grano de #220, #320, #400, #600 e #1200 e polimento com pasta de diamante 3 e 1  $\mu$ m. A preparação metalográfica foi realizada na Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”.

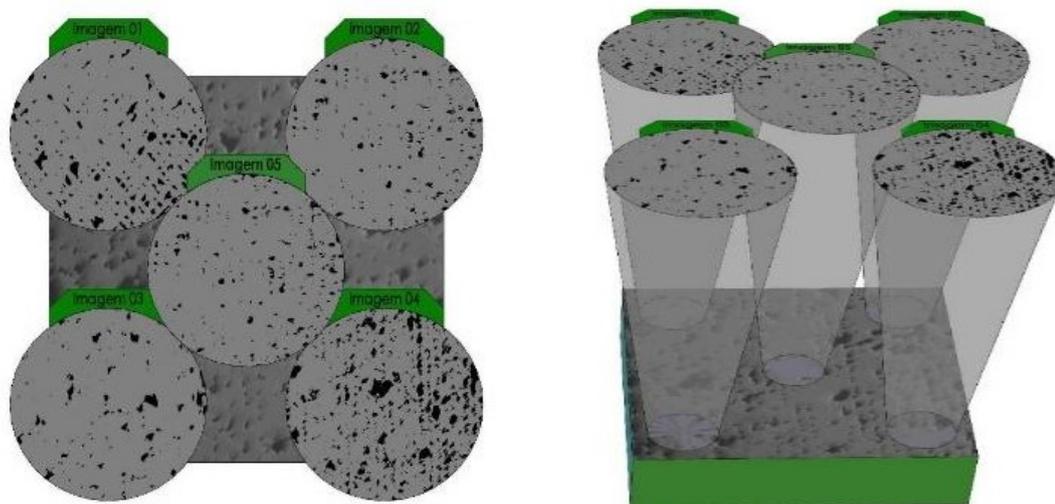
A partir de imagens obtidas por microscopia óptica foram observadas as porosidades abertas. Os poros das imagens limiarizadas foram aproximados a elipses, medidas e contadas a partir da ferramenta de análise de partículas do programa “ImageJ” de domínio público. Foram calculadas conforme a equação 4 as porosidades abertas, partir de cinco campos diferentes, como mostrado na Figura 32. O valor médio das cinco regiões foi considerado como o valor de porosidade aberta de cada amostra.

$$\% \text{ poros} = \frac{A_p}{A_T} \times 100 \quad (4)$$

Sendo:

- **% poros** é a porcentagem de poros na imagem que é diretamente relacionado com a porosidade aparente da amostra;
- **A<sub>p</sub>** a área coberta de poros na superficiais e
- **A<sub>T</sub>** a área total da imagem.

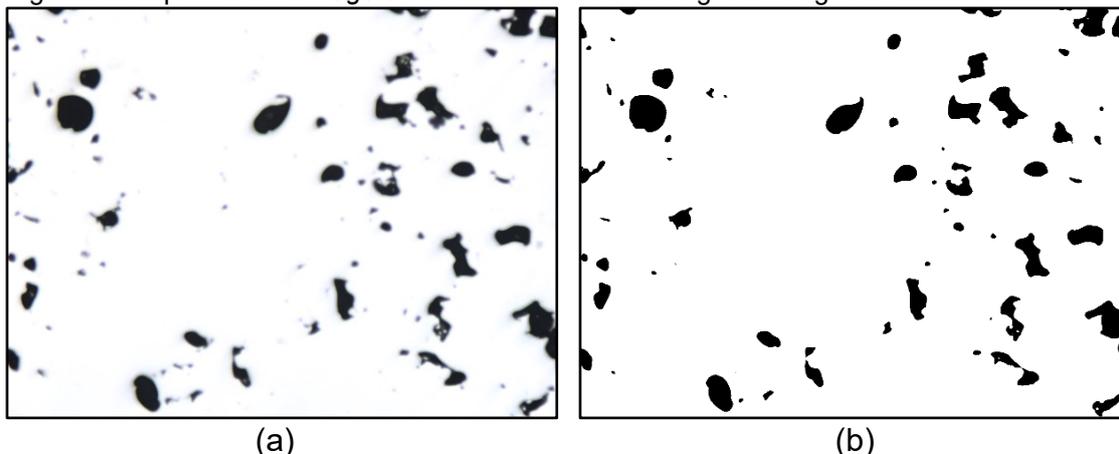
Figura 32 - Posicionamento utilizado para obter as imagens em cinco pontos diferentes.



Fonte: Autor

Na Figura 33 a é mostrada a imagem típica obtida por microscopia óptica. Os pontos escuros são os poros e outras descontinuidades perceptíveis das amostras consolidadas. Na Figura 33b observa-se imagem ajustada e processada por meio do programa *Image J*. O programa computacional fornece uma estimativa da área escura que foi associado ao valor de porosidade aberta. Estas medidas foram realizadas na Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”.

Figura 33 - (a) Imagem obtida por microscopia ótica da amostra e (b) Imagem processada por programa computacional "Image J" da mesma amostra e região da Figura a.



Fonte: autor

Nesta análise deve-se filtrar o tamanho mínimo, neste exemplo não foi filtrado o tamanho mínimo, em um pixel, mas o programa permite este filtro.

As amostras polidas foram submetidas ao ataque eletroquímico, usando a solução de 90 ml de água destilada com 10 g de ácido oxálico, fórmula molecular  $H_2C_2O_4$ , tensão de 5 V e tempo de imersão próximo de 90 segundos. A análise da microestrutura foi realizada usando microscopias, óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Utilizaram-se os microscópios, óptico marca Leica e modelo DM750M e os microscópios eletrônicos de varredura, Hitachi modelo TM3000, com detector de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) acoplado ao equipamento e Jeol com canhão de emissão de campo (SEM-FEG), modelo JSM-6701F, com detector de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) acoplado. Estes equipamentos estavam alocados no CECTM do IPEN.

#### 4.5.2 Caracterização mecânica

As seguintes condições de porosidade foram selecionadas: de 1,0 %, em torno de 5 % e em torno de 12 % para fabricação de amostras visando a realização de ensaios mecânicos. Os parâmetros usados FSL estão mostrados na Tabela 13. Foram usadas cinco amostras para ensaios de tração, conforme norma ASTM E08-03 [76], estudando duas direções de fabricação das amostras, respectivamente direção de construção horizontal e vertical.

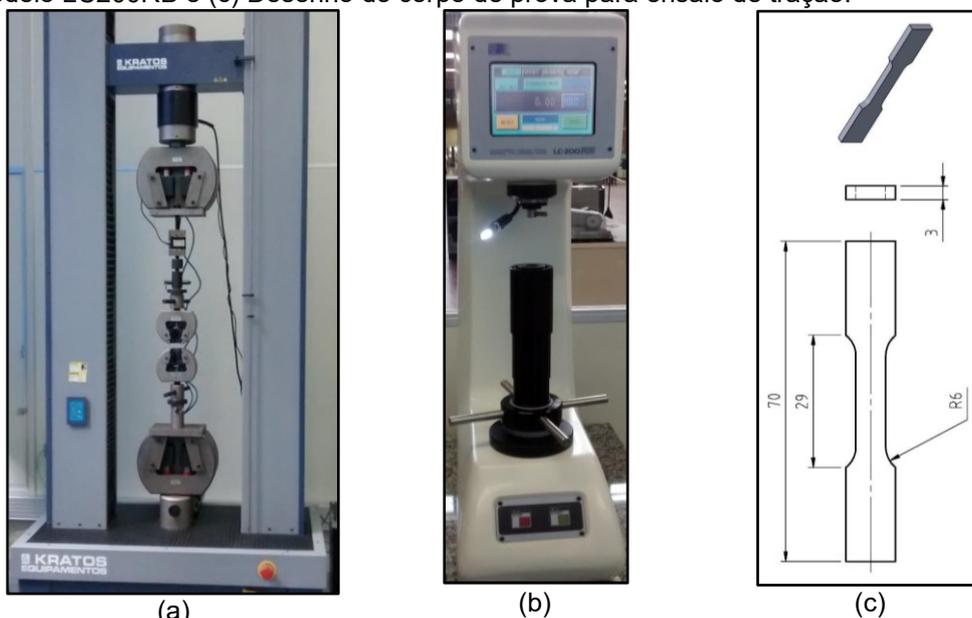
O ensaio de tração das amostras foi realizado no equipamento Kratos da Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI "Roberto Mange"- Campinas, conforme mostrado na Figura 34, nas seguintes condições: célula de carga de 25.000 Kgf,

velocidade de deslocamento 5,0 mm/mim, pré carga de 50 Kgf e temperatura ambiente de 22 °C. Neste ensaio foram obtidos os limites de resistência e de escoamento e alongamento em corpo de prova padronizado pela norma [76] ASTM E08-03, conforme a Figura 34(c), até a fratura. Foram usadas 8 amostras para realização do ensaio de tração para cada condição usada no processamento por FSL. No ensaio de tração foram obtidos os limites de escoamento e de ruptura e alongamento.

Realizaram-se medidas de dureza Rockwell B com carga de 100 kgf e penetrador de tungstênio com  $\varnothing 1/16''$ . Esta técnica foi utilizada em razão da superfície apresentar elevada rugosidade (sem lixamento). As medidas foram realizadas no Durômetro Rockwell e Brinell modelo LC200RB alocado na Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange” de Campinas.

O ensaio de dureza Rockwell B consiste em aproximar a peça no penetrador e submeter a uma pré carga e logo após aplicar a carga máxima e depois retirar a carga máxima e fazer a leitura no mostrador digital, uma vez fixada a escala a ser usada, o valor é dado diretamente na escala determinada. O valor indicado na escala do mostrador é o valor da dureza Rockwell B. Este valor corresponde à profundidade alcançada pelo penetrador, subtraídas a recuperação elástica do material, após a retirada da carga maior, e a profundidade decorrente da aplicação da pré-carga.

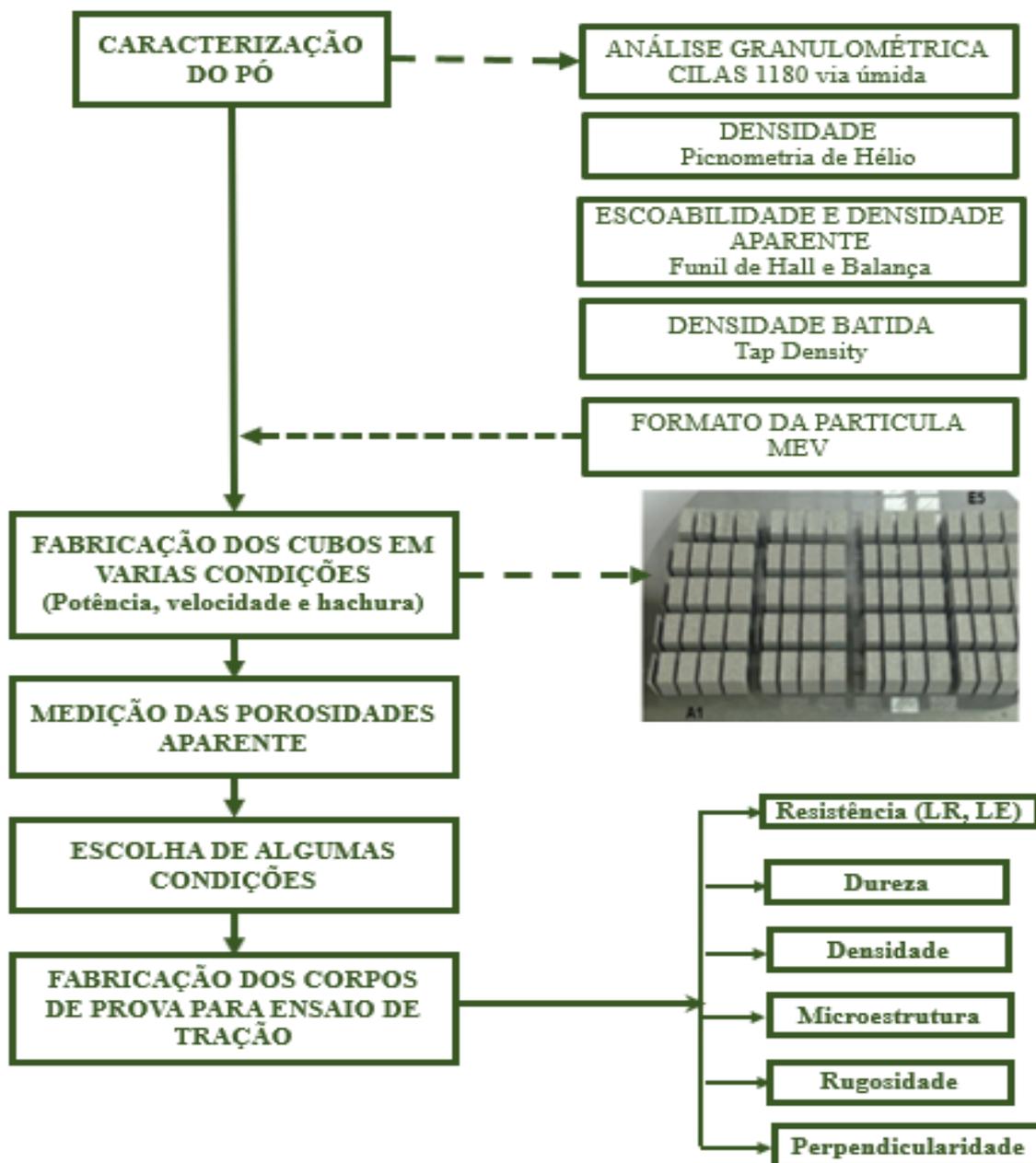
Figura 34 - (a) Máquina de ensaio universal modelo TR6128SB, (b) Durômetro Rockwell e Brinell modelo LC200RB e (c) Desenho do corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: Autor

Na Figura 35 está apresentado um fluxograma dos ensaios utilizados nas etapas de fabricação e caracterização realizadas na metodologia para a realização deste estudo.

Figura 35 - Fluxograma de experimentos usados na metodologia para a realização deste estudo.



Fonte: Autor

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização Física e Química do Material de Partida

As composições químicas dos pós de partida (pó virgem) dos dois fabricantes estão nas Tabela 7 e Tabela 8. Observa-se que os resultados obtidos estão de acordo a composições químicas e tolerâncias dos elementos químicos das normas, referentes a manufatura aditiva por fusão em leito de pó da liga AISI 316L (ASTM F3184-16) [77].

Tabela 7 - Composição química da liga AISI 316L antes da FSL (pó virgem), em relação referência da norma ASTM F3184-16 (% em massa).

Elementos	Fe	Ni	Cr	Mo	Si	Mn	P
Pó virgem <b>Fabricante "A"</b>	Balanço	12,30	16,70	2,30	0,60	0,53	0,02
Pó virgem <b>Fabricante "B"</b>	Balanço	12,50	17,80	2,36	0,64	0,74	0,007
NORMA ASTM F3184	Balanço	10 - 14	16 - 18	2 - 3	1,00 max	2,00 max	0,045 max

Fonte: Autor

Tabela 8 - Composição química de elementos residuais da liga AISI 316 L antes da FSL (pó virgem), em relação referência da norma ASTM F3184-16 (% em massa).

Elementos	O	C	N	S
Pó virgem <b>Fabricante "A"</b>	0,100	0,023	0,090	0,006
Pó virgem <b>Fabricante "B"</b>	0,030	0,017	0,090	0,004
NORMA ASTM F3184	0,10 max	0,03 max	0,10 max	0,030 max

Fonte: Autor

Conforme observado os pós virgens apresentaram composições químicas dentro do intervalo estipulado, pela norma vigente para o processo de manufatura aditiva. Observou-se que os pós do fabricante B apresentaram menores teores de elementos residuais contaminantes (oxigênio, carbono, nitrogênio e enxofre), o que pode favorecer o processo de consolidação por FSL.

As faixas granulométricas dos pós foram determinadas por meio do tamanho médio da partícula determinado pelo equipamento de espalhamento a laser de partículas – CILAS. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 9 e verifica-se que as faixas granulométricas dos pós fornecidos estavam dentro do intervalo de 10 a 50  $\mu\text{m}$  especificada ao processamento por FSL. Os valores para o índice D90 mostrados na Tabela 9 indicam que, 90 % das partículas tinham

tamanho de até 49,8  $\mu\text{m}$  (fabricante “A”) e de 45,0  $\mu\text{m}$  para o fabricante “B”. O pó do aço AISI 316 L do fabricante B apresentou um diâmetro médio 15 % menor do que o pó do fabricante A.

Tabela 9 - Distribuição granulométrica dos pós obtida por difração a laser.

Fabricante	Faixa Granulométrica recebida ( $\mu\text{m}$ )	Distribuição Granulométrica ( $\mu\text{m}$ )			
		D10	D50	D90	D médio
“A”	15 a 50	22,5	33,9	49,8	35,7
“B”		16,0	32,8	45,0	30,5

Fonte: Autor

Na Tabela 10 são apresentados os resultados obtidos das propriedades físicas: distribuição granulométrica, escoabilidade, densidade (aparente, batida e teórica média, por picnometria de He) dos pós. Estes resultados indicaram para o pó do fabricante “B” uma melhor escoabilidade (tempo de escoabilidade cerca de 10 % menor em relação ao fabricante “A”), maiores densidades aparente e batida, indicando maior acomodação de partículas num determinado volume. O resultado obtido para a densidade picnométrica de hélio é uma indicação de que o pó do fabricante “B”, em geral possui partículas com menor porosidade.

Tabela 10 - Propriedades físicas dos pós dos dois fabricantes

Propriedades físicas	Fabricante “A”	Fabricante “B”
Distribuição granulométrica ( $\mu\text{m}$ )	22,5 – 49,8	16,0 – 45,0
Escoabilidade (s/50g)	20,26 $\pm$ 0,03	18,26 $\pm$ 0,30
Densidade aparente ( $10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup> )	4,27 $\pm$ 0,01	5,27 $\pm$ 0,02
Densidade batida ( $10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup> )	4,83 $\pm$ 0,03	5,83 $\pm$ 0,02
Densidade por Picnometria de He ( $10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup> )	7,80 $\pm$ 0,01	7,85 $\pm$ 0,01
Densidade teórica ( $10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup> )	7,87	7,87

Fonte: Autor

Os resultados de índices de fluidez (índice de Carr “CI” e razão de Hausner “HR”) auxiliaram na avaliação da fluidez e empacotamento das partículas, que são requisitos importantes no processo de fusão em leito de pó. Os valores do índice

de Carr e da razão Hausner calculados para os dois fabricantes de pó de aço inoxidável AISI 316 L foram comparados com os valores especificados na Tabela 11 indicaram que, os pós de ambos os fabricantes possuem elevada escoabilidade [78]. No entanto, o pó do fabricante B apresentou um melhor comportamento de escoabilidade e de empacotamento em relação ao pó do fabricante A, de acordo com os resultados das análises realizadas.

Tabela 11 - Resultado da média e desvio padrão em relação aos índices de fluidez (escoabilidade) dos pós. Fonte: ASM Internacional, 1998.

Fabricante		Índice de Carr – CI (%)	Relação de Hausner
“A”	Valor	11,8 ± 0,5	1,13 ± 0,01
“B”	Calculado	9,60 ± 0,4	1,10 ± 0,01
	Escoabilidade		
Índices tabelados	Excelente	0 – 10	1,00 – 1,11
	Boa	11 – 15	1,12 – 1,18
	Razoável	16 – 20	1,19 – 1,25

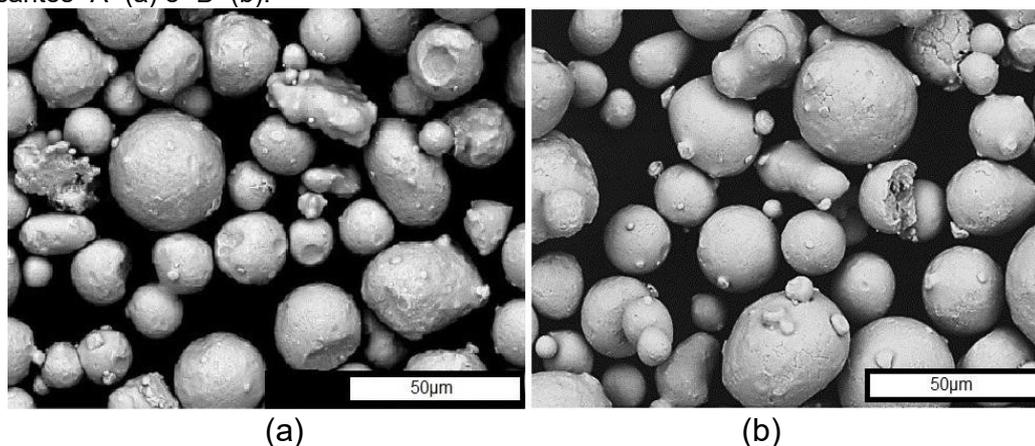
Fonte: autor

As morfologias das partículas dos pós foram observadas por meio do microscópio eletrônico de varredura – MEV. As morfologias das partículas de pó de aço inoxidável AISI 316 L estão apresentadas na Figura 36 e evidenciam formato esférico. No entanto, algumas partículas são irregulares e foram observadas a presença de partículas satélites para pós de ambos os fabricantes, o que contribui para redução do empacotamento e redução da densidade aparente. As presenças de partículas irregulares e de satélites prejudica a fluidez e causam uma deposição irregular no leito da FSL. Nas superfícies das partículas podem ser observadas uma estrutura dendrítica de solidificação e a existência de poros abertos.

Pode-se notar na Figura 36 que a quantidade de partículas irregulares do fabricante “A” parece ser maior do que o pó do fabricante “B”. Os valores obtidos pelo índice de Carr e pela razão de Hausner, conforme apresentado na Tabela 11 indicam que o pó do fabricante “B” apresenta excelente escoabilidade, enquanto o pó do fabricante “A” é considerado boa, a partir de índices tabelados. Apesar

do índice de Carr e da relação de Hausner não serem parâmetros intrínsecos dos materiais particulados, pois foram calculados de forma teórica, a partir de propriedades dos pós, estes valores numéricos indicaram com exatidão o comportamento de escoabilidade dos pós analisados. Incorporar os resultados do índice de Carr e da relação de Hausner na análise da escoabilidade dos materiais está de acordo com o estudo realizado por Muhammad [78].

Figura 36 - Imagens obtidas por MEV das partículas de pós de aço inoxidável AISI 316L dos fabricantes "A" (a) e "B" (b).



Fonte: Autor

As propriedades físicas mencionadas na Tabela 10 e Tabela 11 e a geometria esférica observada na Figura 36 são atributos vitais para a uniforme deposição durante o processo de FSL. Diversos autores [7] e [12] afirmaram em seus estudos que resultados de maior escoabilidade e elevada densidade aparente são fundamentais para a homogênea deposição de pó no leito. Esta característica propicia a obtenção de consolidados fabricados por FSL, com menor índice de vazios e aglomerados, distribuição homogênea e maior densidade na deposição de camada a camada.

## 5.2 Fabricação de Amostras por FSL - Fabricante A

O pó da liga de aço inoxidável AISI 316 L do fabricante "A" foi usado para impressão de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 12 os valores de potência foram definidos a partir das porcentagens de 10 a 30 % da potência máxima do equipamento de FSL que é de 500 W. Foram usadas nove velocidades diferentes de movimentação do feixe laser para cada potência. Nestes testes foi mantido constante o valor da espessura de camada em 30  $\mu\text{m}$ .

Na última linha de cada célula da Tabela 12 foi calculada a densidade de

energia volumétrica com base na Equação 1. A variação da densidade de energia volumétrica situou-se de 15 a 52  $\text{Jmm}^{-3}$  nestes experimentos.

Tabela 12 – Matriz com 80 condições selecionadas para fabricação da plataforma nas condições de quatro potências do laser (53/73/93 e 132W) por nove velocidades de varredura (800 a 1600mm/s) e quatro hachuras (0,07/0,08/0,09 e 0,10mm) com respectivos valores de densidade volumétrica de energia do fabricante “A” em  $\text{Jmm}^{-3}$ , sendo por exemplo, na coluna “4” e linha “E” as condições foram: potência de 132W, com velocidade de 1600mm/s e variando as hachuras em (0,07/0,08/0,09 e 0,1mm) e densidade volumétrica de energia de 29 a 39  $\text{Jmm}^{-3}$ .

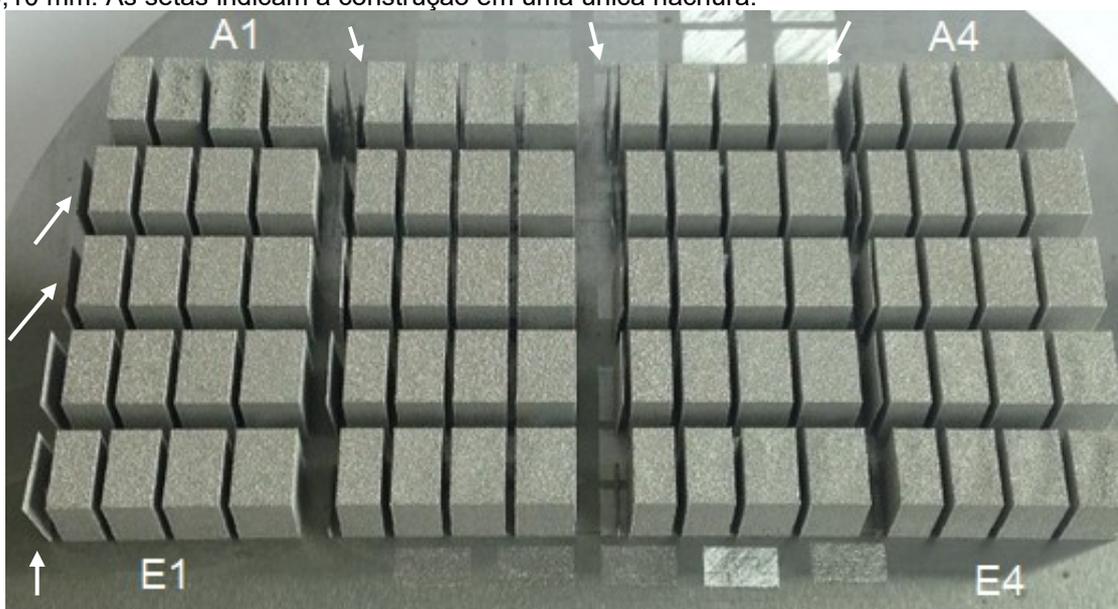
	1	2	3	4
E	53	73	93	132
	1200	1200	1300	1600
	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10
	21   18   16   15	29   25   23   20	34   30   26   24	39   34   31   28
D	132	132	132	132
	1200	1300	1400	1500
	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10
	52   46   41   37	48   42   38   34	45   39   35   31	42   37   33   29
C	93	93	93	93
	900	1000	1100	1200
	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10
	49   43   38   34	44   39   34   31	40   35   31   28	37   32   29   26
B	73	73	73	73
	800	900	1000	1100
	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10
	43   38   34   30	38,6   33,8   30,0   27,0	35   30   27   24	32   28   25   22
A	53	53	53	53
	800	900	1000	1100
	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10	0,07   0,08   0,09   0,10
	22   28   25   22	28   25   22   20	25   22   20   18	23   20   18   16

Fonte: Autor

Na Figura 37 é mostrada a disposição das amostras de geometria paralelepédica construídas na plataforma de impressão por FSL. A amostra fabricada com a maior velocidade para cada potência do laser está posicionada na primeira linha da plataforma, em razão ao tamanho da plataforma de impressão de diâmetro de  $\varnothing 156\text{mm}$  não acomodar, sequencialmente, todas as amostras consolidadas. Dentro de cada célula (mesmos parâmetros de potência e velocidade do feixe laser) foram fabricadas amostras com tamanhos de hachura (H) nas dimensões de 0,07; 0,08; 0,09 e 0,10 milímetros, além destas condições foi construída uma única hachura com parâmetros empregados em cada célula.

Esta hachura única encontra-se posicionada no início da fabricação das amostras e aparece indicada por setas na Figura 37. Pode ser observado que as hachuras não tiveram sustentação. Instabilidades durante a fabricação por FSL no crescimento da hachura única ocasionadas por baixa densidade de energia volumétrica podem ter sido a causa desta falha.

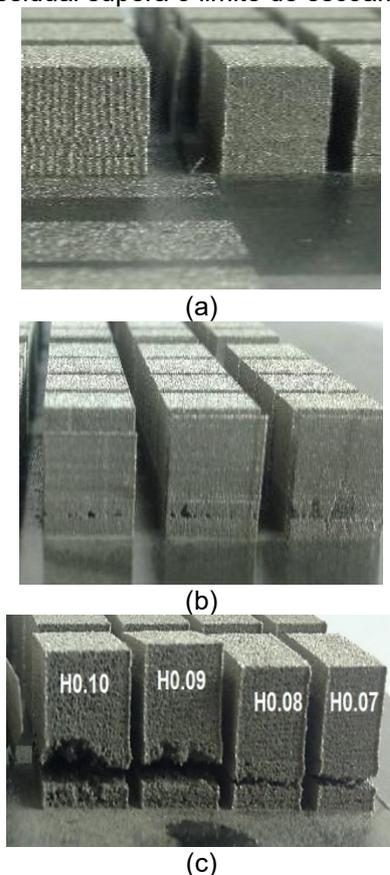
Figura 37 - Primeira plataforma impressa na liga de aço inoxidável AISI 316L do fabricante "A" em uma matriz 4x5 conforme a Tabela 12 (4 potências de laser: 53/ 73/ 93/ 132 W usando várias velocidades de varredura: 800 - 1600 mm/s e 4 hachuras (H) nas dimensões de 0,07; 0,08; 0,09 e 0,10 mm. As setas indicam a construção em uma única hachura.



Fonte: Autor

Na Figura 38 são apresentados os detalhes da primeira plataforma impressa. É possível notar diversos defeitos de consolidação, em razão de seleção incorreta de parâmetros de processo que influenciam em valores inadequados de densidade de energia volumétrica. A delaminação (defeito de falta de fusão) entre as camadas revela que, a densidade de energia foi insuficiente para fundir de forma adequada o leito do pó na velocidade correspondente na Figura 38 (a), (b) e (c). Valores baixos de potência do feixe laser provocaram delaminação generalizada independentemente do tamanho da hachura. Valores abaixo de  $25 \text{ J/mm}^3$  para a densidade de energia volumétrica indicaram amostras com falta de fusão, conforme mostrado na Tabela 12. O tamanho de hachura elevado também ajudou a propagação do defeito de não consolidação entre as camadas, conforme observado na Figura 38 (c).

Figura 38 - Defeitos de consolidação (a), (b) e (c) falta de fusão entre as camadas com trincas e delaminação, devido a tensão residual supera o limite de escoamento.



Fonte: Autor

A partir de inspeção visual das amostras mostradas na Figura 38 foi possível refinar uma janela de processamento. As potências mais baixas (53 e 73 W) foram descartadas pela ocorrência generalizada de defeitos de não consolidação de camadas de material particulado mostrados em detalhe nas Figura 38 (b) e (c).

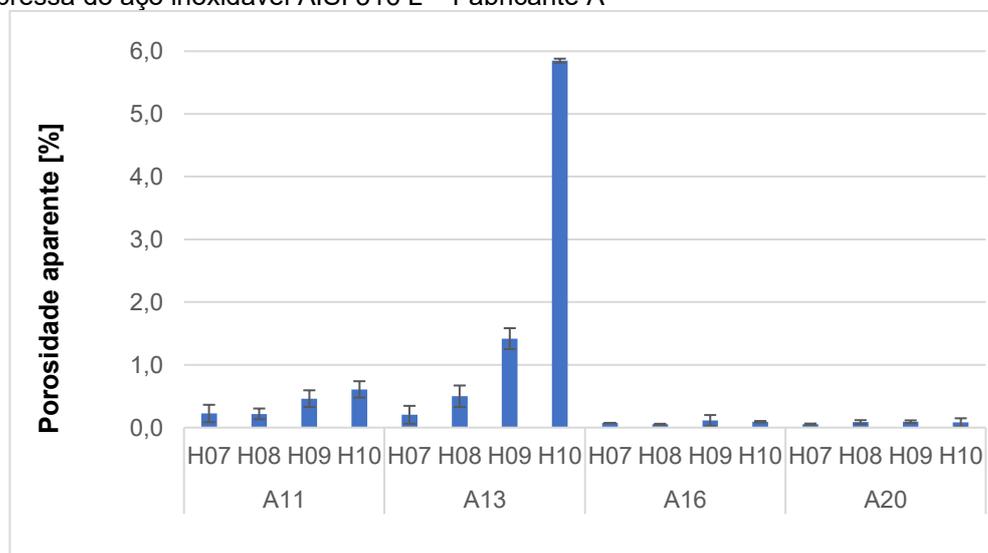
Os parâmetros selecionados na janela de processamento estão mostrados na Tabela 13 com os respectivos valores de porosidade aparente e seus desvios. Na Figura 39 é observada a variação da porosidade aparente estimada apenas na seção paralela a direção de crescimento (eixo z) e foi possível selecionar os parâmetros mais adequados para consolidação do pó, isto é, menor porosidade aparente. Analisando-se apenas os dois valores de potência (93 e 132 W) observou-se que os maiores valores de porosidade ficaram concentrados para o valor de potência de 93 W, apesar das amostras terem se consolidado sem a presença de falta de fusão entre as camadas.

Tabela 13 - Resultado de porosidade de arranjos selecionados por análise visual com menor porosidade aberta da plataforma impressa da liga de aço inoxidável AISI 316 L, as amostras A16.07, A16.08, A20.07 e A20.10 apresentaram menor porosidade aparente entre 0,05 – 0,10

Arranjo	Referência da amostra	Parâmetros de consolidação			Porosidade aparente		Densidade de energia volumétrica [J mm <sup>-3</sup> ]
		Hachura [mm]	Potência do laser [W]	Velocidade de varredura [mm/s]	Média	Desvio	
A11	A11.07	0,07	93	900	0.23	0.14	49,2
	A11.08	0,08	93	900	0.22	0.09	43,1
	A11.09	0,09	93	900	0.46	0.13	38,3
	A11.10	0,1	93	900	0.61	0.13	34,4
A13	A13.07	0,07	93	1100	0.20	0.14	40,3
	A13.08	0,08	93	1100	0.50	0.17	35,2
	A13.09	0,09	93	1100	1.42	0.17	31,3
	A13.10	0,1	93	1100	5.85	0.03	28,2
A16	A16.07	0,07	132	1200	0.07	0.00	52,4
	A16.08	0,08	132	1200	0.05	0.01	45,8
	A16.09	0,09	132	1200	0.11	0.09	40,7
	A16.10	0,1	132	1200	0.09	0.01	36,7
A20	A20.07	0,07	132	1600	0.06	0.01	39,3
	A20.08	0,08	132	1600	0.09	0.03	34,4
	A20.09	0,09	132	1600	0.09	0.02	30,6
	A20.10	0,1	132	1600	0.08	0.07	27,5

Fonte: Autor

Figura 39 - Gráfico representativo da porosidade aparente de arranjos selecionadas da plataforma impressa do aço inoxidável AISI 316 L – Fabricante A



Fonte: Autor.

As amostras com os menores valores de porosidade aparente foram selecionadas, com a finalidade de avaliar os resultados de densidade hidrostática (método de Arquimedes) e de rugosidade. Os resultados destas análises podem ser observados na Tabela 14. A partir destes resultados pode ser verificada que a amostra “A16.07” foi a condição de maior densidade relativa, isto é, menor porosidade. Em termos de rugosidade, a amostra “A16.08” apresentou a menor rugosidade média de cinco medição em vários sentidos de 13,2  $\mu\text{m}$ . Em razão de aplicações empregadas pode existir a necessidade de amostras terem características específicas, tais como, maior densidade, menor rugosidade ou ainda outras propriedades específicas [12] e [7].

Tabela 14 - Resultados das análises de rugosidade (Ra média e desvio), densidade hidrostática e porosidade das amostras selecionadas da liga de AISI 316 L – Fabricante “A”.

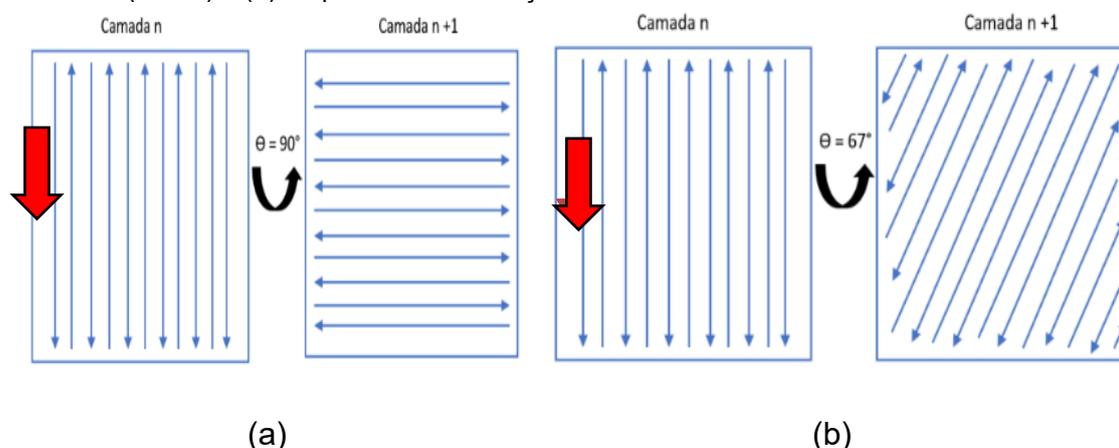
Referência	Rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ )	Densidade hidrostática ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Porosidade (%)
<b>A16.07</b>	15,2 $\pm$ 2,3	7,65 $\pm$ 0,30	1.91
<b>A16.08</b>	13,2 $\pm$ 3,1	7,54 $\pm$ 0,22	3.37
<b>A20.07</b>	15,5 $\pm$ 1,2	7,20 $\pm$ 0,19	7.67
<b>A20.10</b>	17,3 $\pm$ 1,6	7,30 $\pm$ 0,18	6.41

Fonte: Autor

Na Tabela 14 podem ser observados os resultados de rugosidade média de 13,2  $\mu\text{m}$  e densidade hidrostática medida, próximos de 98% (porosidade menor de 2%). A menor porosidade das amostras está relacionada ao menor valor de rugosidade, em razão da combinação dos parâmetros de (potência, velocidade de varredura e dimensão da hachura) o que está de acordo com resultados de literatura [79] e [80].

Amostras foram consolidadas, visando estudar a influência das propriedades físicas (escoabilidade e fluidez) dos pós do fabricante “B” nas propriedades de amostras consolidadas. Foram construídas amostras usando os pós dos fabricantes “A” e “B”, utilizando os parâmetros de consolidação, que proporcionaram a maior densidade final nas amostras da primeira etapa com os pós do fabricante “A”, conforme a Tabela 14. A fase seguinte deste estudo foi a verificação da consolidação de amostras sob influência das estratégias de varredura desenvolvidas, conforme mostradas na Figura 40.

Figura 40 - Esquema representativo das estratégias de varredura usadas em relação a escoabilidade do pó pelo “recoater” (direção das setas) da máquina: (a) sequencial com rotação de  $0^\circ/90^\circ$  (S0/90) e (b) sequencial com rotação de  $67^\circ$ .



Fonte: Autor

Foi analisada a porosidade aberta nas seções de topo (análise da seção longitudinal- plano xz) e camada (análise na seção transversal- plano yz) da orientação de construção das amostras, em relação às estratégias de varredura. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 15. Pode ser observado que a utilização de pós de melhor empacotamento e maior fluidez, como no caso do fabricante B possibilitou obter resultados de porosidades baixas na consolidação das amostras. Verificou-se uma maior porosidade para as amostras consolidadas com os pós do fabricante “A” nas estratégias de varredura propostas independentes da seção analisada. A estratégia de rotação de  $67^\circ$  entre as camadas propiciou obter menores valores de porosidade.

Tabela 15 - Resultados de porosidade aparente das amostras consolidadas sob as diferentes estratégias de varredura para os fabricantes “A” e “B”. nas seções paralela e vertical ao sentido de crescimento.

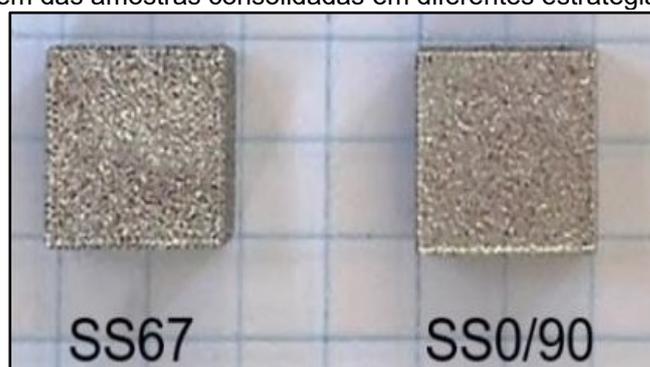
Fabricante	Estratégia de varredura	Seção Topo Porosidade aparente (%)	Seção Camada Porosidade aparente (%)
“A”	S67	2,38±1,10	2,49±0,46
	S0/90	6,14±1,92	6,78±1,62
“B”	S67	0,88±0,72	1,28±0,21
	S0/90	1,04±0,88	1,62±1,12

Fonte: Autor

De acordo com os resultados de porosidade obtidos nos parâmetros de consolidação selecionados, como mostrado na Tabela 15, verificaram-se diferenças entre os resultados de porosidade nas estratégias de varredura. Observou-se que, o uso de diferentes estratégias de varredura indicou uma relação com a porosidade de peças fabricadas por FSL, bem como em outros processos de manufatura aditiva [81]. Neste caso em específico, o uso da estratégia de varredura utilizado na primeira etapa do projeto (S0/90), provocou uma orientação preferencial do pó na camada, que é distribuída pelo *recoater* (componente da máquina em forma de régua que nivela e distribui a nova camada de pó), vide esquema na Figura 40, provocando aumento de vazios (descontinuidades).

Cada estratégia de varredura proporciona uma rugosidade de superfície, com um padrão diferente de relevo na camada consolidada, conforme pode ser observado na Figura 41. As amostras consolidadas sob influência das estratégias de varredura estudadas apresentam diferentes orientações na superfície. Na literatura alguns estudos indicaram que, a estratégia de varredura origina uma forte influência na rugosidade [82] e [83], na tensão residual das peças fabricadas e nas propriedades mecânicas [84] e [82] em diferentes ligas.

Figura 41 - Imagem das amostras consolidadas em diferentes estratégias.



Fonte: Autor

Os resultados obtidos estão de acordo com diversos autores, ainda que alguns trabalhos não apresentem correlações completas para as estratégias de varredura em relação a densidades obtida nas amostras consolidadas utilizando a liga AISI 316 L. Alguns estudos realizados obtiveram amostras com elevadas densidades (acima de 98 %) para a liga de AISI 316 L, a partir de modificações de estratégias de varredura [85], [86] e [87].

### 5.3 Fabricação de Amostras por FSL Fabricante “B” (2º Lote)

Novos parâmetros de FSL foram empregados na consolidação de amostras de aço inoxidável AISI 316 L usando pó do fabricante “B”. Os parâmetros de potência do feixe laser (P), velocidade de varredura (v) e tamanho da hachura (H) foram selecionados, a partir de resultados obtidos com o pó do fabricante “A”. Assim, visando reduzir o tempo de fabricação foram usadas velocidades (v) de deslocamento do feixe laser (varredura) maiores do que em testes anteriores. Os valores dos parâmetros usados, bem como os valores de porosidade aberta estão mostrados na Tabela 16. Os valores de porosidade abertas que estão sombreados representam condições a serem utilizadas em testes subsequentes.

Tabela 16 - Parâmetros de potência, velocidade e hachura utilizados, em relação às amostras, em relação aos valores da porosidade aberta (2º lote) -fabricante “B”. e densidade volumétrica de energia.

Amostra	Potência [W]	Velocidade [mm.s <sup>-1</sup> ]	Hatch [mm]							
			Porosidade aberta				Energia [J/mm <sup>3</sup> ]			
			0,07	0,08	0,09	0,10	0,07	0,08	0,09	0,10
1	172	1400	5.50	4.90	2.60	2.90	59	51	46	41
2	172	1500	4.80	3.79	0.40	4.5	55	48	42	38
3	172	1600	4.55	4.52	2.89	3.73	51	45	40	36
4	172	1700	6.66	4.15	4.29	9.57	48	42	37	34
5	172	1800	3.07	4.60	12.01	10.20	46	40	35	32
6	212	1600	1.03	1.99	3.66	9.43	63	55	49	44
7	212	1700	2.81	5.94	6.04	12.29	59	52	46	42
8	212	1800	1.04	5.17	3.09	12.79	56	49	44	39
9	212	1900	9.07	10.46	10.63	6.89	53	46	41	37
10	212	2000	17.04	7.71	5.34	11.66	50	44	39	35
11	252	1800	7.98	5.54	5.18	12.51	67	58	52	47
12	252	1900	7.57	6.12	6.42	11.24	63	55	49	44
13	252	2000	15.54	13.07	12.87	11.99	60	53	47	42
14	252	2100	16.54	14.01	16.87	15.99	57	50	44	40
15	252	2200	12.51	17.77	16.71	16.80	55	48	42	38
16	252	2300	12.31	13.54	12.89	15.06	52	46	41	37

Fonte: Autor

Pode-se observar na Tabela 16 que existe uma influência dos parâmetros usados na FSL, em relação a porosidade aberta.

A utilização de potências elevadas, como por exemplo para 252 W provocou um volume fundido elevado, o que provocou respingos (*balling*) na superfície da camada, prejudicando a acomodação nas camadas subsequentes e aumento de porosidade no material particulado. Estes respingos foram observados visualmente durante a consolidação das amostras.

Observa-se na Tabela 16 que valores de velocidade de movimentação do feixe laser próximos ou acima de 2000 mm/s provocaram elevação de porosidade.

A alta velocidade provoca um regime mais turbulento e pode dificultar a acomodação do metal líquido. Um regime turbulento do metal líquido na FSL, conforme indicação de literatura, [7], [12] e [57] pode induzir a formação de descontinuidades, em especial, o aparecimento de poros.

Valores de hachuras de 0,09 e 0,10 mm provocaram aumento da porosidade, conforme pode ser observado na Tabela 16. Este fato é atribuído ao feixe laser não ter conseguido fundir o material particulado, em sua totalidade, nas extremidades da dimensão da hachura.

Elevados ou baixos valores de densidade de energia volumétrica ( $E$ ) ocasionam aumento da porosidade aparente. Portanto, existe um balanço térmico no processo de FSL, que deve ser levado em consideração na seleção dos parâmetros para reduzir a porosidade aberta. Nas condições usadas nestes experimentos, a densidade de energia volumétrica de 60 a 70 J/mm<sup>3</sup> propiciou obter amostras com menor porosidade e maior densidade geométrica.

Na Tabela 17 estão apresentadas as condições selecionadas, que estão sombreadas na Tabela 16, para a confecção de amostras para ensaio de tração nas plataformas de construção. Na Figura 42 estão mostradas as plataformas consolidadas nas direções de construção horizontal e vertical.

Tabela 17 – Condições 3, 6 e 13 selecionadas para ensaio de tração fabricadas por FSL nas direções horizontal e vertical.

Condição FSL	Potência [W]	Velocidade [mm/s]	Hachura [mm]	Densidade de Energia [J/mm <sup>3</sup> ]	Porosidade [%]	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Rugosidade Ra [μm]	Perpendicularidade 100 mm
<b>3 (h)</b>	172	1600	0,08	45	4,5	7,45±0,12	15,11±0,60	0,10
<b>3 (v)</b>	172	1600	0,08	45	4,6	7,39±0,15	14,26±0,54	0,12
<b>6 (h)</b>	212	1600	0,07	63	1	7,65±0,04	14,83±0,64	0,05
<b>6 (v)</b>	212	1600	0,07	63	1,1	7,59 ±0,80	15,72±0,47	0,07
<b>13 (h)</b>	252	2000	0,10	42	12	7,24±0,15	17,63±0,62	0,13
<b>13 (v)</b>	252	2000	0,10	42	13	7,21±0,16	17,63±0,62	0,13

Fonte: Autor

Após a fabricação das amostras na plataforma, conforme mostrado na Figura 42, foram realizados diversos ensaios para analisar as propriedades do consolidado. Foi realizada uma inspeção visual e não foram encontradas rebarbas ou descontinuidades nas superfícies das amostras.

As amostras fabricadas estavam alinhadas e apresentavam adequada precisão dimensional e pequeno desvio em relação à perpendicularidade ao longo do comprimento de 100 mm das amostras. Observou-se que o aumento de porosidade provocou elevação no valor da rugosidade medida e diminuição do valor da perpendicularidade, conforme observado na Tabela 17.

Ainda na Tabela 17.pode-se verificar que as amostras fabricadas na direção de construção horizontal apresentaram maior densidade e menor porosidade aberta, em relação às amostras fabricadas com parâmetros análogos, mas confeccionadas na direção vertical de construção

Figura 42 - Amostras para ensaio de tração fabricadas por FSL nas direções horizontal e vertical - condição 3 (a), condição 6(b) e condição 13 (c).



(a)



(b)



(c)

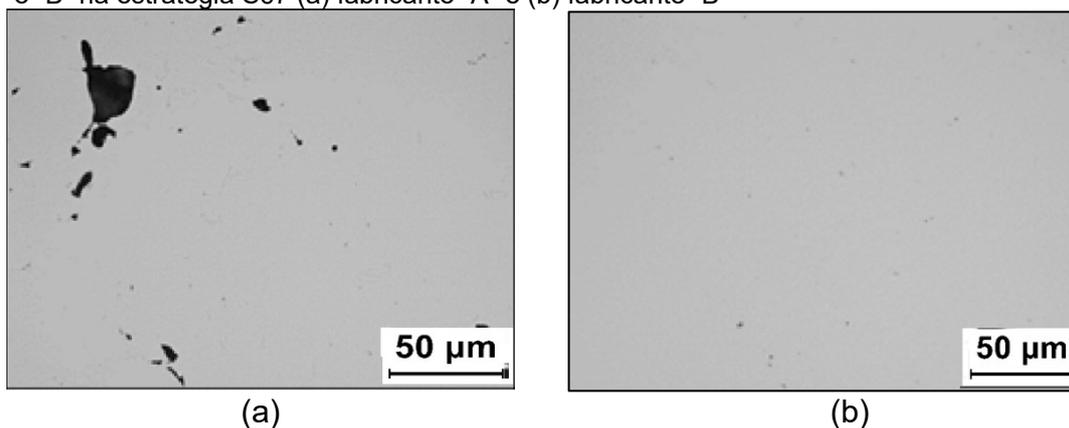
Fonte: Autor

## 5.4 Caracterização microestrutural das amostras

### 5.4.1 Caracterização por microscopia óptica

Na Figura 43 são observadas imagens representativas das seções transversais dos pós consolidados dos fabricantes “A” e “B”. Verificou-se que as amostras consolidadas do fabricante “B” tiveram melhor densificação do material particulado, com a menor presença de vazios e de descontinuidades de menores tamanhos, se comparado às amostras consolidadas do fabricante “A”, independente das condições usadas na fabricação, conforme resultados apresentados na Tabela 15. Uma tendência observada foi do tamanho dos vazios (descontinuidades) apresentarem maiores dimensões nas amostras do fabricante “A”.

Figura 43 - Imagens obtida por M.O. representativas das amostras consolidadas dos fabricantes “A” e “B” na estratégia S67 (a) fabricante “A” e (b) fabricante “B”



Fonte: Autor

As melhores propriedades de empacotamento e fluidez do pó do fabricante “B” medida nos ensaios de propriedades físicas auxiliaram na obtenção de menor porosidade e maior densidade das amostras consolidadas. Maiores valores de densidade aparente, melhor fluidez e menor tamanho médio de partículas propiciaram uma maior acomodação das partículas de material particulado no caso do fabricante “B”, reduzindo a possibilidade do aparecimento de descontinuidades como vazios no consolidado.

Na Figura 44 são mostradas imagens representativas das amostras consolidadas da direção horizontal e vertical e foram fabricadas segundo as condições mostradas na. As regiões escuras indicadas nestas figuras são descontinuidades, tais como, poros, falta de interação ou de fusão entre as camadas subsequentes e vazios em geral.

Observou-se que a quantidade de vazios nas seções transversais das amostras de tração fabricadas na posição horizontal foi inferior em relação às amostras fabricadas na posição vertical, como pode-se observado na Figura 44. Este resultado pode ser consequência da estratégia de varredura estar na perpendicular as seções transversais de fabricação (consolidação). Os resultados obtidos estão de acordo com estudos apresentados na literatura [86] e [87].

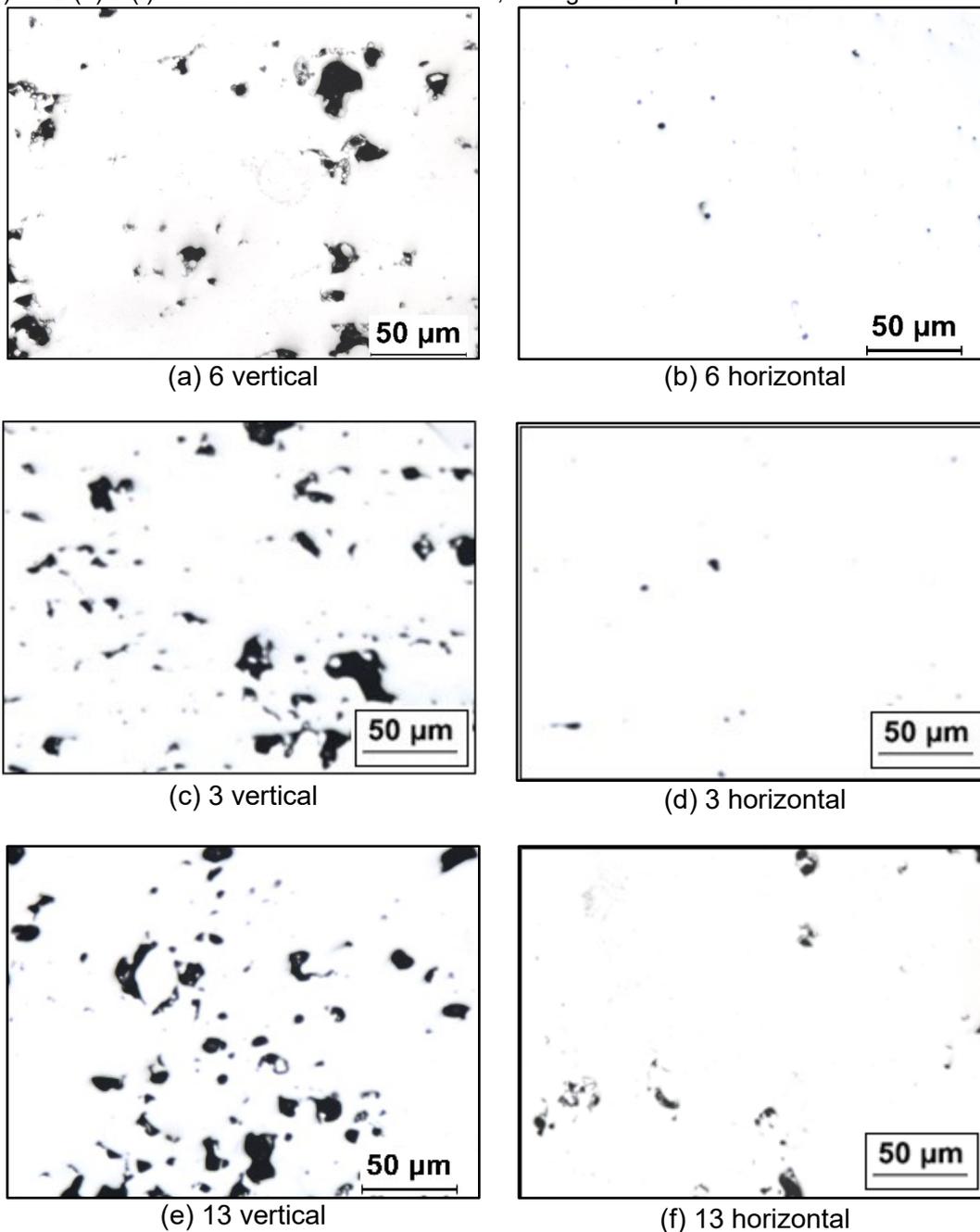
A análise da microestrutura das amostras de aço inoxidável AISI 316 L fabricadas por FSL auxilia no entendimento dos processos de fusão e de solidificação, além do conhecimento da nucleação das descontinuidades sua relação com os parâmetros do processo. A microestrutura característica das poças de fusão das condições 3, 6 e 13 pode ser observada na Figura 44.

Nestas imagens podem ser observadas estruturas sobrepostas das poças de fusão que apresentam um formato próximo do semicircular num plano paralelo para a direção de fabricação. A disposição desta estrutura sobreposta da poça de fusão aponta para uma fusão adequada entre as camadas de material particulado, como pode ser observado nas imagens da Figura 44 independente da condição e do sentido de fabricação.

O maior valor de densidade volumétrica de energia (condição 6) provocou poças de fusão com maior volume, tendo maior profundidade e largura. A profundidade de fusão ocasionada pelo feixe laser indica que o modo foi por condução. Não se observa penetrações elevadas indicando o fenômeno de *keyhole*.

Observam-se nestas figuras que a poça de fusão anterior foi refundida pela incidência do feixe laser na camada seguinte, criando estruturas alinhadas e periódicas com a execução das camadas subsequentes. Observa-se que os grãos cruzam e crescem a frente da linha de fusão do feixe laser, portanto, o crescimento dos grãos não é prejudicado pela linha de fusão e crescem com a mesma orientação cristalina, tendo orientação normal à curvatura de as linhas de fusão. Este fenômeno de continuidade de grãos com a mesma orientação cristalina nas poças de fusão subsequentes é denominado de crescimento epitaxial. Este fenômeno pode ser observado na Figura 45 e Figura 46.

Figura 44 - Imagens obtidas por M.O. das amostras consolidadas das condições 6 (a) e (b), 3 (c) e (d) e 13 (e) e (f) no sentido vertical e horizontal, as regiões em pretos são vazios.



Fonte: Autor

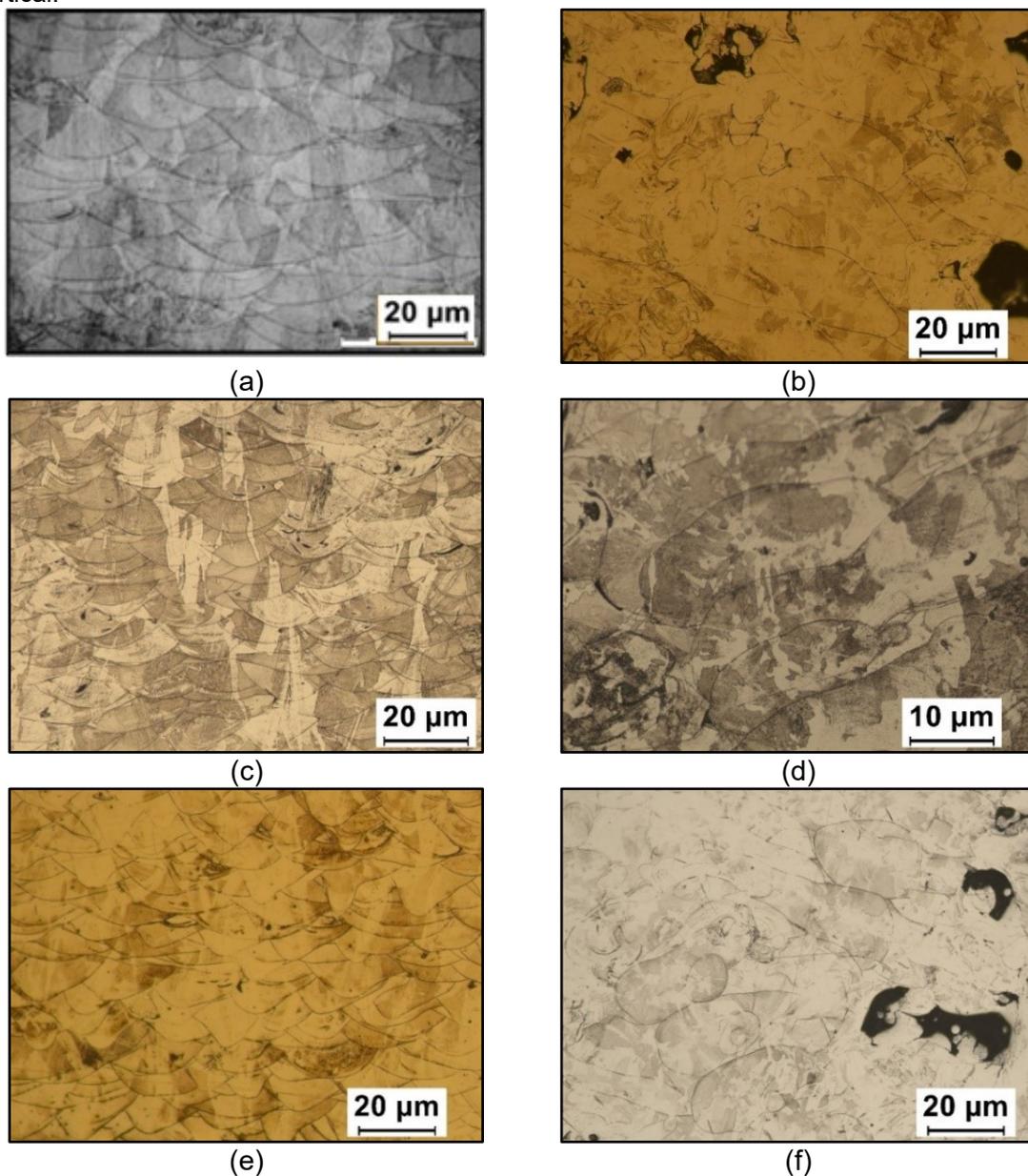
No processo de FSL, a refusão de grãos dificulta a nucleação na solidificação e facilita o crescimento epitaxial inicial nos grãos parcialmente refundidos, o que favorece o crescimento de grãos normais à curvatura da linha de fusão, sem a ocorrência do evento de nucleação.

O tamanho da poça de fusão dependeu das características do feixe laser, como o ponto focal, potência e a densidade de energia. Este fenômeno facilitou a

formação de grãos colunares, que cresceram na direção do maior gradiente de temperatura.

Os grãos colunares de uma forma em geral cresceram na direção normal aos contornos da poça de fusão, seguindo a direção do fluxo de calor, que é perpendicular para a linha de fusão. No entanto, nem todos os grãos colunares seguiram esta orientação de direção do crescimento do maior fluxo de calor, conforme observado nas Figura 45 e Figura 46.

Figura 45 - Imagens obtidas por microscopia óptica das condições 6, 3, e 13. Imagens (a), (c) e (e) com sentido de construção na direção horizontal e imagens (b), (d) e (f) sentido de construção vertical.



Fonte: Autor.

Segundo estudo realizado [79], a variação da orientação de crescimento dos grãos colunares pode ter sido alterada pelo fluxo de Marangoni, que pode modificar a transferência de calor convectiva e fluxo de fluido no interior da poça de fusão. Assim, a direção de crescimento dos grãos se alterou de perpendicular a linha de fusão para outra orientação favorável, conforme mostrado na Figura 45. Assim, alguns grãos tendem a crescer na orientação cristalográfica dos grãos de origem, como indicado na Figura 46 .

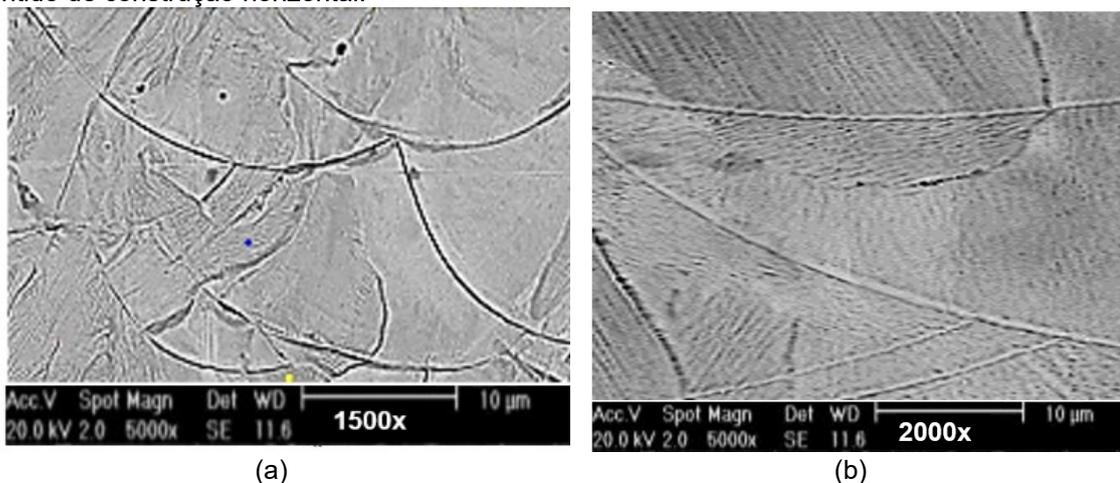
#### **5.4.2 Caracterização por Microscopia Eletrônica de Varredura**

Nas imagens da Figura 46 pode ser observada uma morfologia do tipo celular dentro dos grãos proveniente da alta velocidade de resfriamento, elevado gradiente de temperatura e do elevado desequilíbrio no processo FSL. Segundo estudos realizados [83] não existe um consenso sobre a formação das células no interior do grão, mas flutuações de composição aliada ao super-resfriamento constitucional podem auxiliar no entendimento do fenômeno.

O valor do gradiente de temperatura ( $G$ ) é calculado pela razão da variação de temperatura pela variação da distância entre dois pontos, e o valor da velocidade de solidificação ( $R$ ) é estimado pela razão da distância de dois pontos pelo tempo de resfriamento. No processo de FSL os valores de ( $G$ ) e ( $R$ ) são elevados [7].

No processo de FSL acontecem diferentes gradientes de temperatura ( $G$ ), diversas velocidades de avanço da interface sólido-líquido ( $R$ ), diferentes direções de fluxo de calor e variações de concentração fazem com que os grãos da poça de fusão se solidifiquem com diferentes orientações e morfologias. As microestruturas observadas na Figura 46 indicam uma morfologia semelhante a células com diferentes orientações dentro dos grãos devido à alta taxa de resfriamento, alto gradiente de temperatura e alto desequilíbrio térmico no processo FSL. Neste processo o valor da relação de  $G/R$  e  $G.R$  são elevados. Segundo estudos realizados, uma taxa de resfriamento entre  $10^5$  e  $10^7$  K/s, como ocorre na manufatura aditiva via FSL, é alta o suficiente para impedir a formação de dendritas, favorecendo a morfologia celular em AISI 316 L [7] e [12].

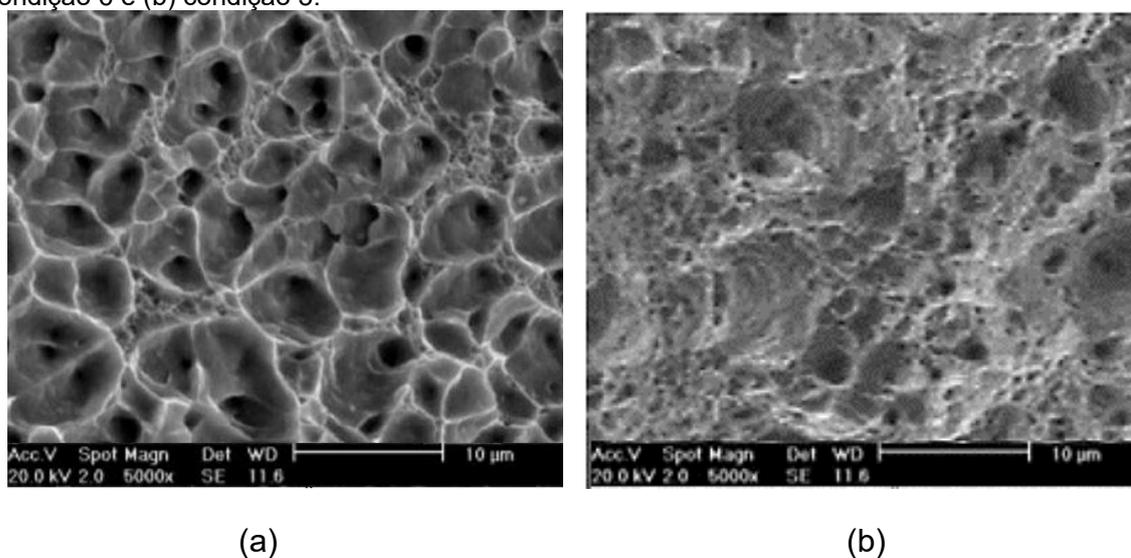
Figura 46 - (a) e (b) Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da condição 6, sentido de construção horizontal.



Fonte: Autor.

Na Figura 47 b é mostrada a região de fratura do aço inoxidável AISI 316 L de amostra submetida ao ensaio de tração. Observa-se uma fratura com morfologia dúctil, com a presença de poros isolados e pequenas micro cavidades “*dimples*”. Pode-se observar que, o tamanho das microcavidades depende do tamanho das células no interior do grão. As imagens da região de fratura indicam o mecanismo de propagação da trinca ao longo da camada fundida e limites de contorno de grão. A formação de microcavidades maiores foi dificultada pela estrutura celular refinada. As microcavidades estavam preferencialmente posicionadas nos limites das células e próximas ao contorno de grão.

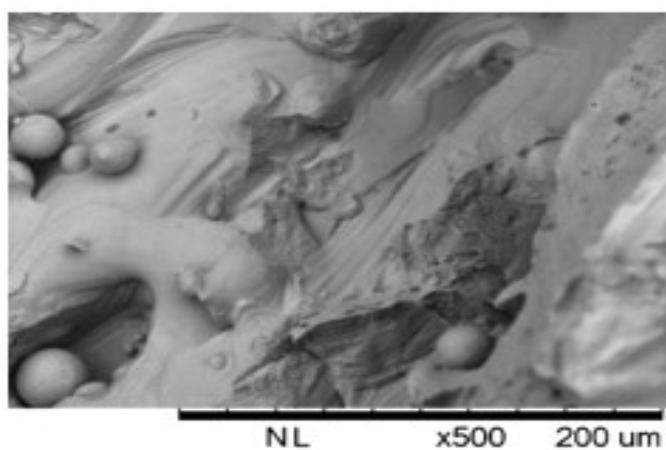
Figura 47 - Imagem obtida por MEV região de fratura de uma amostra fabricada por FSL (a) condição 6 e (b) condição 3.



Fonte: Autor

Na Figura 48 é observada a região de fratura da condição 13. São observadas pequenas regiões com “*dimples*” e diversas regiões com uma característica lisa, provavelmente, originadas da elevada quantidade de descontinuidades de vazios. Adicionalmente, pode ser observada a presença de partículas que não se fundiram em razão da elevada dimensão usada no espaçamento de incidência do feixe laser (hachura), em relação ao ponto focal do feixe laser.

Figura 48 - Imagem obtida por MEV região de fratura de uma amostra fabricada por FSL na condição 13.

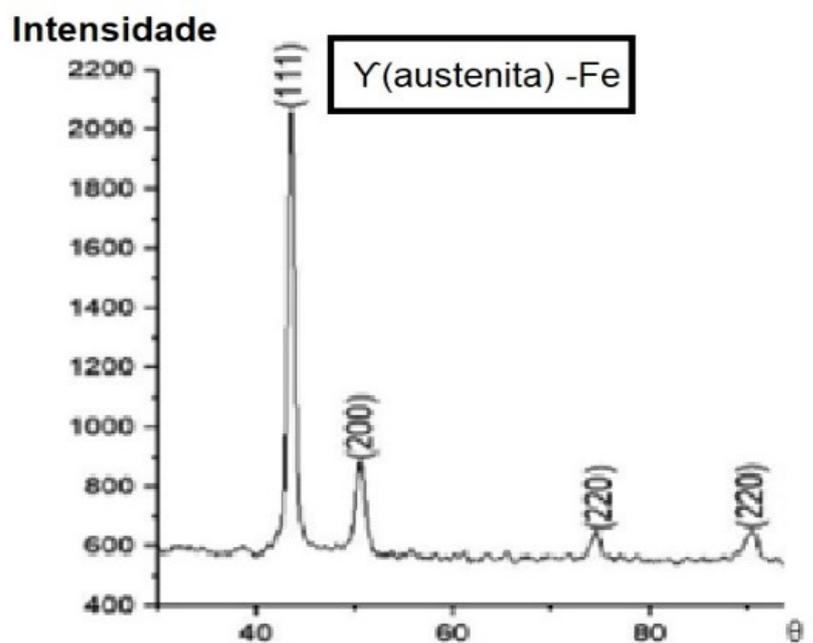


Fonte: Autor

#### 5.4.3 Caracterização por Difração de raios X

As amostras de aço inoxidável AISI 316 L fabricadas por FSL foram analisadas no difratômetro de raios X (Rigaku) para identificação das fases presentes. A fase detectada foi de austenita ( $\gamma$ ). Os três planos cristalinos [111], [200] e [220], conforme apresentado na Figura 49, onde são apresentados os picos nas regiões analisadas, que correspondem ao pico da fase austenita padrão do tipo cúbica de face centrada (cfc). Nas condições de fabricação não foi detectada a presença de ferrita delta.

Figura 49 – Difratoograma de raios X de uma amostra fabricada – condição 6 (horizontal).



Fonte: Autor

### 5.5 Propriedades mecânicas das amostras – fornecedor “B”

Foram fabricadas oito amostras em cada posição sendo utilizada cinco para determinar os valores médios das propriedades mecânicas, com pós de aço inoxidável AISI 316 L do fabricante “B”. Na Tabela 18 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de tração.

Tabela 18 - Valores médios das propriedades mecânicas, ( $\sigma_R$ ) Limite de resistência [MPa], ( $\sigma_{Esc}$ ) Limite de escoamento e ( $\Delta L$ %) Alongamento.

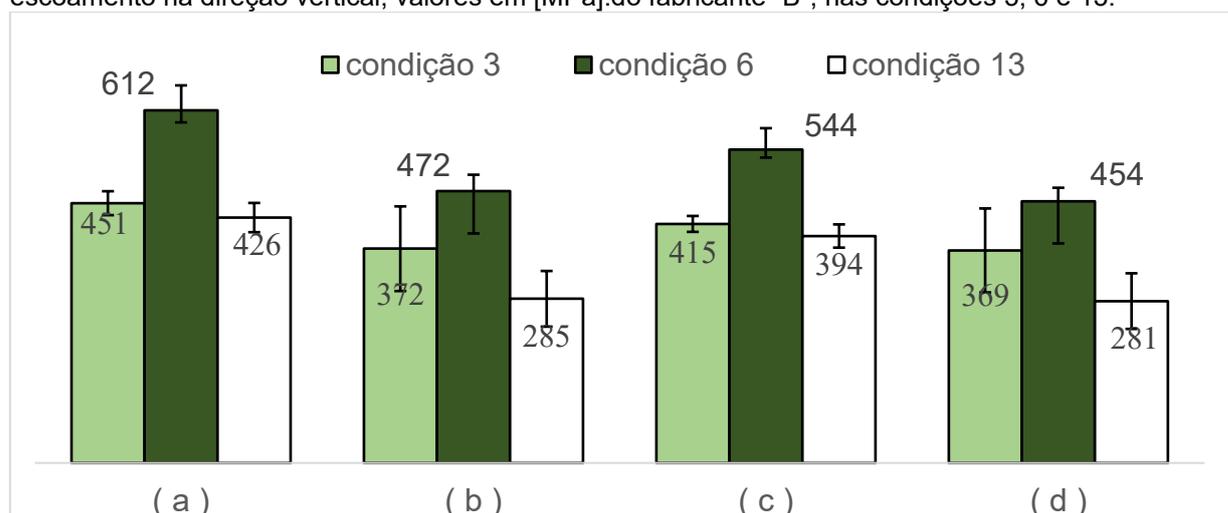
Condição FSL	$\sigma_R$ [MPa]	Desvio padrão	$\sigma_{Esc}$ [MPa]	Desvio padrão	$\Delta L$ [%]	Desvio padrão	
<b>6</b>	(Horizontal)	612	43,5	544	37,2	33,4	2,9
	(Vertical)	472	28,4	454	23,8	10,5	2,8
<b>3</b>	(Horizontal)	451	20,8	415	13,8	12,1	4,3
	(Vertical)	372	73,5	369	72,9	6,4	3,5
<b>13</b>	(Horizontal)	426	25,4	394	20,2	12,3	3,8
	(Vertical)	285	48,3	281	48,3	5,3	2,5

Fonte: Autor

Na Figura 50 pode-se notar que os limites de resistência e de escoamento da condição 6 foram superiores as condições de fabricação 3 e 13. A menor presença de vazios (maior densidade do consolidado) da condição 6 é a razão deste resultado obtido.

Em relação a direção de construção verificou-se maiores propriedades no ensaio de tração na posição horizontal de fabricação, em relação à posição vertical, conforme pode ser observado na Figura 50. Amostras fabricadas na posição vertical apresentaram limites de resistência à ruptura e ao escoamento de cerca de 18 %, em média, abaixo das amostras fabricadas na posição horizontal.

Figura 50 - (a) Limite de resistência na direção horizontal de fabricação (b) Limite de resistência na direção vertical de fabricação, (c) Limite de escoamento na direção horizontal e (d) Limite de escoamento na direção vertical, valores em [MPa], do fabricante "B", nas condições 3, 6 e 13.

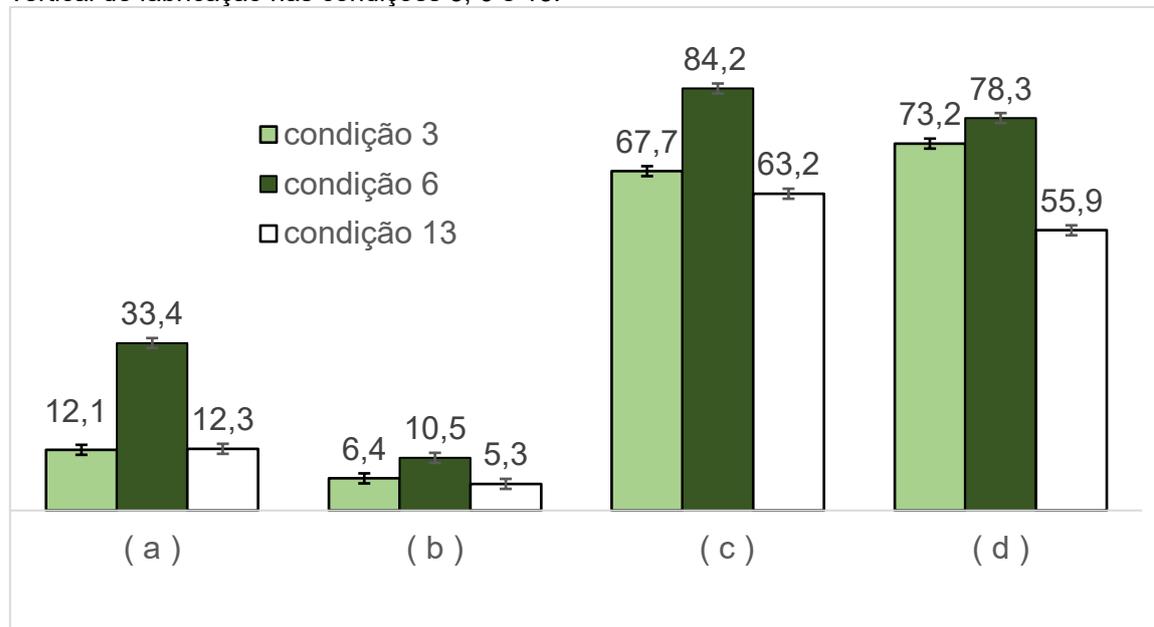


fonte: Autor

Os valores de alongamento no ensaio de tração e dureza HRB seguiram a mesma tendência do ensaio de tração, conforme pode ser observado na Figura 51.

O alongamento medido no ensaio de tração e a Dureza HRB foram maiores para a condição "6". A presença de defeitos internos, como porosidade, contribui para a redução dos valores de alongamento e de dureza. Esses resultados estão de acordo com os obtidos em outros estudos [59].

Figura 51 - a) alongamento na direção horizontal de fabricação, (b) alongamento na direção vertical de fabricação, (c) dureza (HRB) na direção horizontal de fabricação e (d) dureza (HRB) na direção vertical de fabricação nas condições 3, 6 e 13.



Fonte: Autor

Na Figura 52 é mostrada a imagem de duas amostras submetidas ao rompimento do ensaio de tração. Observa-se que a fabricação na direção horizontal, conforme Figura 52b, propiciou maior alongamento da amostra em relação à direção vertical de fabricação indicada na Figura 52a.

Figura 52 - Corpos de prova do ensaio de tração – Condição 3 na posição vertical (a) e na posição horizontal (b).

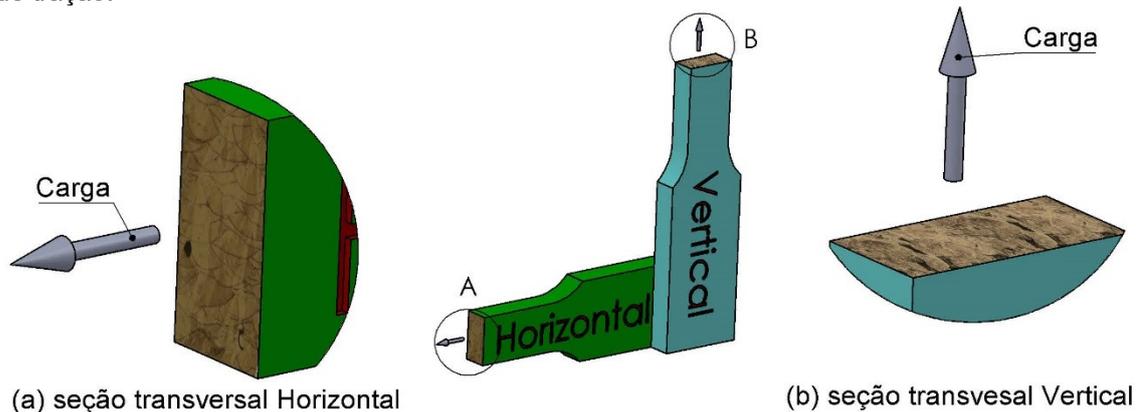


Fonte: Autor

Na literatura [88] e [89] são indicados que defeitos (falta de fusão, poros, trincas e segregações) em componentes fabricados por FSL são mais frequentes na interface das camadas consolidadas. Esses defeitos podem provocar concentradores de tensão reduzindo o desempenho mecânico. Em corpos de prova fabricados com a construção vertical, as superfícies de interface entre as

camadas adjacentes são ortogonais à direção do carregamento no ensaio de tração. Amostras fabricadas no sentido horizontal; essas superfícies são colocadas ao longo da direção de carregamento, conforme mostrado na Figura 53.

Figura 53 – Representação esquemática das seções transversais, apresentando falhas nas direções horizontal (a) e vertical (b) de fabricação por FSL em relação ao carregamento no ensaio de tração.



Fonte: Autor

Portanto, a posição das interfaces das camadas (local de acúmulo da maior quantidade de defeitos no consolidado), em relação ao sentido da aplicação da carga é a causa de se obter propriedades mecânicas inferiores na direção de construção vertical. Nesta situação a maior área de defeitos (vazios) está na direção perpendicular ao sentido de carregamento.

## 6 CONCLUSÕES

As principais conclusões deste estudo estão mencionadas na sequência.

Os pós dos diferentes fornecedores, mesmo atendendo especificações técnicas, apresentaram diferentes propriedades de empacotamento e de fluidez, proporcionando resultados distintos de porosidade nas amostras consolidadas por FSL.

A metodologia utilizada para avaliação dos parâmetros de consolidação, a partir da relação de potência do laser por velocidade de varredura, com o intervalo de diferentes hachuras (arranjo experimental) e espessura de camada de 30  $\mu\text{m}$  foi adequado para fabricação de amostras.

A utilização da relação potência do laser e velocidade de movimentação do laser com intervalos diferentes de distância entre os passes (hachura) foi acertada na fabricação de amostras consolidadas com porosidade aparente em torno de 1 % e rugosidade menor do que 15  $\mu\text{m}$ .

A estratégia de varredura, utilizando os parâmetros selecionados, indicou influência na porosidade e rugosidade, em ambos os fabricantes de pó.

As análises da microestrutura apresentaram a formação de microestruturas celulares refinadas orientadas na direção do fluxo de extração de calor. Evidências de crescimento epitaxial foram observadas na direção do eixo z.

A fase austenítica ( $\gamma$ ) do tipo (CFC) foi obtida nas amostras após o resfriamento até a temperatura ambiente.

A morfologia de fratura indicou características dúcteis e formação de pequenos vazios (*dimples*).

As propriedades mecânicas de amostras fabricadas com potência do feixe laser de 212 Watts, velocidade de 1600 mm/s, hachura de 0,07 mm e espessura de camada de 0,03 mm apresentaram porosidade em torno de 1,0 %, densidade geométrica de 7,65 g/cm<sup>3</sup> (> 95 % da densidade teórica), limite de resistência à tração de (612 $\pm$ 43) MPa e limite de escoamento de (544 $\pm$ 37) MPa, portanto acima de valores referenciados em normas vigentes.

A construção na posição horizontal propiciou a fabricação de amostras com menores porosidades (maior densidade geométrica) e maiores limites de ruptura e de escoamento e maior alongamento, no ensaio de tração, em relação à construção na direção na posição vertical.

As análises realizadas neste estudo indicaram que existe um balanço térmico no processo de FSL, que deve ser levado em consideração na seleção dos parâmetros para reduzir a presença de vazios. Nas condições usadas nestes experimentos, a densidade de energia volumétrica de 60 a 70 J/mm<sup>3</sup> propiciou obter amostras com menor porosidade, maior densidade, maiores limites de escoamento e de ruptura e menor alongamento.

## Bibliografia

- [1] A. S. D. OLIVEIRA, “Universidade Federal do Paraná. LaMaRS,” 2008. [Online]. Available: [http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM206/Prof\\_Marcondes/Acos%20inoxidaveis.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM206/Prof_Marcondes/Acos%20inoxidaveis.pdf). [Acesso em 9 setembro 2020].
- [2] F. C. PINTO, Avaliação da estabilidade microestrutural do aço inoxidável austenítico 316L, Lorena - SP: Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, 2020.
- [3] D. L. BOURELL, Perspectives on additive manufacturing., Annu. Rev. Mater Res, 2016, pp. 1-18.
- [4] F. MAGAZINE, “Still tremendous untapped potential,” [Online]. Available: <https://fonmag.de/highlight-stories/2019/wohlers-2019/?L=1>. [Acesso em 18 agosto 2018].
- [5] B. STUCKER, I. GIBSON e D. ROSEN, Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, New York: Springer-Verlag, 2015.
- [6] S. L. SING, Selective Laser Melting of Novel Titanium- Tantalum Alloy as Orthopaedic Biomaterial, Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019, pp. 1-4; 17-19.
- [7] L. J. KUMAR, P. M. PANDEY e D. WIMPENNY, 3 D Printing and Additive Manufacturing Technologies, Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019, pp. 2, 42.
- [8] K. ANTONY e T. R. RAKESHNATH, Study on Rayleigh–Bénard Convection in Laser Melting Process, Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019, p. 4.
- [9] C. LEINENBACH, “Selective Laser Melting- Materials Science and Technology,” [Online]. Available: [www.empa.ch/web/coating-competence-center/selective-laser-melting](http://www.empa.ch/web/coating-competence-center/selective-laser-melting). [Acesso em 02 março 2019].
- [10] E. A. F. F. Pallarolas, “Revisão técnica de processos manufatura aditiva e estudo de configurações para estruturas de impressoras tridimensionais,” São Carlos, 2013.
- [11] S. B. D. & B. S. Das, Metallic materials for 3D printing., vol. 4, MRS Bulletin, 2016, p. 729–741.
- [12] T. D. Zhang, H. Wei, J. Zuback, T. Mukherjee, J. Elmer, J. M. a. A. Beese, A. Wilson-Heid e A. De, “Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties,” vol. 92, p. 112–224, 2018.
- [13] ABNT NBR - Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 100838 - Solo - Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática.”.
- [14] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR ISO 17296-2 DE 01/2019 - "Manufatura aditiva - Princípios gerais - Parte 2: Visão geral de categorias de processo e de matéria-prima"*, pp. 1-9.

- 
- [15] M. Fousová, D. Vojtěch, K. Doubrava, M. Daniel e C.-F. Lin, Influence of Inherent Surface and Internal Defects on Mechanical Properties of Additively Manufactured Ti6Al4V Alloy, vol. 11, Materials, 2018, pp. 2-18.
- [16] C. R. B. J. J. Tong, Persson and A. Plummer. Mechanical properties of titanium-based Ti-6Al-4V alloys manufactured by powder bed additive manufacture, Materials Science and Technology, 2016, pp. 1-11.
- [17] B. Vayssette, N. Saintier, C. Brugger, M. El May e E. Pessard, Surface roughness of Ti-6Al-4V parts obtained by SLM and EBM: Effect on the High Cycle Fatigue life, vol. 213, Procedia Engineering, 2018, pp. 89-97.
- [18] G. Mandil, V. T. Le, H. Paris e M. Suard, Building new entities from existing titanium part by Electron Beam Melting: Microstructures and mechanical properties, Vols. %1 de %285(5-8), The International Journal of Advanced Manufacturing Technology , pp. 1835-1846.
- [19] E. S. Leva, F. H. Costa, d. S. C. T. dos Santos, A. L. Jardini, J. V. L. da Silva e J. B. Fogagnolo, Microstructure and mechanical properties of hierarchical porous parts of Ti-6Al-4V alloy obtained by powder bed fusion techniques, Rapid Prototyping Journal, 2021, pp. 732-746.
- [20] H. Chen, Q. Han, C. Wang, T. Liu, B. Chen e W. J., *Porous Scaffold Design for Additive Manufacturing in Orthopedics: A Review*, *Front*, vol. 8:609, Bioeng. Biotechnol. 8:609, p. 1-20, , 2020, pp. 1-20.
- [21] CPMH, [Online]. Available: <https://www.cpmhdigital.com.br/tecnologia-trabecular-em-metal>. [Acesso em 06 setembro 2022].
- [22] A. SIMCHI e H. POHL, "Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder," vol. 1-2, p. 119-128, 25 outubro 2003.
- [23] E. Frazier, *Metal Additive Manufacturing: A Review William*, vol. 23, JMEPEG, 2014, p. 1917-1928.
- [24] W. MEINERS, *Selective Laser Melting: Generative Fertigung fur die Produktion der Zukunft?*, Aachen: Fraunhofer Institut fur Lasertechnik, 2012.
- [25] Y. Pupo, J. Delgado, L. Serenó e J. Ciurana, "Scanning space analysis in Selective Laser Melting for CoCrMo powder," vol. 63, p. 370-378, 2013.
- [26] K. A. Kaufui V. Wong e A. and Hernandez, *A Review of Additive Manufacturing*, International Scholarly Research Network ISRN, 2012, pp. 1-1010 .
- [27] A. A. Germarovich, *Establishing a Benchmark Part analyze the capabilities of selective laser melting systems*, Santa Catarina: Materials Engineering from the Federal University of Santa Catarina, 2011.
- [28] W. K. E. N. READ, Selective laser melting of AlSi10 Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development, (2015)., pp. 65, 417-424 .
- [29] A. M. Zanatta, S. Marques, A. F. d. Souza e K. S. Al-Rubaie, "Influência dos parâmetros do processo fusão seletiva a laser na microestrutura e densidade de

---

peças fabricadas em aço maraging 300,” 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Salvador-BA, 2015..

- [30] A. F. d. S. Y. Y. Sabrina Marques, “Parâmetros do processo de fabricação por Fusão Seletiva a Laser,” *Revista Ferramental*. X. 35, pp. 1-14, Julho 2015.
- [31] Girardin, G. Barucca, P. Mengucci, F. Fiori, E. Bassoli, A. Gatto, L. Iuliano e B. Rutkowski, Biomedical Co-Cr-Mo Components Produced by Direct Metal Laser Sintering1, vol. 3, *Materials Today: Proceedings*, 2016, p. 889–897.
- [32] D. GRZESIAK e M. KRAWCZYK, “Effects of the Selective Laser Melting Process Parameters on the Functional Properties of the Co-Cr Alloy.,” *International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (iJES)*, vol. 3, pp. 39-42, 2015.
- [33] R. A. PAGGI, Sinterização seletiva a laser de compósitos com gradiente funcional entre poliamida 12 e nanotubos de carbono aplicáveis no setor aeroespacial., Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- [34] C. DOMINGUES e M. PIRES, “Medição de feixes laser: Aplicação à segurança.,” 1ª Conferência Nacional da SPMET, pp. 28-29, Novembro 2005.
- [35] B. CAULFIELD e P. MCHUGH, “Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process,” vol. 182, p. 477–488, 2007.
- [36] F. H. Li, M. Wang, D. Lou, W. Xia e Xiaoying, “Microstructural features of biomedical cobalt–chromium–molybdenum (CoCrMo) alloy from powder bed fusion to aging heat treatment,” *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 45, pp. 146-156, 2020.
- [37] Y. S. Sun, Q. S. K. Guo, X. Wang, J. Liu e Jie, “Effect of scanning speed on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 793, p. 139879, 2020.
- [38] D. e. a. FAIDEL, “Investigation of the selective laser melting process with molybdenum powder,” vol. 8, pp. 88-94, 2015.
- [39] E. Liverani, S. Toschi, L. Ceschini e A. Fortunato, “Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel,” vol. 249, p. 255–263, 2017.
- [40] J. SIENIAWSKI, W. K. K. ZIAJA e M. MOTYKA, *Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Two-Phase Titanium Alloys*, INTECH, 2013.
- [41] D. Kong, X. Ni, C. Dong, X. Lei, L. Zhang, C. Man, J. Yao, X. Cheng e X. Li, *Bio-functional and anti-corrosive 3D printing 316L stainless steel fabricated by selective laser melting*, Elsevier, 2018, pp. 88-101.
- [42] N. S. G. Neto, *Caracterização mecânica e microestrutural do aço inoxidável 316L fabricado por manufatura aditiva para aplicações biomédicas.*, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2021.
- [43] A. A., C. Cola, S. E. Zeltmann e N. Gupta, *Effect of particle size distribution on the packing of powder beds: A critical discussion relevant to additive manufacturing*, vol. 24, *Materials Today Communications*, 2020, pp. 1-17 .

- 
- [44] A. WHEELER, "AP&C's Third Plasma Atomization Reactor Put Into Service," 2015. [Online]. Available: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/10097/APCs-Third-Plasma-Atomization-Reactor-Put-Into-Service.aspx>. [Acesso em 11 março 2019].
- [45] G. CHEN e P. T. J. C. X. H. T. S.Y. ZHAO, "A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization.," n° Powder Technology, 2018.
- [46] H. H. C. MEIER, "Experimental Studies on Selective Laser Melting of Metallic Parts.," p. 665–70, 2008.
- [47] B. Sebastian, M. Wilhelm e D. Andrei, "Selective laser melting: A manufacturing technology for the future?," vol. 9, pp. 33-38, 2012.
- [48] P. R. Mei e A. L. V. d. Silva, Aços e Ligas Especiais, 3ª ed., São Paulo: Blucher, 2010.
- [49] SANDVIK, "AUSTENITIC STAINLESS STEELS," 2015. [Online]. Available: <https://www.metalpowder.sandvik>. [Acesso em 20 abril 2020].
- [50] W. D. CALLISTER, CALLISTER, W. D. Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, Uma abordagem integrada., Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- [51] Palmetal, "Produtos," 20 julho 2022. [Online]. Available: <https://blog.palmetal.com.br/9-aplicacoes-em-aco-inox-que-vao-te-surpreender/>.
- [52] ortopedistamed, [Online]. Available: <https://ortopedistamed.com.br/wp-content/uploads/2017/01/foto11.jpg>. [Acesso em 20 julho 2022].
- [53] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk e C. Emmelmann, "Additive manufacturing of metals," vol. 117, pp. 371-392, 2016.
- [54] C. Y. a. C. C. K. a. D. Z. L. a. L. Z. H. a. Z. D. Q. a. L. L. E. a. S. S. L. Yap, Review of selective laser melting: Materials and applications, vol. 2, A. p. reviews, Ed., AIP Publishing LLC, 2015.
- [55] R. A. M. e. a. MONTUORI, Manufatura Aditiva de Aço Inoxidável 316L por Fusão Seletiva a Laser, vol. 25, Soldagem & Inspeção, 2020.
- [56] J. Li e A. K. Srivastava, "Application of Optimized Laser Surface Re-melting Process on Selective Laser Melted 316L Stainless Steel Inclined Parts Jafar Ghorbani," *Elsevier*, pp. 1-19, 2020.
- [57] R. CASATI, J. LEMKE e M. VEDANI, Microstructure and fracture behavior of 316L austenitic stainless steel produced by selective laser melting, vol. 32, Journal of Materials Science & Technology, 2016, pp. 738-744.
- [58] R. H. d. S. Souza, Analise ndwjijcjd hcbidbihcuibc, Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- [59] L. B. O. d. Souza, "Correlação entre processos de fabricação convencional e por manufatura aditiva com as propriedades do aço inoxidável 316L," *Universidade Federal Uberlândia*, 2022.

- 
- [60] R. CASATI, J. LEMKE e M. VEDANI, *Microstructure and fracture behavior of 316L austenitic stainless steel produced by selective laser melting*, vol. 32, 2016, pp. 738-744.
- [61] C. KÖRNER, "Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review," vol. 61, pp. 361-377, 2016.
- [62] C. Tang, K. Le e C. Wong, "Physics of humping formation in laser powder bed fusion," vol. 149, 2020.
- [63] H. F. e. Al., "A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties," vol. 144, pp. 98-128, 2018.
- [64] V. B. B. S. e. a. KEMPEN K, "Selective laser melting of crack-free high density M2 high speed steel parts by baseplate preheating," nº 136, 2014.
- [65] E. K. A. M. M. CARTER L N, "Optimization of selective laser melting for a high temperature Ni-superalloy," vol. 2, nº 21, pp. 423-432, 2015.
- [66] American Society for Testing and Materials, *ASTM F-3049-14 "Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes"*.
- [67] American Society for Testing and Materials, *ASTM B213 , B212 Standard Test Methods For Flow Rate Of Metal Powders Using The Hall Flowmeter Funnel*.
- [68] American Society for Testing and Materials., *ASTM B527-15 "Standard Test Method For Tap Density Of Metal Powders And Compounds"*.
- [69] OMNITEK, "OMNITEK," 2000. [Online]. Available: <http://www.omnitek.com.br>. [Acesso em 2 abril 2020].
- [70] American Society for Testing and Materials, *ASTM F3122-14 Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes*, 2022.
- [71] Deutsches Institut für Normung DIB 4776, *Measurement of Surface Roughness; Parameters Rk, Rpk, Rvk, Mrt, Mr2 For The Description Of The Material Portion (Profile Bearing Length Ratio) In The Roughness Profile, Measuring Conditions and Evaluation Procedures*, 1990.
- [72] Sociedade dos Engenheiros Mecânicos dos Estados Unidos, *ASME B46.1 - Surface Topology*, 2017.
- [73] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR ISO 4287 - Especificações geométricas do produto .*, 2002.
- [74] Mahr Company, "Mahr," [Online]. Available: [www.mahr.com](http://www.mahr.com). [Acesso em 20 06 2020].
- [75] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR ISO 2768-2 " Parte 2: Tolerâncias geométricas para elementos sem indicação de tolerância individual," 2001.

- 
- [76] American Society for Testing and Materials., “ASTM -E 8 – 04 - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”.
- [77] American Society for Testing and Materials., “ASTM F3184-16 - Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion”.
- [78] Z. A. Muhammad, A. K. Muhammad e M. Khan, “An experiment investigation on accuracy of huasner ratio and carr index of powdersin additive manufacturing processes,” *Metal Powder Report*, vol. 76, pp. 550 -554, 2021.
- [79] D. Wang, Y. Liu, Y. Yang e D. Xiao, “Theoretical and experimental study on surface roughness of 316L stainless steel metal parts obtained through selective laser melting,” vol. 22, p. 706–716, 20 junho 2016.
- [80] E. Liverani, A. Fortunato, A. Leardini, C. Belvedere, S. Siegler, L. Ceschini e A. Ascari, “Fabrication of Co–Cr–Mo Endoprosthetic Ankle Devices by Means of Selective Laser Melting SLM,” *Materials & Design*, vol. 106, p. 60–68, 2016.
- [81] R. Rashid, S. H. S.H.Masood, D. Ruan, S. Palanisamy, R. R. R.A. e M. Brandt, “Effect of scan strategy on density and metallurgical properties of 17-4PH parts printed by Selective Laser Melting (SLM),” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 249, pp. 502-511, 2017.
- [82] T. S. M. BHARDWAJ, “Effect of Laser Scanning Strategies on Texture, Physical and Mechanical Properties of Laser Sintered Maraging Steel,” p. 102–109, 2018.
- [83] Y. Zhong, Wilkman, L. Liu, D. Cui e Z. Shen, “Intragranular cellular segregation network structure strengthening 316L stainless steel prepared by selective laser melting,” *Journal of Nuclear Materials*, pp. 170-178, 2016.
- [84] S. Ghose, S. Babu, R. J. V. Arkel, K. Nai, P. A. Hooper e J. R. Jeffers, he influence of laser parameters and scanning strategies on the mechanical properties of a stochastic porous material, vol. 131, *Materials & Design*, 2017, pp. 498-508.
- [85] Z. G, E. Chlebus, P. Szymczyk e J. Kurzac}, “Application of X-Ray CT Method for Discontinuity and Porosity Detection in 316L Stainless Steel Parts Produced with SLM Technology.,” p. 608–614, 2014.
- [86] A. S. Wu, D. W. Brown, M. Kumar, G. F. Gallegos e W. E. King, “An Experimental Investigation, into Additive Manufacturing-Induced Residual Stresses in 316L Stainless Steel,” p. 6260–6270, 2014.
- [87] A. B. SPIERINGS, N. Herres e G. Levy, “Influence of the Particle Size Distribution on Surface Quality and Mechanical Properties in AM Steel Parts,” p. 195–202, 2011.
- [88] A. RÖTTGER, J. BOES, W. THEISEN, M. THIELE, C. ESEN, A. EDELMANN e R. HELLMANN, “Microstructure and mechanical properties of 316L SS processed by different SLM devices. The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology,” vol. 108, p. 769–783, 2020.
- [89] M. Godeca, S. Zaeffererb, B. Podgornika, M. Sinkoc e E. Tchernychova, “Quantitative multiscale correlative microstructure analysis of additive manufacturing of stainless steel 316L processed by selective laser melting,” pp. 1-9, 2019.



---

---

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000  
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908  
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil  
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.**

---

---