

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

CARLOS EDUARDO SILVA PRADO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS PEÇAS FABRICADAS EM AÇO INOX 316L
POR FILAMENTO FUNDIDO**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

CARLOS EDUARDO SILVA PRADO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS PEÇAS FABRICADAS EM AÇO INOX 316L
POR FILAMENTO FUNDIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina como parte dos
requisitos para obtenção do título
de Engenheiro Mecatrônico

Orientador:
Prof. Aurélio da Costa Sabino Netto

Coorientador:
Luiz Fernando Segalin de Andrade

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Prado, Carlos Eduardo Silva
Avaliação da resistência mecânica das peças fabricadas em
aço inox 316L por filamento fundido /Carlos Eduardo Silva
Prado ; orientador, Aurélio da Costa Sabino Netto,
coorientador, Luiz Fernando segalin De Andrade , 2025.
109 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto
Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis, Graduação
em Engenharia mecatronica, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia mecatronica. 2. Engenharia Mecatrônica . 3.
Manufatura aditiva . 4. Impressão 3D metálica . 5. Ensaio
de compressão . I. Netto, Aurélio da Costa Sabino . II. De
Andrade , Luiz Fernando segalin. III. Instituto Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia mecatronica. IV.
Título.

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS PEÇAS FABRICADAS EM AÇO INOX 316L POR FILAMENTO FUNDIDO

CARLOS EDUARDO SILVA PRADO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em 2025 e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 25 de Julho, 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **AURELIO DA COSTA SABINO NETTO**
Data: 25/08/2025 18:15:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Aurélío da Costa Sabino Netto, Doutor
IFSC

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ FERNANDO SEGALIN DE ANDRADE**
Data: 25/08/2025 18:18:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luiz Fernando Segalin de Andrade, Doutor
IFSC

Documento assinado digitalmente
 **HENRIQUE CEZAR PAVANATI**
Data: 25/08/2025 21:12:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Henrique Cezar Pavanati, Doutor
IFSC

Documento assinado digitalmente
 **AURELIO DA COSTA SABINO NETTO**
Data: 25/08/2025 18:15:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marcelo Niehues Schlickmann, Doutor
IFSC

Dedico este trabalho aos amigos que a vida acadêmica me trouxe.
A todos que contribuíram, a todos que me ensinaram que nunca foi perda de tempo.
Dedico a quem esteve presente enquanto eu desenhava essa parte da minha vida.
Obrigado por cada momento compartilhado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais José Carlos e Dilene Barbosa, por todo o amor, apoio e sacrifício. Foram vocês que me guiaram e proporcionaram as experiências necessárias para que pudesse me desenvolver e fortalecer. Essa conquista é por vocês.

A minha irmã Yasmim Prado, por toda preocupação, paciência, amor e carinho.

Aos professores, Aurélio da Costa Sabino Netto e Luiz Fernando Segalin de Andrade, pela confiança depositada no desenvolvimento deste trabalho e por todo o apoio constante durante todo este processo.

A todos os amigos que fiz durante esses anos de graduação, levo as vivências que tive com cada um de vocês.

"Tudo que temos que decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado."

— Gandalf, O Senhor dos Anéis

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a resistência mecânica e o comportamento dimensional de peças fabricadas por manufatura aditiva, utilizando o processo Metal *Fused Filament Fabrication* (MFFF) com o filamento Ultrafuse® 316L. A proposta de pesquisa busca compreender o desempenho qualitativo das peças obtidas, bem como explorar as principais etapas do processo de fabricação por MFFF: impressão, *debinding* e sinterização. Para isso, foram produzidas 48 amostras cilíndricas, com variação nos parâmetros de impressão, como porcentagem de preenchimento, número de perímetros e altura de camada. As peças avaliadas foram fabricadas por meio do sistema integrado de máquinas Raise3D MetalFuse e, posteriormente, submetidas às etapas de *debinding* com ácido oxálico e sinterização em atmosfera inerte. Após o processamento térmico, foram realizados ensaios de dureza Vickers e compressão mecânica, além de cálculos de densidade e inspeções estruturais com estereoscópio e tomografia computadorizada. Com base nos dados obtidos, observou-se que os parâmetros de impressão influenciam significativamente a contração volumétrica, a densidade e o desempenho mecânico final das peças. Verificou-se, ainda, que amostras com maior densidade de preenchimento apresentaram superior resistência à compressão e melhor integridade dimensional. O estudo evidencia a viabilidade do processo MFFF para aplicações funcionais, contribuindo com dados experimentais relevantes e estratégias de otimização para a consolidação e o avanço dessa tecnologia.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Impressão 3D metálica. MFFF. Aço inoxidável 316L. Ensaio de compressão.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the mechanical strength and dimensional behavior of parts manufactured through additive manufacturing using the Metal Fused Filament Fabrication (MFFF) process with Ultrafuse® 316L filament. The research seeks to understand the qualitative performance of the fabricated parts, as well as to explore the main stages of the MFFF manufacturing process: printing, debinding, and sintering. For this purpose, 48 cylindrical samples were produced with variations in printing parameters such as infill percentage, number of perimeters, and layer height. The evaluated parts were manufactured using the integrated Raise3D MetalFuse system and subsequently subjected to debinding with oxalic acid and sintering in an inert atmosphere. After thermal processing, Vickers hardness and mechanical compression tests were performed, along with density calculations and structural inspections using a stereoscope and computed tomography. Based on the obtained data, it was observed that printing parameters significantly influence volumetric shrinkage, density, and the final mechanical performance of the parts. Furthermore, it was found that samples with higher infill density exhibited greater compression strength and better dimensional integrity. The study demonstrates the viability of the MFFF process for functional applications, contributing relevant experimental data and optimization strategies for the consolidation and advancement of this technology.

Keywords: Additive manufacturing. Metal 3D printing. MFFF. 316L stainless steel. Compression test.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Justificativa.....	17
1.2 Definição do Problema.....	17
1.3 Objetivo Geral.....	18
1.4 Objetivos Específicos.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Manufatura Aditiva.....	19
2.2 Processo de Fabricação por Filamento Fundido com Metal.....	21
2.3 Aplicação da Tecnologia MFFF via RAISE 3D Metal Fuse.....	23
2.3.1 Filamentos.....	24
2.3.2 Impressão da peça verde.....	24
2.3.3 Remoção dos ligantes (debinding).....	25
2.3.4 Sinterização.....	28
2.3.5 Acabamentos.....	30
2.3.6 Contração.....	31
2.3.7 Porosidade e Densidade.....	32
2.4 Aço 316L.....	33
2.5 Filamento de Aço 316L.....	34
2.6 Ensaio de compressão.....	36
2.7 Ensaio de dureza.....	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1 Sistema MFFF.....	39
3.2 Filamento Basf 316L.....	42
3.3 Geometria para estudo.....	42
3.3.1 Geometria de avaliação de tração.....	43
3.3.2 Geometria de avaliação de compressão.....	44
3.4 Parâmetros de impressão das peças.....	45
3.5 Testes preliminares de impressão.....	46
3.6 Impressão dos corpos de prova.....	47
3.7 Debinding.....	48
3.8 Sinterização.....	51
3.9 Medidas físicas.....	53
3.9.1 Pesagens.....	54
3.10 Avaliação da qualidade superficial.....	55
3.11 Microscopia Eletrônica de varredura.....	56
3.12 Tomografia computadorizada.....	57
3.13 Ensaio mecânicos.....	58
3.13.1 Ensaio de dureza.....	59
3.13.2 Ensaio de compressão.....	61
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	67
4.1 Obtenção das peças.....	67
4.1.1 Testes pré impressão.....	68

4.1.2 Impressão.....	71
4.1.3 Debinding.....	71
4.1.4 Sinterização.....	74
4.2 Resultado das análises de qualidade de superfície.....	76
4.2.1 Resultado da MEV.....	81
4.2.2 Resultado da Tomografia.....	82
4.3 Análise dimensional e cálculo da contração.....	84
4.4 Resultados dos ensaios mecânicos.....	86
4.4.1 Resultados de dureza.....	86
4.4.2 Resultados de Compressão.....	87
5 CONCLUSÕES.....	97
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	98
REFERÊNCIAS.....	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva da taxa de debinding.....	27
Figura 2 – Sinterização ilustrada.....	28
Figura 3 – Processo de completo de impressão MFFF.....	30
Figura 4 – Rugosidade de superfície.....	31
Figura 5 – Porosidade observados em metais fabricados com MFFF.....	33
Figura 6 – Corpo de prova posicionado no teste de compressão.....	37
Figura 7 – Etapas do processo MFFF.....	40
Figura 8 – Equipamentos utilizados no processo de MFFF.....	40
Figura 9 – Etapas do processo visto nas peças de compressão.....	41
Figura 10 – Filamento BASF.....	42
Figura 11 – Corpo de prova de tração.....	43
Figura 12 – Corpo de prova de tração.....	44
Figura 13 – Corpo de Prova utilizado como referência.....	44
Figura 14 – Fatiamento das peças dos dois projetos.....	45
Figura 15 – Grupo de impressão no Idea Maker.....	47
Figura 16 – Aspecto do ácido antes e após trituração.....	48
Figura 17 – Indicação do compartimento da solução.....	49
Figura 18– Posicionamento das peças para debinding.....	49
Figura 19 – Especificações para Debinding.....	50
Figura 20 – Peças no forno de debinding.....	51
Figura 21 – Compartimentação interna do forno.....	52
Figura 22 – Gráfico de aquecimento forno.....	52
Figura 23 – Etapas do processo de sinterização.....	53
Figura 24 – Pesagem das peças com balança digital.....	54
Figura 25 – Estereoscópio.....	55
Figura 26 – Peça no estereoscópio.....	56
Figura 27– Superfície de topo vista no programa.....	56
Figura 28 – Tomógrafo.....	58
Figura 29 – Durômetro.....	59
Figura 30 – Aplicação de carga no corpo de prova.....	60
Figura 31 – Superfície superior do corpo de prova.....	61
Figura 32 – Máquina de Tração e Compressão Emic 200 kN.....	62
Figura 33 – Máquina de compressão utilizada.....	64
Figura 34– Eletroerosão a fio FW 1U.....	65
Figura 35 – Comparação de peça impressa com peça de aferição.....	65
Figura 36– Compressão aplicada na peça de aferição.....	66
Figura 37– Compressão aplicada na peça de aferição.....	66
Figura 38 – Tensão de escoamento.....	67
Figura 39 – Cubo de calibração.....	69
Figura 40 – Acúmulo de material no bico.....	69
Figura 41– Deslocamento de camada nas peças de teste.....	70

Figura 42– Rodada adicional de impressão.....	70
Figura 43 – Preset de impressão Idea Maker.....	72
Figura 44– Triturador.....	73
Figura 45 – Curva de temperatura aplicada no debinding.....	73
Figura 46 – Delaminações nas peças.....	74
Figura 47– Delaminações nas peças.....	74
Figura 48 – Peças alocadas nas plataformas de grafite.....	75
Figura 49– Curva de temperatura aplicada na sinterização.....	76
Figura 50 – Contração observada em peças.....	77
Figura 51 – Vista da superfície lateral com Estereoscópio.....	77
Figura 52 – Vista da peça pós sinterização.....	78
Figura 53 – Comparação A (Grupos 1 e 2).....	79
Figura 54 – Comparação B (Grupos 3 e 7).....	79
Figura 55 – Comparação C (Grupos 4 e 8).....	80
Figura 56 – Comparação D (Grupos 1 e 2).....	81
Figura 57 – Comparação E (Grupos 3 e 7).....	81
Figura 58 – Comparação F (Grupos 4 e 8).....	81
Figura 59– Superfície superior do corpo de prova aproximada.....	82
Figura 60 – Vista da peça pós sinterização.....	83
Figura 61 – Comparativo vista diagonal superior.....	84
Figura 62 – Comparativo de peças vista superior.....	84
Figura 63 – Comparativo de peças vista lateral.....	84
Figura 64 – Médias obtidas após análise dimensional de cada etapa.....	86
Figura 65 – Contração de altura e diâmetro por condição.....	87
Figura 66 – Variação de densidade por condição.....	87
Figura 67– Medidas realizadas no programa Zeiss Stemi2000-C.....	88
Figura 68– Dureza por grupo de peças.....	89
Figura 69 – Comparativo de peças de 100% de preenchimento.....	90
Figura 70 – Peça de 100% de preenchimento pós ensaio.....	91
Figura 71 – Peça de 50% de preenchimento pós ensaio.....	91
Figura 72 – Curva de deformação por força aplicada na peça de 50%.....	92
Figura 73 – Compressão aplicado nas peças destinadas a aferição.....	93
Figura 74 –Gráfico tensão aplicada nas peças.....	93
Figura 75–Gráfico de paretto das variáveis.....	94
Figura 76 – Módulo de compressão.....	95
Figura 77 – Tensão de escoamento.....	96
Figura 78– Curvas de deformação das condições.....	96
Figura 79– Resistência proporcional das variáveis aplicadas.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de Tipos de Manufatura.....	23
Tabela 2 – Propriedades aço 316L em barra.....	34
Tabela 3 – Especificações técnicas do filamento 316L.....	35
Tabela 4 – Fatores de Compensação de Encolhimento do 316L.....	35
Tabela 5 – Propriedades Mecânicas Pós-Sinterização do Aço 316L.....	36
Tabela 6 – Normas do corpo de prova para ensaios de compressão.....	38
Tabela 7 – Dimensões de Corpos de Prova Segundo Diferentes Normas.....	43
Tabela 8 – Parâmetros de cada grupo de peças.....	46
Tabela 9 – Tempo estimado de impressão.....	71
Tabela 10 – Critério de comparação de imagens via câmera usual.....	78
Tabela 11 – Critério de comparação de imagens via estereoscópio.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MFFF	<i>Metal Fused Filament Fabrication</i>
MFFF	<i>Metal Fused Filament Fabrication</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
IFSC	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
IPA	<i>Isopropyl Alcohol</i> (Álcool isopropílico)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
MPa	Megapascal (unidade de tensão)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão de Normalização)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva tem evoluído de forma acelerada e contínua nos últimos anos, oferecendo soluções inovadoras para a produção de componentes com geometria e estrutura complexa. Dentre as diversas tecnologias disponíveis, destaca-se o processo de fabricação de metal por filamento fundido – MFFF (*Metal Fused Filament Fabrication*), que agrega a facilidade da impressão 3D a materiais que antes se mostravam restritos a processos de usinagem ou solda, como o aço inoxidável 316L, amplamente utilizado na indústria devido à sua resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas (COSTA et al., 2023; GALATI; MINETOLA, 2019).

O processo de MFFF permite a fabricação de peças metálicas sob demanda, o que reduz a necessidade de manutenção de estoques elevados e, consequentemente, otimiza os custos de produção. Além disso, a possibilidade de personalização das geometrias amplia as oportunidades para o desenvolvimento de componentes mais adequados às exigências específicas de cada aplicação.

Os campos de aplicação estão predominantemente voltados à indústria, porém eles podem ser diversificados, a versatilidade e a relação custo-benefício da tecnologia MFFF a tornam uma opção atraente para uma ampla gama de aplicações. Engenharia naval e aeroespacial, arquitetura e construção, joalheria e relojoaria, arte e escultura, fabricação de equipamentos esportivos e até mesmo no setor médico e biomédico auxiliando no desenvolvimento de próteses, implantes e instrumentos cirúrgicos (ALYAMMAHI et al., 2023; SANTOS et al., 2021).

No entanto, embora a tecnologia apresente vantagens como redução de desperdício de material, customização e baixo custo em séries pequenas, ainda existem lacunas quanto aos parâmetros que influenciam diretamente a resistência mecânica das peças fabricadas. Esses dados técnicos sobre a integridade e comportamento estrutural das peças impressas em 316L por MFFF agregam um grau de preocupação quando cogitamos sua aplicação na indústria e especialmente em componentes que exigem alto desempenho mecânico.

Diante desse cenário, o desenvolvimento de uma pesquisa voltada à avaliação da resistência mecânica de peças metálicas produzidas por esse método,

considerando fatores como espessura da camada, perímetro externo e porcentagem de preenchimento.

1.1 Justificativa

A tecnologia de manufatura aditiva por filamento fundido com metal (MFFF) tem se consolidado como uma alternativa mais acessível e segura em comparação a métodos tradicionais de impressão 3D metálica, como a *Selective Laser Melting* – SLM e *Direct Energy Deposition* – DED. O uso de filamentos metálicos em matriz polimérica reduz riscos operacionais e torna o processo viável mesmo em ambientes com infraestrutura limitada.

Além da segurança e do custo, o MFFF tem mostrado potencial real para a produção de peças metálicas funcionais, despertando interesse em setores como biomédico, automotivo e aeroespacial. No entanto, muitos dos parâmetros aplicados ainda são baseados em ajustes empíricos, o que dificulta a previsibilidade dos resultados de desempenho mecânico.

Diante disso, este trabalho se propõe a contribuir com uma abordagem sistematizada, avaliando como variáveis de impressão influenciam na resistência mecânica, densidade e qualidade dimensional de peças em aço inox 316L.

1.2 Definição do Problema

O problema da pesquisa consiste na investigação para contribuir e tentar reduzir à escassez de informações consolidadas sobre o comportamento mecânico de peças metálicas produzidas por manufatura aditiva por filamento fundido com metal, utilizando aço inoxidável 316L.

Apesar de o processo MFFF apresentar vantagens em termos de custo, segurança e acessibilidade quando comparado a métodos tradicionais, como a fusão seletiva a laser, sua consolidação como alternativa viável para aplicações estruturais ainda é limitada. Isso ocorre, principalmente, pela ausência de estudos sistemáticos que avaliem, de forma quantitativa e padronizada, propriedades mecânicas como resistência à tração, dureza, compressão e tenacidade em peças sinterizadas a partir do filamento Ultrafuse 316L.

Além disso, os dados disponíveis na literatura apresentam elevada variabilidade metodológica, o que dificulta comparações diretas e compromete a validação técnica da tecnologia. Essa lacuna evidencia a necessidade de experimentação controlada para verificar a adequação do processo MFFF às exigências de aplicações que demandam confiabilidade mecânica.

1.3 Objetivo Geral

Avaliar propriedades físicas e o desempenho mecânico de peças produzidas por meio do processo MFFF, realizar aplicação da tecnologia com foco na compreensão das etapas de tratamento e na identificação dos fatores ajustáveis de maior relevância, com o objetivo de analisar as particularidades que exercem maior influência nos resultados finais, especialmente no resultado de resistência mecânica das peças impressas.

1.4 Objetivos Específicos

Considerando os objetivos gerais mencionados anteriormente, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos, conforme detalhado abaixo:

1. Medir a contração de peças com diferentes estratégias de preenchimento;
2. Calcular a densidade e avaliar a porosidade de peças com diferentes estratégias de preenchimento;
3. Realizar ensaios mecânicos de dureza e de compressão nas peças impressas e analisar dados de resistência mecânica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos necessários para a execução deste trabalho. Serão discutidos os fundamentos da impressão 3D, juntamente com os princípios do método de Fabricação por Filamento Fundido.

2.1 Manufatura Aditiva

O processo de manufatura aditiva (MA) consiste na aplicação de tecnologias que possibilitam a produção de peças por meio da deposição sucessiva de camadas de material, a partir de um modelo digital criado em software CAD.

Ela representa uma abordagem de construção tridimensional no campo da fabricação de componentes. Diferenciando-se dos métodos tradicionais, que se baseiam na subtração de material (como usinagem), a MA viabiliza a fabricação de geometrias complexas, com significativa redução de resíduos, prazos de produção menores e maior liberdade de design (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Segundo a *ASTM International* (2021), os processos de manufatura aditiva são classificados em sete categorias principais:

1. Fotopolimerização em Cuba (*Vat Photopolymerization*): baseia-se na cura seletiva de resinas líquidas fotossensíveis por luz ultravioleta. É amplamente aplicada em áreas que exigem alta precisão e acabamento superficial refinado, como odontologia e engenharia de produtos.
2. Jato de Material (*Material Jetting*): semelhante a impressoras a jato de tinta, esse processo deposita microgotas de material fotocurável sobre a base, permitindo a impressão de múltiplas cores e materiais simultaneamente.
3. Jato de Aglutinante (*Binder Jetting*): utiliza um agente ligante líquido para unir partículas de pó (metálico, cerâmico ou arenoso). É

frequentemente aplicado em fundição e produção de peças metálicas, que passam posteriormente por sinterização.

4. Extrusão de Material (*Material Extrusion*): Esse é um dos métodos mais populares, também conhecido como *Fused Deposition Modeling* (FDM), é caracterizado pela extrusão de filamento termoplástico fundido por um bico aquecido. Sua aplicação se estende de protótipos simples até modelos funcionais.
5. Fusão em Leito de Pó (*Powder Bed Fusion*): processos como o SLM (*Selective Laser Melting*) e o SLS (*Selective Laser Sintering*) fundem seletivamente partículas de pó metálico ou polímero com fontes de energia como laser ou feixe de elétrons, sendo amplamente utilizados nas indústrias aeroespacial, automotiva e médica.
6. Deposição de Energia Direta (*Directed Energy Deposition*): combina alimentação de pó ou fio metálico com uma fonte de energia concentrada (geralmente laser ou arco elétrico), permitindo a fabricação e reparo de componentes metálicos de alta complexidade.
7. Laminação de Folhas (*Sheet Lamination*): empilha e une camadas de materiais finos, cortadas individualmente para formar o modelo final. É uma alternativa rápida para prototipagem visual.

A escolha da tecnologia depende de diversos fatores, como tipo de material, requisitos dimensionais, custo e aplicação final da peça. A aplicação da MA já é amplamente consolidada em setores como o aeroespacial, automotivo, biomédico, arquitetura e design de produto, especialmente quando há demanda por personalização, redução de peso, ou redução no tempo de desenvolvimento (GALATI; MINETOLA, 2019).

2.2 Processo de Fabricação por Filamento Fundido com Metal

Como apresentado anteriormente, o processo de manufatura aditiva possui várias tecnologias consolidadas para manipulação de materiais metálicos, e uma das novas alternativas que recebem maior destaque é a de Filamento Fundido de Metal (MFFF). Ela surge como uma opção promissora por ser mais acessível e segura, especialmente quando comparada a processos de manufatura aditiva baseados em leito de pó metálico, como a Fusão Seletiva a Laser (SLM) ou a Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS).

Nessas técnicas, os pós metálicos finos representam riscos ocupacionais significativos, como explosividade, toxicidade por inalação e necessidade de controle atmosférico inerte (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Embora o MFFF reduza parte desses riscos ao encapsular o pó metálico em matriz polimérica (SANTOS et al., 2021), ainda existem cuidados necessários, principalmente durante as etapas de debinding e sinterização. A manipulação de ácidos e solventes agressivos, e a geração de gases durante o aquecimento e operação de fornos em altas temperaturas impõem riscos ocupacionais que exigem protocolos de segurança e uso de EPI específicos.

Tecnologias como o *Metal Fused Filament Fabrication* (MFFF), que combina a extrusão de filamento metálico com processos subsequentes de debinding e sinterização, têm ganhado destaque por sua acessibilidade e potencial para fabricação funcional de peças metálicas (COSTA et al., 2023).

Além disso, por não demandar equipamentos de laser de alta potência ou câmaras seladas com gases nobres, o MFFF apresenta maior segurança operacional e menores exigências quanto ao ambiente de trabalho. Essa tecnologia tem exercido um papel significativo na democratização da produção, permitindo a criação de peças sob demanda por usuários com variados níveis de investimento e infraestrutura (LOTFIZAREIA et al., 2024).

Apesar do processo representar um avanço significativo na popularização da manufatura aditiva, seu uso exige cuidados técnicos específicos. Embora a

operação das impressoras seja relativamente simples, a obtenção de peças metálicas com qualidade estrutural e propriedades mecânicas adequadas depende do controle rigoroso de parâmetros ao longo de todas as etapas do processo.

Segundo Bait-Mansour et al. (2019), a orientação e o preenchimento influenciam diretamente na retração e nas propriedades mecânicas das peças em MFFF. Peças impressas na direção Z, por exemplo, tendem a apresentar maiores índices de retração em comparação às impressas nas direções X e Y, devido à forma como as camadas são depositadas e à coalescência das partículas durante a sinterização. Além disso, fatores como o percentual de preenchimento interno impactam diretamente a densidade da peça verde, o que, por sua vez, determina o grau de compactação necessário na etapa de sinterização. Quanto menor a densidade inicial, maior será a retração volumétrica esperada.

Estudos complementam informações a respeito dessa compactação, fatores como orientação de impressão, espessura de camada e número de perímetros exercem influência direta sobre a porosidade, aderência entre camadas e compactação do material, impactando a resistência final da peça (SOUZA et al., 2023; CONDRUZ et al., 2018). As etapas térmicas seguintes de debinding e sinterização também devem seguir perfis de temperatura cuidadosamente definidos, uma vez que variações mínimas podem gerar falhas como delaminação, porosidade excessiva ou colapso dimensional (DE LIMA et al., 2021). A literatura técnica reforça que a robustez do produto final não é determinada unicamente pela impressora ou pelo material, mas pela sinergia entre parâmetros de impressão, preparo térmico e condições de manuseio ao longo do ciclo de fabricação (PETERSMANN et al., 2022).

Fatores como a temperatura do extrusor, a velocidade de impressão, a aderência à base de construção e a temperatura da mesa influenciam diretamente na qualidade da peça ainda na fase de deposição do material. Além disso, há os cuidados adicionais necessários devido aos dois processos subsequentes de tratamento. O *debinding*, responsável pela remoção do ligante polimérico, demanda condições controladas, variáveis como taxa de aquecimento e o uso de agentes específicos, como o ácido oxálico. A sinterização requer uma atmosfera apropriada e temperaturas compatíveis com o material, a fim de promover a coalescência das

partículas metálicas por difusão sólida, reduzindo a porosidade e assegurando a integridade estrutural da peça final. O controle integrado desses parâmetros é essencial para assegurar a qualidade geométrica e funcional das peças obtidas por MFFF (LOTFIZAREIA et al., 2024; KUMAR; VELMURUGAN, 2024).

A seguir a tabela 1 faz uma breve comparação de características entre os tipos de manufaturas, sendo eles MFFF e SLM

Tabela 1 – Comparação de Tipos de Manufatura

Características	MFFF	SLM
Fonte de energia	Aquecimento por extrusora (durante impressão da peça)	Laser de alta potência
Material	Filamento polimérico com pó metálico	Pó metálico solto
Atmosfera	Inerte ou redutora (durante sinterização)	Inerte
Etapas Adicionais	<i>Debinding</i> + Sinterização	Pós processamento térmico (opcional)
Densidade	94-98%	>99%
Precisão dimensional	Moderada, com retração	Alta
Custo do equipamento	Moderado	Muito Alto
Aplicações	Protótipos funcionais, ferramentas leves e pequenos componentes	Componentes estruturais de alta precisão

Fonte: Adaptado de Costa et al. (2023); Forward AM (2022);

Gong et al. (2019); Kumar e Velmurugan (2024); BASF (2023a).

2.3 Aplicação da Tecnologia MFFF via RAISE 3D Metal Fuse

A tecnologia MFFF pode ser empregada por vários fornecedores diferentes. A aplicação desse processo feita pela RAISE 3D é realizada com o desenvolvimento da linha de filamento Ultrafuse® 316L, essa opção pode atender às

demandas industriais e acadêmicas com soluções eficientes e padronizadas na produção de peças metálicas.

O uso dessa técnica tem tido crescente adoção na indústria de manufatura e é caracterizada por sua acessibilidade, segurança operacional e custo reduzido, sendo indicado para prototipagem funcional, desenvolvimento de produtos e fabricação de pequenas séries (SANTOS et al., 2021).

A fabricante RAISE 3D oferece a linha metal fuse, que conta com um sistema integrado e documentado para a fabricação de peças metálicas, esse material suporte contribui e viabiliza a produção de peças metálicas por meio de impressoras 3D utilizando filamentos constituídos por ligantes carregados com partículas metálicas.

2.3.1 Filamentos

O filamento metálico é composto por partículas metálicas finas encapsuladas em uma matriz polimérica termoplástica. Um exemplo das opções utilizadas é o Ultrafuse® 316L, da BASF, esse material é fornecido em bobinas e pode ser processado em impressoras compatíveis com extrusão de filamentos técnicos.

O sistema MetalFuse da Raise3D, por exemplo, foi desenvolvido para utilizar filamentos desta categoria. Os dois filamentos indicados para a máquina de impressão utilizada neste sistema são:

- Ultrafuse® 316L (Aço Inoxidável)
- Ultrafuse® 17-4 PH (Aço Inoxidável)

2.3.2 Impressão da peça verde

A impressão é realizada através do aquecimento do filamento, e posteriormente com sua deposição camada a camada nas impressoras 3D adequadas ao processo MFFF. O perfil de temperatura é ajustado para o filamento com compósito metálico e o modelo tridimensional das peças é convertido em instruções de coordenadas para a máquina, considerando parâmetros como

orientação, espessura de camada, preenchimento e margens de retração (COSTA et al., 2023). A peça resultante, dentro desse sistema recebe o nome de peça verde ou *green part* e ainda contém uma fração polimérica significativa.

2.3.3 Remoção dos ligantes (*debinding*)

Após a impressão, a peça é submetida ao processo de debinding, que remove a matriz polimérica, tornando-a porosa e frágil. No caso do filamento Ultrafuse® 316L, o procedimento adotado é o *debinding* catalítico, realizado com uma solução de ácido oxálico anidro (1 parte em massa) com álcool isopropílico 99,8% (2,35 partes em massa) que promove a decomposição química do ligante primário por meio de aquecimento progressivo.

O ciclo térmico típico é conduzido de forma controlada, com temperaturas crescentes até aproximadamente 150 °C, mantendo-se em patamar térmico por tempo suficiente para permitir a remoção gradual dos componentes desejados. Este ciclo pode ser observado nas seguintes etapas:

1. Aquecimento inicial controlado:

Durante essa fase, o objetivo é iniciar o aquecimento gradual da peça verde, elevando sua temperatura de forma lenta e uniforme até atingir a faixa operacional do catalisador. A taxa de aquecimento controlada fica geralmente entre 1 °C/min e 3 °C/min, adoção desse parâmetro é essencial para evitar a geração de tensões internas ou deformações prematuras. Essa etapa também promove a mobilização inicial de vapores e umidade residual presentes no interior da matriz polimérica.

2. Remoção do Ligante Primário:

Tendo a temperatura estabilizada entre 110 °C e 150 °C, inicia-se a introdução do agente, neste caso o vapor de ácido oxálico. O vapor promove a quebra das cadeias poliméricas do ligante primário, convertendo o material em subprodutos voláteis que escapam da peça por difusão. Essa etapa é crítica,

pois uma remoção muito rápida pode levar à formação de poros internos descontrolados, bolhas ou trincas. A geometria da peça, orientação de impressão e densidade de preenchimento influenciam diretamente na eficiência dessa fase.

3. Estabilização e formação da peça final:

Essa fase final de estabilização térmica ou pós-*debinding* é onde ocorre a eliminação de resíduos remanescentes do ligante, traços de carbono ou gases aprisionados. A peça é mantida por um período adicional em atmosfera inerte ou oxidante moderada a temperaturas entre 100 °C e 120 °C. Após a finalização há presente uma etapa de lavagem, ela é executada com o intuito de eliminar resíduos de quaisquer ácidos remanescentes que possam estar presente nas amostras. Todos esses parâmetros são registrados pelo software do forno durante o processo, sendo possível extrair para um arquivo no final. Essa etapa garante melhores condições para o início da sinterização e contribui para a uniformidade da densificação posterior.

A determinação da taxa de debinding é o principal indicador avaliativo com relação à eficácia da remoção do ligante polimérico nas peças produzidas por MFFF. A fórmula abaixo ilustra esse cálculo e apresenta o registro visual da pesagem das amostras antes e após o processo, evidenciando a diferença de massa resultante da extração do material.

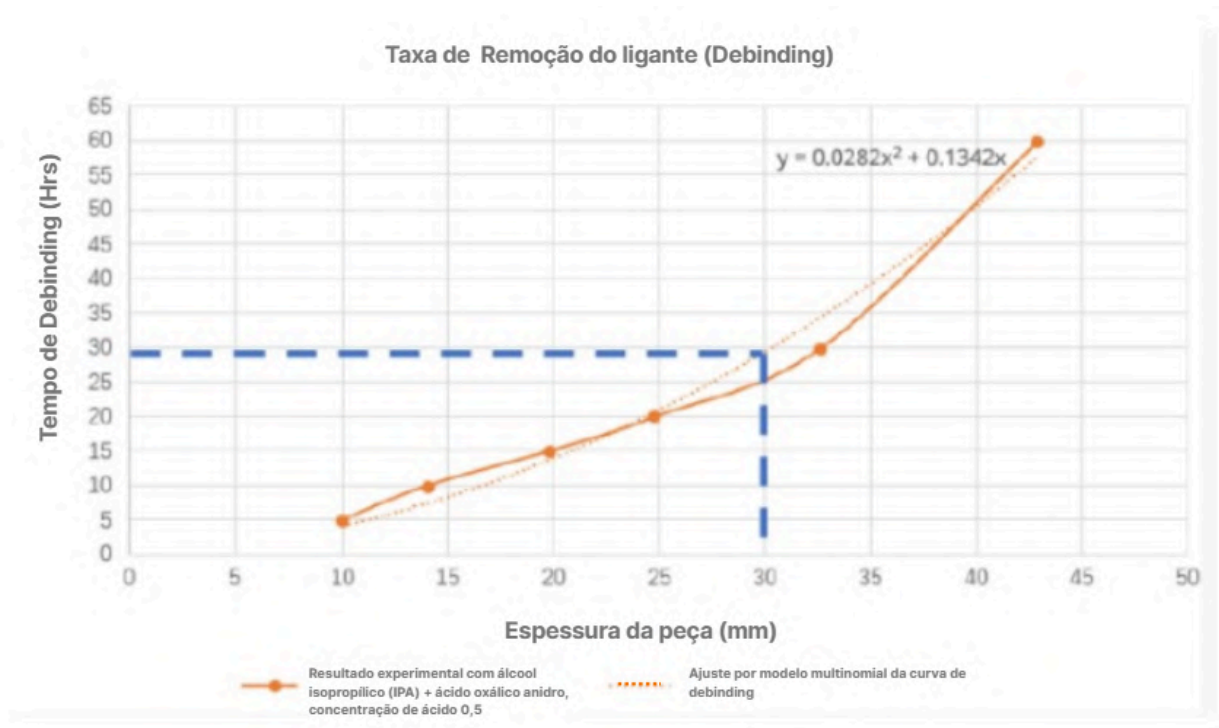
$$Taxa\ de\ debinding = \left(\frac{Peso\ antes\ do\ debinding - Peso\ depois\ do\ debinding}{Peso\ antes\ do\ debinding} \right) * 100 \quad (1)$$

A equação utilizada para calcular a taxa de debinding baseia-se na razão entre a perda de massa da peça e seu peso inicial antes do processo. O padrão recomendado pela BASF para o material Ultrafuse 316L é uma taxa mínima de *debinding* de 10,1%, enquanto o valor para o Ultrafuse 17-4PH deve ser superior a 10,6%.

Diversos estudos sugerem que geometrias esbeltas ou com variações abruptas de seção estão mais propensas a falhas por colapso ou deformações durante essa fase. Por conta desse fator, a utilização de simulações para prever zonas críticas, assim como a aplicação de suportes integrados ao projeto de impressão, configura-se como uma estratégia recomendada para mitigar riscos (LOTFIZAREIA et al., 2024).

As fórmulas utilizadas para a determinação do tempo necessário de debinding levam em conta o gráfico (figura 1) disponibilizado pela Raise 3D

Figura 1 – Curva da taxa de debinding



Fonte: Adaptado de Manual After Sale RAISE 3D (2023).

$$Y = 0,0282x^2 + 0,1342x \quad (2)$$

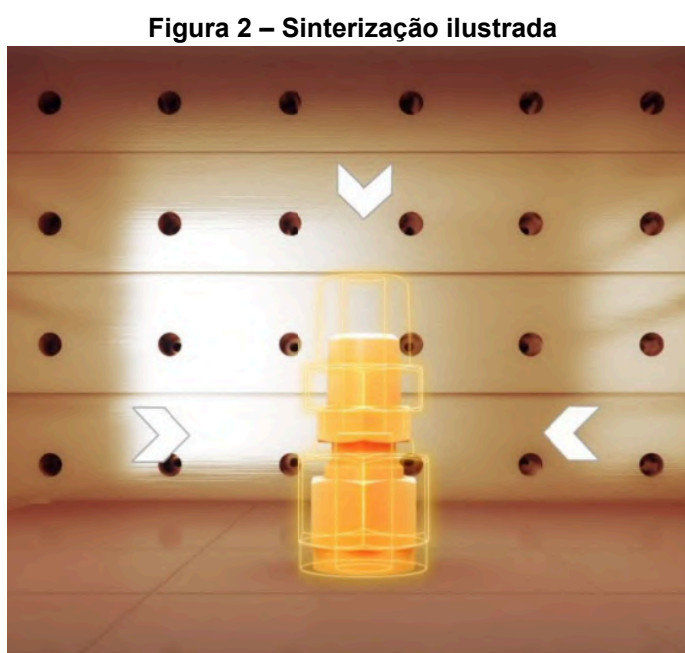
Onde Y = tempo de *debinding* e X = espessura da peça em mm.

Ao término da extração do ligante, a peça passa a ser denominada como peça marrom ou *brown part*. Nessa condição, o componente possui sua geometria estruturalmente frágil, sendo constituído majoritariamente por pó metálico com uma rede de poros interconectados (FORWARD AM, 2022).

No final dessa etapa, a peça encontra-se com propriedades mecânicas significativamente reduzidas, sendo necessário cuidado em sua manipulação até a etapa seguinte, a sinterização, pois qualquer deformação ou falhas relacionadas ao manuseio da peça podem comprometer diretamente as dimensões finais e o desempenho estrutural do componente.

2.3.4 Sinterização

A sinterização é realizada em forno de alta temperatura, próximo ao ponto de fusão do aço inoxidável, de aproximadamente 1380 °C, em atmosfera redutora ou inerte (argônio e hidrogênio), consolidando a peça por difusão atômica (KUMAR; VELMURUGAN, 2024). A seguir a figura 2 demonstra a ilustração da redução observada durante a sinterização, com relação ao ciclo térmico, este pode durar mais de 24 horas, com retrações volumétricas de 14% a 22% (FORWARD AM, 2022).



Fonte: Manual After Sale RAISE 3D (2023).

Assim como na etapa anterior de debinding, o ciclo da sinterização também é conduzido de forma controlada, com o objetivo de consolidar as partículas metálicas remanescentes e conferir resistência mecânica, densidade e estabilidade dimensional ao componente final. A sinterização ocorre em forno especializado, sob controle de atmosfera e temperatura, e pode ser dividida em fases, descritas a seguir:

1. Pré-aquecimento:

Nesta fase inicial, a *brown part* é aquecida de forma controlada até uma faixa de aproximadamente 400 °C a 600 °C (Desvolatilização e Desoxidação). Aqui é onde ocorre a desoxidação parcial da superfície das partículas metálicas, preparando o material para a difusão sólida subsequente. A velocidade de aquecimento nesta etapa é gradual, a fim de evitar deformações térmicas ou o colapso precoce da estrutura porosa.

2. Aquecimento até a zona de sinterização

Nesta etapa intermediária, a temperatura é elevada de forma contínua até atingir a faixa de sinterização ativa, geralmente entre 1300 °C e 1380 °C para o aço inoxidável 316L. Esse aquecimento controlado promove o início da difusão atômica entre as partículas metálicas, dando início à redução dos poros internos. A uniformidade do gradiente térmico é essencial para garantir densificação homogênea ao longo da peça, especialmente em regiões de maior massa.

3. Platô de sinterização:

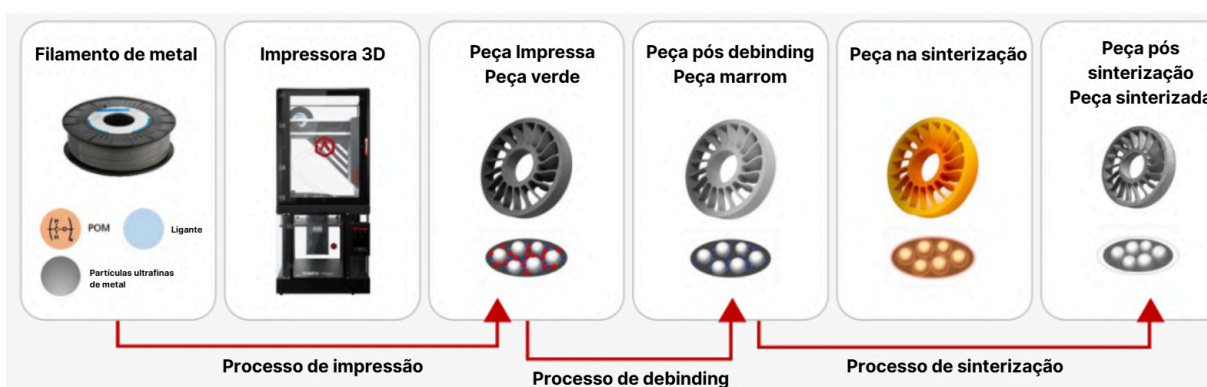
Uma vez atingida a temperatura de sinterização, o forno é mantido por um período de 2 a 6 horas, dependendo do tamanho da peça e do grau de densidade desejado. Durante esse platô térmico, ocorre a etapa mais intensa de difusão e consolidação da microestrutura. As partículas metálicas se fundem parcialmente nos contornos de grão, os poros são eliminados ou reduzidos significativamente, e a peça adquire suas propriedades mecânicas finais, como resistência à tração, dureza e rigidez. A densidade final pode alcançar valores acima de 95% da densidade teórica do material (BASF, 2023a).

4. Resfriamento controlado:

Finalizada a sinterização, a peça é submetida a um resfriamento gradual e controlado, em atmosfera inerte (argônio) ou redutora (hidrogênio), a fim de evitar a oxidação superficial e minimizar tensões térmicas internas. A etapa de resfriamento é essencial para reduzir deformações, trincas ou alterações indesejadas na microestrutura

A figura 3 mostra o processo de impressão visto de forma completa, desde o filamento até a sinterização:

Figura 3 – Processo completo de impressão MFFF



Fonte: Adaptado de Manual After Sale RAISE3D (2023).

2.3.5 Acabamentos

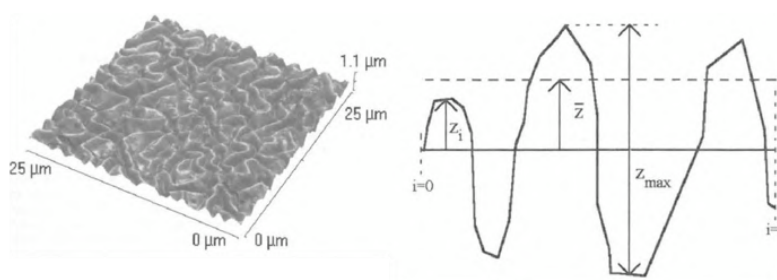
Após a sinterização, as peças metálicas obtidas por *Metal Fused Filament Fabrication* (MFFF) apresentam, frequentemente, superfícies com níveis elevados de aspereza, causados principalmente pelo acúmulo de material entre camadas, retrações não uniformes, queima parcial de ligante e oxidação localizada. Tais irregularidades superficiais podem comprometer o desempenho funcional da peça em aplicações que exigem bom acoplamento mecânico, resistência ao atrito ou vedação, além de prejudicar a estética do componente final (GONG et al., 2019; LOTFIZAREIA et al., 2024).

Peças sinterizadas podem passar por usinagem, polimento ou tratamentos térmicos em razão da rugosidade apresentada após a sinterização.

Propriedades como dureza, resistência à tração e alongamento são influenciadas pela orientação de impressão e taxa de densificação.

A rugosidade média típica de peças sinterizadas por MFFF pode variar entre 10 a 30 μm , dependendo da orientação de impressão e dos parâmetros utilizados, conforme figura 4 a seguir. Esses valores foram observados principalmente em superfícies verticais e inclinadas, onde o efeito de escada e a variação de adesão entre camadas são mais pronunciados (GALATI; MINETOLA, 2019). Por essa razão, a etapa de acabamento superficial torna-se necessária e pode envolver diferentes técnicas, como Lixamento, Jateamento e Eletropolimento.

Figura 4 – Rugosidade de superfície



Fonte: (GALATI; MINETOLA, 2019).

2.3.6 Contração

A avaliação dimensional deve ser aplicada durante as etapas do processo a fim de assegurar a geometria de peças produzidas por MA. No processo MFFF, essa verificação é aplicada devido à ocorrência de variações dimensionais, principalmente após as etapas de debinding e sinterização, que resultam em retrações volumétricas e possíveis deformações.

A retração dimensional pode ultrapassar 20%, com valores que variam de acordo com a orientação de impressão, a densidade da peça verde e a temperatura de sinterização (BOSCHETTO LUANA BOTTINI, 2022).

Outros artigos complementam essa análise trazendo dados sobre a variação dimensional nas peças produzidas por MFFF. Segundo Bait-Mansour et al.

(2019), a retração pode atingir valores médios de 17% no eixo Z e 13% no plano XY, com variações influenciadas diretamente pela orientação da impressão e densidade da peça verde. Já De Lima et al. (2021) destaca que essas contrações podem ser ainda mais críticas quando combinadas com parâmetros inadequados de sinterização, afetando a precisão dimensional final das peças. Ambos os estudos reforçam que o eixo Z tende a apresentar maior retração devido ao acúmulo de camadas e à natureza anisotrópica do processo.

Por esses fatores, a avaliação é aplicada, a fim de prever variações e ter um controle de maior qualidade das características desejadas das peças durante sua fabricação.

2.3.7 Porosidade e Densidade

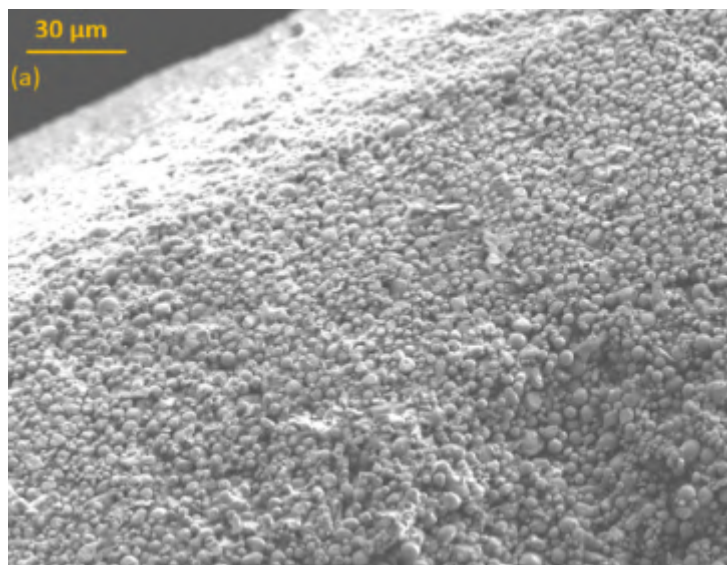
A porosidade e a densidade são parâmetros utilizados na avaliação de materiais metálicos obtidos por manufatura aditiva. A densidade de um corpo serve como indicador direto da compactação do material após o ciclo térmico, enquanto a porosidade representa o volume de vazios presentes em sua microestrutura, indicando integridade e qualidade do acabamento, assim como as propriedades mecânicas e estruturais do componente final.

A redução de porosidade está diretamente associada ao grau de coalescência entre partículas metálicas, a densificação eficiente é um objetivo central nas etapas térmicas do processo, sendo que valores finais de densidade superiores a 95% são buscados para aplicações estruturais (PETERSMANN et al., 2022).

Métodos como análise de densidade geométrica e a aplicação da equação de densidade relativa são amplamente utilizados para estimativas experimentais, enquanto técnicas mais avançadas como microtomografia computadorizada auxiliam na avaliação tridimensional da distribuição de poros (COSTA et al., 2023).

A figura 5 ilustra a porosidade observada em uma peça fabricada por MFFF:

Figura 5 – Porosidade observados em metais fabricados com MFFF



Fonte: Alyammahi et al. (2023).

A presença de poros afeta ainda outras propriedades, como a condutividade térmica e a resistência à corrosão, sendo, portanto, um fator determinante na qualificação do desempenho funcional do material. Dessa forma, a análise integrada de porosidade e densidade auxilia na compreensão do comportamento mecânico das peças produzidas por manufatura aditiva metálica.

2.4 Aço 316L

O aço inoxidável 316L é uma liga austenítica de alto desempenho amplamente utilizada na indústria devido à sua excelente resistência à corrosão, boa tenacidade e elevada ductilidade.

No estado sólido, este aço apresenta microestrutura austenítica estável à temperatura ambiente, caracterizada por grãos equiaxiais com elevada ductilidade e resistência ao impacto. Sua dureza, resistência à tração e alongamento podem variar de acordo com os tratamentos térmicos aplicados, com valores de dureza na faixa de 150 a 200 HV (Vickers) e limite de resistência à tração em torno de 485–620 MPa.

Este aço possui diversas aplicações: implantes biomédicos, processamento químico, processamento de alimentos, fotografia, indústria farmacêutica, acabamento têxtil e componentes externos em ambientes marinhos.

A tabela abaixo apresenta os dados e propriedades mecânicas observadas no material:

Tabela 2 – Propriedades aço 316L em barra

Características	Métrica
Densidade	8,00 g/cm ³
Dureza, Brinell	149
Dureza, Rockwell B	80
Dureza, Vickers	155
Resistência à tração (máxima)	515 MPa
Resistência ao escoamento	205 MPa
Alongamento na ruptura	60 %
Módulo de elasticidade	193 GPa
Impacto Izod	150 J
Impacto Charpy	103 J

Fonte: Adaptado de Matweb DataSheet AISI Type 316L Stainless Steel, annealed bar (2025).

2.5 Filamento de Aço 316L

No que diz respeito do aço 316L aplicado na manufatura aditiva por filamento fundido com metal, o material se destaca por permitir a produção de peças metálicas funcionais com propriedades mecânicas satisfatórias após as etapas de sinterização, tornando-se uma escolha robusta para peças e protótipos estruturais.

Com o intuito de assegurar a correta aplicação do filamento Ultrafuse 316L no processo, é essencial observar as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante. Essas informações englobam parâmetros como diâmetro, tolerância

dimensional, circularidade, comprimento e peso da bobina, que impactam diretamente a estabilidade da extrusão e a confiabilidade do processo de impressão.

A seguir, as Tabelas 3 e 4 apresentam as principais características técnicas do filamento 316L utilizadas neste trabalho:

Tabela 3 – Especificações técnicas do filamento 316L

Propriedade	Valor
Diâmetro do filamento	1,75 mm
Tolerância	$\pm 0,05$ mm
Circularidade	$\pm 0,05$ mm
Raio de curvatura	5 ± 1 mm
Comprimento da bobina	250 m
Peso da bobina	3 kg

Fonte: Adaptado de Manual After Sale RAISE3D (2023);

Tabela 4 – Fatores de Compensação de Encolhimento do 316L

Direção de impressão	Valor
X e Y	119%
Z	122%

Fonte: Adaptado de Manual After Sale RAISE3D (2023);

A Tabela 5 apresenta os principais parâmetros mecânicos que devem ser obtidos após a sinterização, incluindo resistência à tração, limite de escoamento, alongamento na ruptura, resistência ao impacto e dureza Vickers, conforme especificado pelas normas DIN e ISO.

Tabela 5 – Propriedades Mecânicas Pós-Sinterização do Aço 316L

Propriedade	Norma	XY	ZX
Densidade	ISO 1183-1	7,85 g/cm ³	—
Resistência à tração	DIN EN ISO 6892-1	561 MPa	521 MPa
Limite de escoamento (Rp0,2%)	DIN EN ISO 6892-1	251 MPa	234 MPa
Alongamento na ruptura	DIN EN ISO 6892-1	53%	36%
Resistência ao impacto (V-notch)	DIN ISO 148-1	111 J/cm ²	—
Dureza Vickers (HV10)	DIN ISO 148-1	128	128

Fonte: Adaptado de Manual After Sale RAISE3D (2023);

2.6 Ensaio de compressão

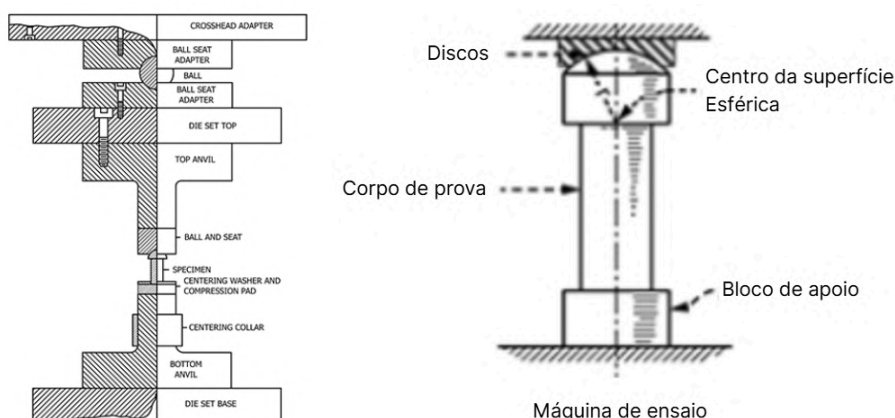
A norma ASTM E9 estabelece os procedimentos e requisitos técnicos para a execução desses ensaios à temperatura ambiente, assegurando resultados comparáveis entre diferentes laboratórios e aplicações industriais.

Para corpos de prova cilíndricos sólidos, a norma especifica uma série de requisitos fundamentais. Um dos principais requisitos está relacionado ao alinhamento axial da carga. A determinação é de que o eixo da força compressiva deve coincidir com o eixo longitudinal do corpo de prova, minimizando assim a introdução de tensões laterais que comprometem a interpretação dos resultados (ASTM E9, 2025, p. 5).

Outro ponto central da norma diz respeito à taxa de deformação aplicada durante o ensaio, a qual deve ser suficientemente lenta para permitir a coleta dos dados de carga e deslocamento, mas também adequada para evitar a flambagem prematura.

A figura 6 a seguir mostra o posicionamento padronizado para o corpo de prova durante a realização do ensaio:

Figura 6 – Corpo de prova posicionado no teste de compressão.



Fonte: Adaptado de ASTM E9-19 (2025).

A determinação é de que as superfícies do corpo de prova sejam de faces planas e paralelas, com tolerância mínima quanto à inclinação e rugosidade, assegurando a correta distribuição da carga compressiva (ASTM E9, 2025, p. 6). Além disso, deve-se realizar o ensaio sem lubrificação entre os platôs e a amostra.

A medição da deformação pode ser realizada por meio de extensômetros de contato direto ou sistemas ópticos, segundo critérios estabelecidos na norma ASTM E83. Estes critérios padronizam os procedimentos de verificação da exatidão desses dispositivos, a análise e coleta dos dados de deformação são os fatores responsáveis por fornecer o módulo de elasticidade e do limite de escoamento, especialmente em materiais como o aço inoxidável 316L, cuja resposta elástica é sensível a variações geométricas.

A tabela 6 mostra a relação de comprimento por diâmetro estabelecida por norma com as indicações para tamanho de corpo de prova:

Tabela 6 – Normas do corpo de prova para ensaios de compressão.

Categoria	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Relação C/D
Short	30	25	0,8
Short	13	25	2
Medium	13	38	3
Medium	20	60	3
Medium	25	75	3
Medium	30	85	3
Long	20	160	8
Long	32	320	10

Fonte: Adaptado de (ASTM E9, 2025).

2.7 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza são aplicados durante as etapas de caracterização mecânica dos materiais, fornecendo informações sobre resistência à deformação localizada. Para garantir a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados, os métodos devem seguir normas padronizadas, no caso do ensaio Vickers, uma das metodologias mais empregadas em pesquisas com aços inoxidáveis, aplica-se a norma ASTM E384, que especifica os requisitos para medições de microdureza utilizando indentadores piramidais sob cargas controladas (ASTM, 2020).

Complementarmente, a norma ASTM E92 também aborda os procedimentos para ensaios de dureza Vickers em metais, detalhando aspectos como tempo de aplicação da carga, preparação da amostra e critérios de medição das diagonais da impressão (ASTM, 2021). Essas normas são amplamente reconhecidas e adotadas em estudos experimentais que envolvem a análise da dureza de peças obtidas por manufatura aditiva (SANTOS et al., 2021).

A dureza Vickers, conforme descrito por Condruz et al. (2018), é um método eficaz para caracterizar a homogeneidade e integridade estrutural de peças

sinterizadas, sendo particularmente sensível à presença de poros e defeitos internos comuns em processos de fabricação aditiva.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada durante este trabalho foi estabelecida com base em diretrizes técnicas fornecidas pelo fabricante do filamento e dos equipamentos empregados, além de referências consolidadas na literatura científica relacionada à manufatura aditiva metálica. O principal objetivo foi garantir a padronização dos parâmetros do processo e a reprodutibilidade dos resultados alcançados.

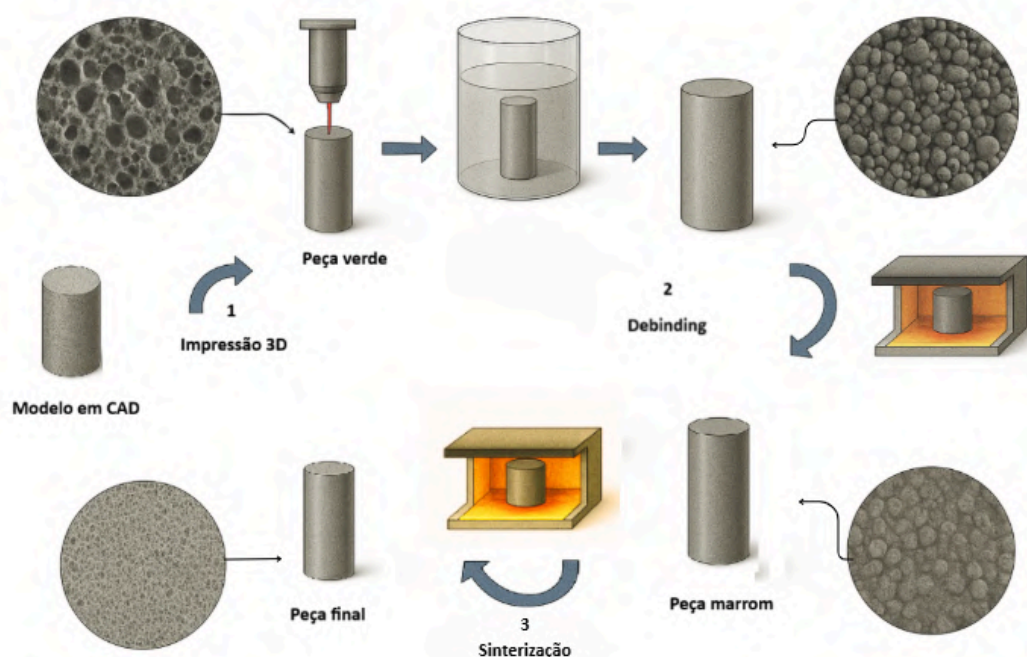
3.1 Sistema MFFF

O material utilizado foi o filamento Ultrafuse 316L, da BASF Forward AM, que consiste em partículas de aço inoxidável 316L integradas a uma matriz polimérica. Este insumo foi desenvolvido especificamente para aplicações no processo de MFFF, permitindo a criação de peças metálicas através da extrusão convencional de filamento, seguida por dois tratamentos térmicos consecutivos: o debinding e a sinterização.

A seleção deste material é feita com base na compatibilidade com o sistema Raise3D, além da vasta documentação técnica fornecida pelo fabricante, essa escolha facilita a comparação e aplicabilidade dos parâmetros de impressão e de condições térmicas nas fases seguintes (FORWARD AM, 2022; BASF, 2023a).

O fluxo de fabricação desse processo (Figura 7) pode ser dividido em quatro etapas principais, sendo elas: (1) impressão da peça verde, (2) remoção dos ligantes (debinding), (3) sinterização e (4) acabamento (GONG et al., 2019; BASF, 2023b).

Figura 7 – Etapas do processo MFFF



Fonte: Adaptado de (JACOB et al., 2024).

Todas as etapas do processo foram conduzidas por meio da plataforma integrada MetalFuse Raise3D, composta pelos três equipamentos essenciais ao ciclo do MFFF presentes figura 8 a seguir:

Figura 8 – Equipamentos utilizados no processo de MFFF



Fonte: RAISE 3D (2023).

A respeito das máquinas utilizadas no sistema de MFFF, cada uma delas detém os seguintes papéis:

1. Impressora Raise3D Forge1: Utilizada para a fabricação das peças no estado verde, ainda contendo o ligante polimérico e sem resistência mecânica final. O processo de fatiamento foi realizado no *software* IdeaMaker, com parâmetros de impressão definidos conforme as recomendações técnicas para o Ultrafuse 316L.
2. Estação de Debinding Raise3D D200-E: É responsável pela remoção catalítica do ligante, em atmosfera de ácido oxálico aquecido. O ciclo térmico foi controlado em múltiplas fases, visando garantir a integridade geométrica das peças e evitar colapsos estruturais.
3. Estação de Sinterização Raise3D S200-C: Utilizada para a coalescência das partículas metálicas e obtenção da peça final densa. O perfil térmico aplicado atinge temperaturas superiores a 1350 °C, com patamar prolongado de sinterização e resfriamento controlado sob atmosfera inerte.

A figura 9 mostra o estado em que cada peça se encontra após cada etapa do processo:

Figura 9 – Etapas do processo visto nas peças de compressão



Fonte: Do autor (2025).

3.2 Filamento Basf 316L

Neste trabalho, foram empregados os filamentos metálicos Ultrafuse 316L, fornecidos pela BASF 3D Printing Solutions. A escolha por esse material foi motivada pela sua compatibilidade com a impressora Raise3D Forge1, além da ampla documentação técnica disponibilizada pelo fabricante, que orientou a definição dos parâmetros operacionais adotados na pesquisa (FORWARDAM, 2024). A figura 10 a seguir ilustra o filamento utilizado:

Figura 10 – Filamento BASF



Fonte: Manual After Sale RAISE 3D (2023).

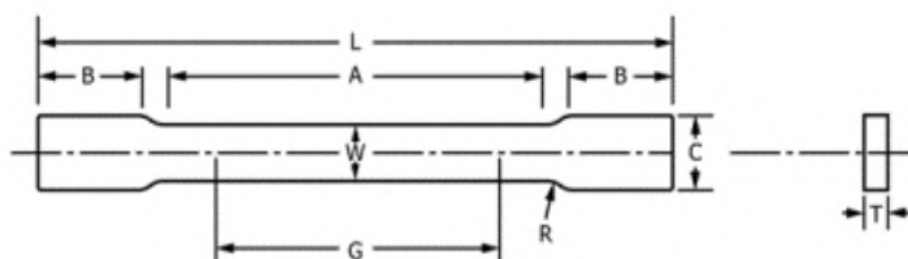
3.3 Geometria para estudo

As peças impressas no presente estudo foram planejadas de forma estratégica para atender simultaneamente a dois projetos de pesquisa distintos, otimizando recursos laboratoriais, tempo de máquina e consumo de material. Essa abordagem possibilitou a consolidação das peças por etapas térmicas posteriores de *debinding* e sinterização. Durante as etapas do processo, duas geometrias diferentes serão vistas, uma focada em ensaios mecânicos (corpos cilíndricos) e outra focada em avaliações dimensionais (geometria de diâmetro maior), sendo que os objetivos delas são complementares.

3.3.1 Geometria de avaliação de tração

Um dos primeiros corpos de prova cogitado foi o A370-15 (ISO 6892-1:2020) destinado a testes de tração, suas dimensões e especificações se encontram na figura 11, a tabela 7 apresentam as variações para cada cota de acordo com a norma seguida.

Figura 11 – Corpo de prova de tração



Fonte: Do autor (2025).

Tabela 7 – Dimensões de Corpos de Prova Segundo Diferentes Normas

Norma	A (mm)	B (mm)	C (mm)	G (mm)	L (mm)	R (mm)	T (mm)	W (mm)	Gasto material (m)
A370-15 (PADRÃO)	60	50	20	$50 \pm 0,10$	200	13	25	$12,5 \pm 0,25$	35,99
A370-15 (REDUZIDO)	32	32	10	$25 \pm 0,08$	100	6	6	$6,25 \pm 0,05$	3,73
ASTM E8M (PADRÃO)	57	50	20	$50 \pm 0,1$	200	12,5	19	$12,5 \pm 0,2$	27,3
ASTM E8M (REDUZIDO)	32	32	10	$25 \pm 0,1$	100	6	6	$6 \pm 0,1$	3,67

Fonte: Do autor (2025).

Porém, nos testes de impressão, esse corpo de provas obteve falhas de empenamento (Figura 12). Esses primeiros testes contribuíram para a decisão de imprimir somente um tipo de corpo de prova, sendo este o de compressão.

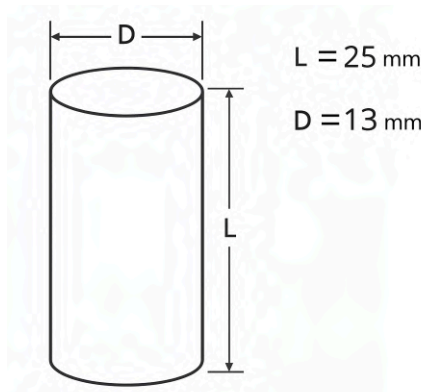
Figura 12 – Corpo de prova de tração



Fonte: Do autor (2025).

3.3.2 Geometria de avaliação de compressão

A geometria adotada neste trabalho foi escolhida para ensaios de compressão, utilizando corpos de prova cilíndricos, conforme especificado pela norma ASTM E9 – *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature* (ASTM, 2021). Esses utilizados para testes mecânicos por meio de ensaios de compressão. Foram produzidas 48 unidades desta geometria (Figura 13).

Figura 13 – Corpo de Prova utilizado como referência

Fonte: Do autor (2025).

3.4 Parâmetros de impressão das peças

Durante a definição da quantidade de parâmetros a se variar na estratégia de impressão das amostras, foi utilizado um fatorial completo de 2^3 com o objetivo de explorar os efeitos combinados de variáveis críticas no processo de impressão e sinterização. Os fatores controlados foram: espessura da camada (0,12 mm ou 0,24 mm), perímetro externo (2 ou 3) e porcentagem de preenchimento (50% ou 100%).

Essa abordagem foi utilizada para avaliar a influência direta dos parâmetros sobre propriedades físicas e mecânicas, como massa final, densidade, dureza e integridade superficial. A aplicação da estrutura de fatorial permitiu obter uma análise multifatorial eficiente, otimizando o número de experimentos necessários

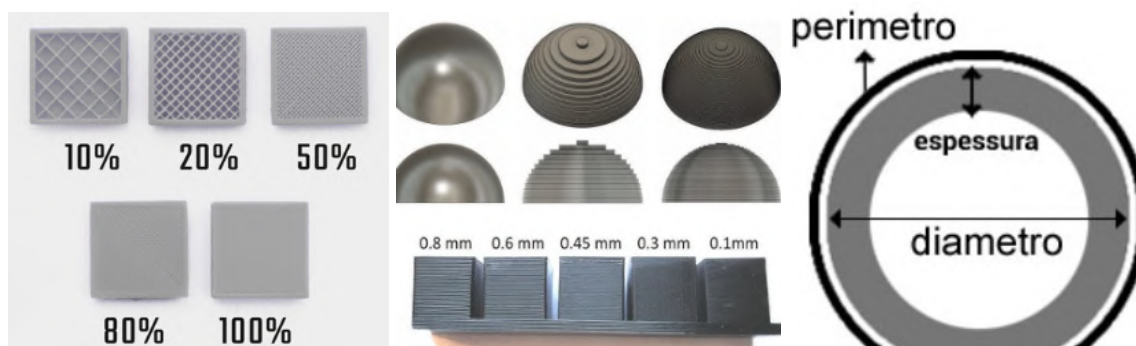
Tabela 8 – Parâmetros de cada grupo de peças

Grupo	Nomenclatura abreviada	Espessura	Perímetro	% Preenchimento
1	E12-P2-100	0,12	2	100
2	E24-P2-100	0,24	2	100
3	E24-P3-50	0,24	3	50
4	E24-P3-100	0,24	3	100
5	E24-P2-50	0,24	2	50
6	E12-P3-50	0,12	3	50
7	E12-P3-100	0,12	3	100
8	E12-P2-50	0,12	2	50

Fonte: Do autor (2025);

A seguir a figura 14 mostram os exemplos ao aplicar os diferentes níveis de preenchimento interno, espessura de camada e perímetro de revestimento na geometria:

Figura 14 – Corpo de Prova utilizado como referência



Fonte: Do autor (2025).

3.5 Testes preliminares de impressão

A fase inicial da etapa experimental consistiu na calibração e familiarização com o sistema MetalFuse da Raise3D. Neste momento, seguiram-se as diretrizes do fabricante para a execução de ensaios preliminares com geometrias de calibração, como cubos, visando ajustar os parâmetros fundamentais de impressão, como o fluxo de extrusão e a aderência à mesa.

A preparação dos arquivos para a manufatura aditiva, também conhecido como fatiamento, foi conduzida por meio do *software* IdeaMaker for Metal. Desenvolvido pelo mesmo fabricante do equipamento, este software foi selecionado devido à sua total compatibilidade e comunicação com o ecossistema da impressora Raise3D Forge1.

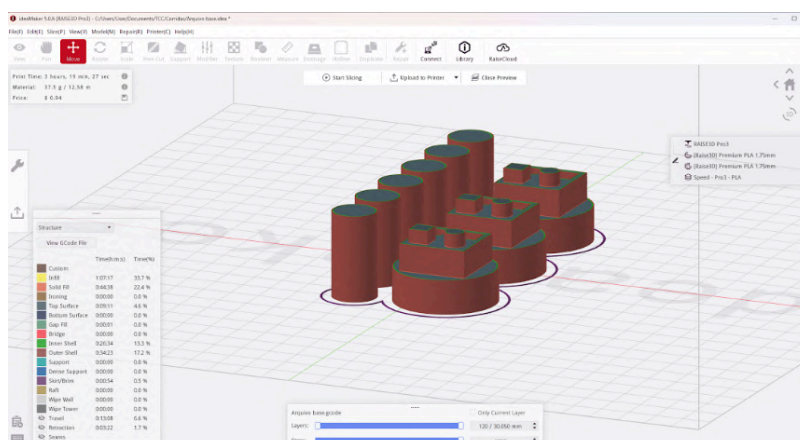
3.6 Impressão dos corpos de prova

O estudo envolveu a impressão de 48 amostras metálicas por meio do processo MFFF. As amostras foram divididas em oito grupos experimentais, sendo que seis corpos de prova foram fabricados para cada grupo, totalizando 48 unidades. Para mitigar os efeitos de retração dimensional esperados nas fases térmicas posteriores de *debinding* e sinterização, todas as geometrias foram previamente escaladas em 120% nos eixos X e Y e 120% no eixo z em relação ao seu tamanho original.

Esse fator de escala é normalmente implementado automaticamente em *softwares* dedicados, como o IdeaMaker for Metal, e visa assegurar que as dimensões finais da peça sinterizada estejam dentro das tolerâncias especificadas.

A figura 15 mostra a visualização completa das peças na mesa:

Figura 15 – Grupo de impressão no Idea Maker



Fonte: Do autor (2025).

3.7 Debinding

A etapa de remoção do ligante (*debinding*) foi conduzida por meio do forno modelo D200-E, com solução de ácido oxálico e álcool isopropílico. A preparação da solução seguiu as recomendações presentes no Manual After Sale, utilizando-se a proporção de 1 parte de ácido oxálico em 2,35 partes de álcool isopropílico (IPA), com o intuito de criar uma solução eficiente na remoção do ligante polimérico.

Quanto às especificações do ácido utilizado, trata-se de ácido oxálico anidro PA. Os frascos adquiridos possuem concentração de 99,9% e densidade de $1,90 \text{ g/cm}^3$, o produto é fornecido em embalagens de 250 g.

Inicialmente, o método adotado exigia o tritramento manual dos cristais sólidos, o que demandou tempo adicional e atenção quanto à homogeneidade da mistura, a Figura 16 mostra o estado inicial do ácido e o estado desejado para se obter a solução.

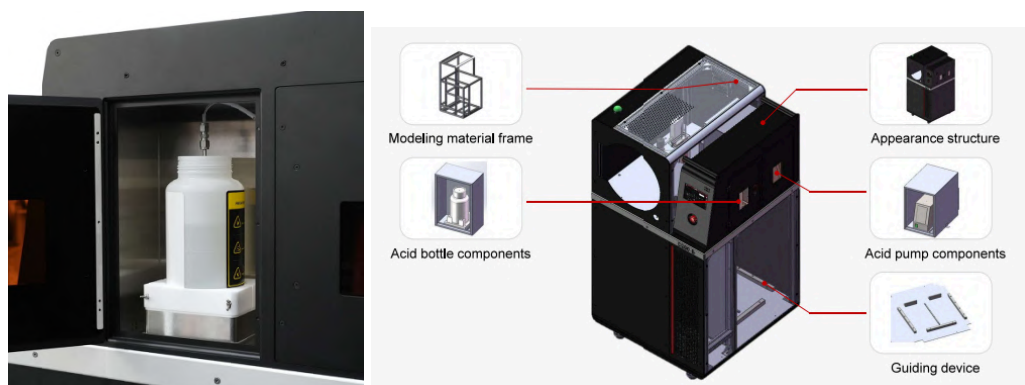
Figura 16 – Aspecto do ácido antes e após trituração



Fonte: Adaptado de RAISE 3D (2023).

Com a solução devidamente preparada, foram realizados testes preliminares do processo de *debinding* em peças destinadas exclusivamente à validação do procedimento. O objetivo dessa etapa foi evitar perdas nos corpos de prova definitivos, considerando o tempo de fabricação e os custos envolvidos na produção das amostras principais. A Figura 17, apresentada a seguir, ilustra o local de acoplamento do recipiente contendo a solução no interior do forno.

Figura 17 – Indicação do compartimento da solução

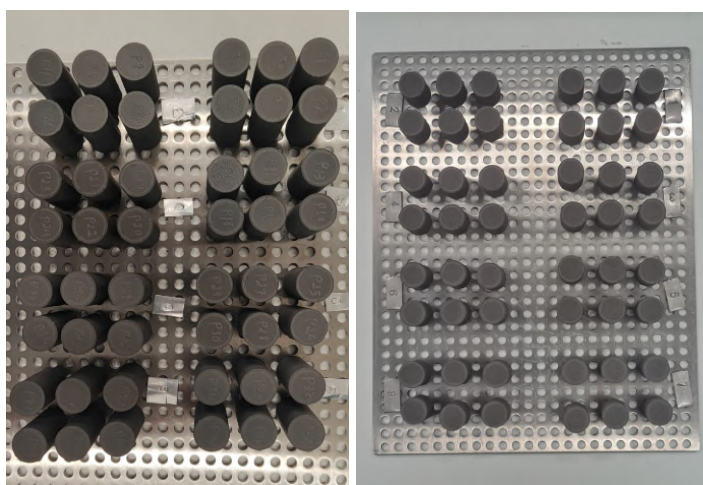


Fonte: Adaptado de RAISE 3D (2023).

Após a conclusão do debinding com as peças de calibração, deu-se início ao tratamento térmico das amostras definitivas pertencentes a ambos os estudos. As peças foram organizadas em três bandejas, respeitando a separação entre os diferentes grupos experimentais. A identificação correta das amostras foi tratada como um aspecto organizacional, sendo adotado o uso de plaquetas metálicas em aço para sinalizar os respectivos grupos de impressão, a fim de evitar confusões ou perdas de rastreabilidade ao longo do processo térmico.

A Figura 18, a seguir, apresenta a configuração inicial de posicionamento das peças no interior do forno.

Figura 18– Posicionamento das peças para debinding



Fonte: Do autor (2025).

As configurações de parâmetros para o processo de *debinding* foram definidas com base nas orientações técnicas do manual “*After Sale*”, conforme ilustrado na Figura 19. Contudo um dos aspectos que sofreu variação foi o tempo de forno, isso acarretou em um tempo de ciclo superior ao necessário para as peças destinadas ao ensaio mecânico.

Isso se deve ao fato de que o *debinding* foi realizado simultaneamente com as peças do estudo dimensional, cujas geometrias maiores exigiam ciclos térmicos mais longos para a completa remoção dos ligantes. No entanto, esse tempo adicional não acarretou prejuízos ao processo químico dos corpos de prova, que permaneceram íntegros e dentro das condições desejadas para o prosseguimento das etapas subsequentes.

Figura 19 – Especificações para Debinding

LOTE316L - DEBINDING							
	Aquecimento da câmara (°C)	Aquecimento do Ácido (°C)	Aquecimento da Entrada (°C)	Fluxo de Entrada (sccm)	Velocidade do Ventilador (rpm)	Fluxo de Ácido (ml/min)	Tempo (min)
Aquecimento	105	150	145	3000	1000	0	60
Preservação	105	150	145	3000	1000	0	30
Debinding	105	150	145	3000	1000	0.5	600
Debinding	105	150	145	3000	1000	0.5	600
Aquecimento	105	150	145	3000	1000	0.5	600
Preservação	105	150	145	3000	1000	0.5	600
Debinding	105	150	145	3000	1000	0.5	600
Debinding	105	150	145	3000	1000	0.5	480
Lavagem	120	160	145	3000	1000	0	90

Fonte: Do autor (2025).

Tendo esses parâmetros inseridos na máquina, as peças foram posicionadas e o processo teve início, conforme ilustra a figura 20:

Figura 20 – Peças no forno de debinding



Fonte: Do autor (2025).

Após a finalização do processo de *debinding*, todas as peças foram pesadas a fim de conferir a taxa de perda de massa. Essa etapa é aplicada para determinar se os valores se encontravam dentro da margem de aproximadamente 10% de perda estabelecida pela RAISE.

3.8 Sinterização

A sinterização representa uma das etapas mais críticas do processo MFFF, nesse estágio, as peças impressas encontram-se em um estado estrutural significativamente mais frágil do que logo após a impressão, devido à ausência completa do ligante e à sua elevada porosidade. Além disso, os materiais presentes no interior do forno, como as placas de grafite utilizadas como suporte, também apresentam fragilidade, o que requer cuidados adicionais no manuseio e posicionamento das amostras. A Figura 21 ilustra o interior do forno modelo S200-C, utilizado na presente pesquisa.

Figura 21 – Compartimentação interna do forno



Fonte: Adaptado de After sale RAISE 3D (2023).

Antes de prosseguir para o processo nas peças, foram realizados testes de aquecimento com o forno vazio, como parte dos procedimentos indicados pela fabricante (figura 22):

Figura 22 – Gráfico de aquecimento forno



Fonte: Do autor (2025).

Os parâmetros de configuração do processo foram seguidos conforme indicação do manual After sale conforme figura 23:

Figura 23 – Etapas do processo de sinterização

LOTE316L - SINTERIZAÇÃO 						
	Modo de Aquecimento	Temperatura (°C)	Tempo (Min)	Tipo de Processo	Fluxo de Gás (Scfh)	Tipo de Gás
Step	Modo por tempo	600	300	Pressão negativa – Debinding	2000	AR
Step	Manter e aguardar	600	90	Neg. pressure Debinding	2000	AR
Step	Modo por tempo	1100	150	Sinterização a vácuo interno	0	AR
Step	Manter e aguardar	1100	30	Sinterização a vácuo interno	0	AR
Step	Modo por tempo	1380	120	Sinterização sob pressão	2500	AR
Step	Manter e aguardar	1380	180	Sinterização sob pressão	2500	AR
Step	Final	80	500	Resfriamento passivo	500	AR

Fonte: Do autor (2025).

3.9 Medidas físicas

Neste trabalho, as avaliações dimensionais foram realizadas ainda na fase anterior ao *debinding*, com o objetivo de registrar as informações iniciais das peças verdes e, posteriormente, compará-las às dimensões finais após a sinterização. Para isso, foram utilizados os seguintes equipamentos do laboratório do Instituto:

- Paquímetro digital;
- Balança digital, para medições de massa;

O modelo do Paquímetro digital utilizado foi da Mitutoyo, suas características são:

- Resolução de 0,01mm

As amostras foram inspecionadas visualmente e submetidas à medição de massa, altura e diâmetro possibilitando o cálculo da densidade e a avaliação dimensional, os valores completos de todas as medições constam nos apêndices A e B. Ensaios de compressão foram conduzidos conforme a norma ASTM E9, permitindo a análise do comportamento mecânico das peças obtidas.

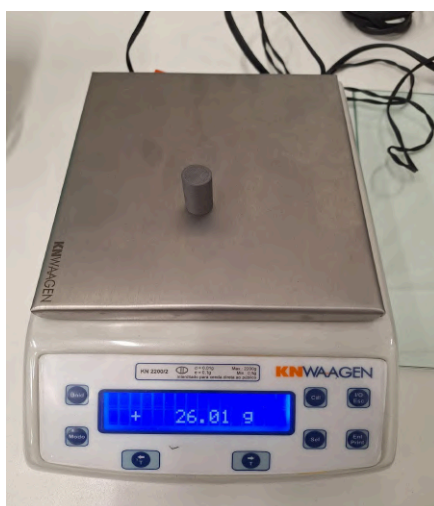
3.9.1 Pesagens

Neste trabalho, as aferições de peso foram realizadas antes e após cada etapa do processo de MFFF. A ordem realizada dessas foi:

1. Pós impressão das peças
2. Pós *Debinding*
3. Pós Sinterização

A verificação de cada etapa serviu para a coleta dos dados em gramas, estas que serão úteis posteriormente no momento de conferir as taxas de contração de cada etapa do processo, a figura 24 abaixo ilustra uma das pesagens realizada com o auxílio da balança.

Figura 24 – Pesagem das peças com balança digital



Fonte: Do autor (2025).

O modelo da balança digital utilizado foi KN WAAGEN KN 2200/2, conforme figura 26, da marca KN Waagen. Suas características são:

- Capacidade máxima de carga de até 2,2 kg

- Exatidão de 0,02g. Duas casas decimais após a vírgula quando em gramas.

3.10 Avaliação da qualidade superficial

Como parte da avaliação foi aplicado uma etapa no trabalho para inspecionar a camada de revestimento das peças após a etapa final de sinterização. Com o uso do Estereoscópio (Figura 25) foram coletadas imagens das superfícies. Esse equipamento é amplamente utilizado em ensaios metalográficos por possibilitar inspeção tridimensional das microdeformações.

Figura 25 – Estereoscópio



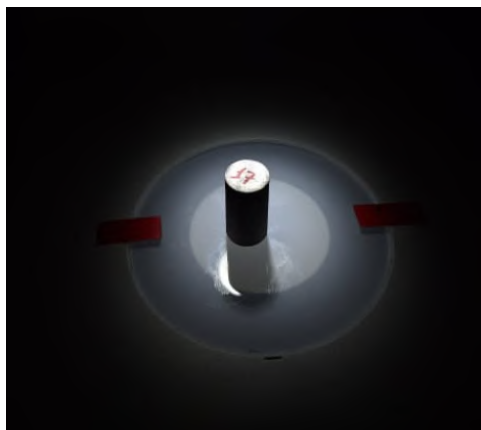
Fonte: Do autor (2025).

O modelo da estereoscópio utilizado foi Zeiss Stemi 2000-C conforme figura 277. Suas características são:

- Zoom: 0,65x - 5x
- Distância de trabalho: 92 mm
- Distância focal livre: 112 mm
- Iluminação: halógeno de 6 V, 10 W com intensidade ajustável.

A figura 26 mostra o posicionamento da peça no prato do estereoscópio:

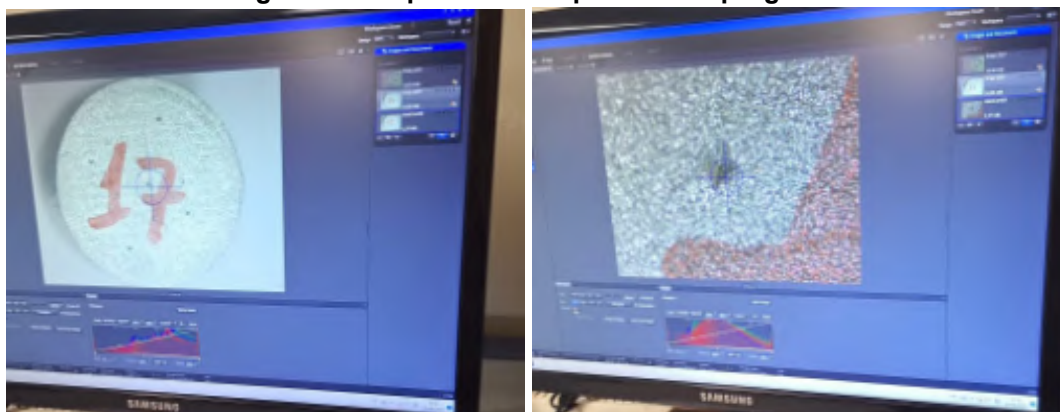
Figura 26 – Peça no estereoscópio



Fonte: Do autor (2025).

As imagens presentes na figura 27 mostram a interface do programa, e sua capacidade de ampliação de imagem aplicada a superfície de topo do corpo de prova de numeração 17:

Figura 27– Superfície de topo vista no programa



Fonte: Do autor (2025).

3.11 Microscopia Eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica que utiliza um feixe de elétrons para gerar imagens de alta resolução da superfície de materiais, permitindo uma análise detalhada da estrutura. Neste trabalho, as imagens foram obtidas com o microscópio eletrônico de varredura TESCAN VEGA3 SEM, localizado no Laboratório de Mecânica da UFSC.

A análise foi realizada a partir da superfície fraturada de um filamento de aço inoxidável 316L, o mesmo material utilizado na fabricação das peças pelo processo MFFF. O objetivo dessa etapa foi investigar com maior profundidade a estrutura interna do filamento, buscando evidências que contribuam para entender sua composição e também o estado dos materiais antes das etapas de processamento.

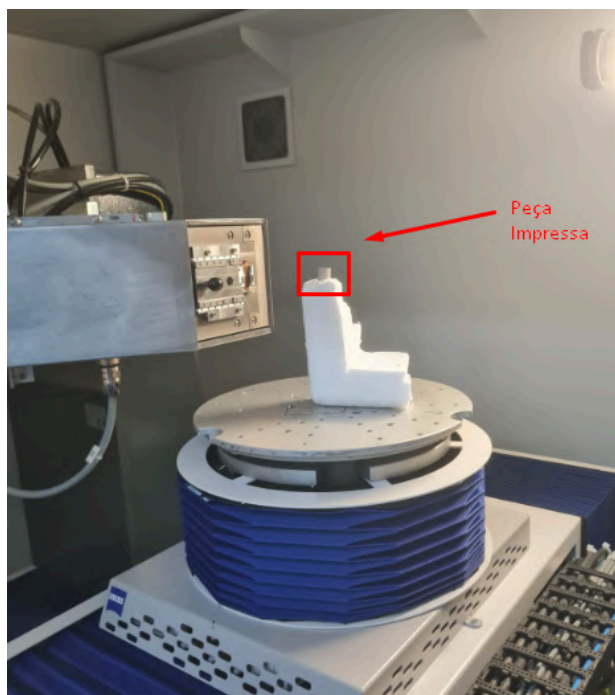
Para garantir uma boa condutividade elétrica e qualidade de imagem durante a análise, a tensão de trabalho aplicada durante a operação do MEV foi de 10 kV, parâmetro adequado para obter definição de superfície sem comprometer a integridade do material analisado. Os demais parâmetros da operação foram:

- Revestimento: Baltec/SCD 005 (Sputter coater).
- revestimento com ouro, corrente de 40mA, 40 s, atmosfera de argônio.

3.12 Tomografia computadorizada

Para a investigação interna das peças sinterizadas e análise de integridade estrutural sem a necessidade de seccionamento, foi empregada a técnica de tomografia computadorizada.

Duas amostras representativas dos corpos de prova foram submetidas ao exame tomográfico com o objetivo de identificar possíveis falhas internas, como porosidades residuais, trincas ou delaminações, que podem surgir nas etapas de *debinding* e sinterização. A análise foi realizada utilizando um equipamento de tomografia de alta resolução, conforme ilustra a Figura 28. Essa técnica não destrutiva é eficaz na caracterização volumétrica de peças metálicas produzidas por manufatura aditiva, permitindo uma inspeção detalhada da uniformidade da microestrutura interna.

Figura 28 – Tomógrafo

Fonte: Do autor (2025).

Os parâmetros adotados na análise foram: tensão de 210 kV, corrente de 130 μ A, tempo de exposição de 4 s, ganho do detector de 16x e resolução de imagem de 1024 $\times$ 1024 pixels. Utilizou-se filtro de cobre (0,50 mm), com 1400 projeções, resultando em tamanho de voxel de 29,13 μ m e spot size de 27,30 μ m. A distância entre o detector e a fonte (FDD) foi de 1500 mm, enquanto a distância entre o objeto e a fonte (FOD) foi de 110 mm, totalizando uma magnificação de 13,63 vezes. Esses parâmetros garantiram precisão e qualidade na reconstrução volumétrica das peças, possibilitando a avaliação detalhada das características internas.

3.13 Ensaios mecânicos

Neste trabalho o ensaio mecânico é o principal componente de estudo, durante esse capítulo abordaremos o método e estratégia traçado para a definição dos ensaios e ciclos realizados tanto em compressão quanto em dureza.

3.13.1 Ensaio de dureza

A fim de determinar a dureza de cada grupo de peças, foram realizados ensaios em um durômetro Rockwell, fazendo-se adaptações: Utilizou-se um indentador vickers. Esse ensaio foi realizado com o objetivo de avaliar a resistência superficial e a densidade relativa das peças metálicas impressas. Uma amostra de cada grupo de impressão foi submetida a medições individuais utilizando o durômetro de bancada, o método do teste levou a aplicação de carga de 10 kgf por 10 segundos, conforme indicado no mostrador em vermelho da escala.

As imagens presentes na figura 29 mostram o equipamento utilizado durante esses ensaios e a peça no momento da aplicação da carga:

Figura 29 – Durômetro



Fonte: Do autor(2025).

O modelo do Durômetro utilizado foi o Testor HT 1a da Wolpert, conforme figura 30. Esse equipamento foi adaptado para realizar o ensaio utilizando uma ponteira diferente da habitual.

Figura 30 – Aplicação de carga no corpo de prova



Fonte: Do autor(2025).

A obtenção das medidas foram feitas com o conjunto estereoscópio e software, após coletar a medida d_1 e d_2 foi possível prosseguir para realizar os cálculos de dureza e volume, estes que foram obtidos através das seguintes fórmulas:

$$Hv = \frac{1,8544 * F}{d^2} \quad (2)$$

$$d = d_1 + d_2 \quad (3)$$

$$D = \frac{m}{V} \quad (4)$$

$$V = \pi * d^2 * h \quad (5)$$

Sendo 2: Equação da Dureza Vickers; 3: Soma das diagonais da impressão Vickers; 4: Equação da densidade; 5: Equação do volume de um cilindro.

A aplicação de carga foi realizada na superfície inferior das peças, a qual esteve em contato direto com a base durante a impressão. Essa superfície foi escolhida pois ela apresentou acabamento mais adequado para a medição, ao contrário da face oposta que permaneceu porosa, como evidencia a figura 31 abaixo:

Figura 31 – Superfície superior do corpo de prova



Fonte: Do autor (2025).

Para a observação e validação das marcações deixadas pelo penetrador do ensaio de dureza, foi utilizado o já citado estereomicroscópio Zeiss com sistema de captura digital.

3.13.2 Ensaio de compressão

Para a avaliação da resistência mecânica das amostras metálicas produzidas, foram realizados os ensaios de compressão. Os testes iniciais foram executados em uma máquina de ensaios mecânicos EMIC DL 200 instalada no Laboratório de Materiais da UFSC (Figura 32), capaz de aplicar cargas de compressão com controle preciso de deslocamento e força até 200 kN.

Durante estes testes foram selecionadas duas amostras sinterizadas para essa etapa, representando dois níveis distintos de densidade relativa: uma com 100% de preenchimento e outra com 50%. A escolha desses corpos de prova teve

por finalidade contrastar o comportamento estrutural em função da variação do conteúdo interno da peça.

Figura 32 – Máquina de Tração e Compressão Emic 200 kN



Fonte: Do autor (2025).

A preparação das amostras seguiu as orientações gerais da norma ASTM E9, sendo posicionadas verticalmente entre os platôs de compressão com superfícies paralelas e niveladas. O procedimento adotado visou minimizar tensões indesejadas e garantir o correto alinhamento durante a aplicação da carga, como parte das recomendações dos técnicos do laboratório, utilizou-se de uma pequena folha de EVA com o intuito de maximizar a área de contato e evitar tração.

A velocidade de descida utilizada pela máquina foi configurada conforme o padrão estabelecido indicado na norma, sendo essa de 0,150mm/min utilizando uma célula de carga de 200 kN.

Durante a primeira rodada de ensaios de compressão, as duas amostras avaliadas chegaram no limite da carga estipulada para a célula de carga, o que inviabilizou a utilização da força como critério de comparação entre as amostras. Esse fator, somado ao longo tempo de execução de cada ensaio, evidenciou uma limitação operacional relevante, considerando-se o total de 48 corpos de prova e o tempo reduzido de acesso ao laboratório.

A carga máxima da máquina no laboratório era de 19.990 kgf. A aplicação da força máxima suportada pela máquina de ensaio destes primeiros testes ajudou a entender o quanto as peças eram capazes de receber de tensão e também a estabelecer o padrão a ser utilizado no ensaio de compressão. As peças utilizadas neste experimento tiveram um comportamento típico de materiais dúcteis, ou seja, capazes de sofrer deformações significativas sem fraturar. Dessa forma, o parâmetro da análise não poderia ser o ponto de ruptura, mas sim a tensão aplicada por deslocamento fixo nos corpos de prova.

Sendo assim, os ensaios posteriores, conduzidos no IFSC, adotaram como critério de parada o deslocamento fixo de 2,75 mm. Essa abordagem permitiu a padronização dos resultados, facilitando a comparação direta do comportamento mecânico das diferentes amostras de aço 316L.

Com o objetivo de otimizar o tempo de ensaio sem comprometer a qualidade dos resultados, foi aplicada uma estratégia de controle de velocidade de descida do atuador da máquina: uma amostra de cada grupo foi submetida à taxa de deslocamento (0,15 mm/min), para observação mais precisa, enquanto as demais amostras foram ensaiadas a uma taxa mais elevada (1,5 mm/min).

Além disso, o estudo de Güden et al. (2022) demonstra que o comportamento compressivo do aço 316L é significativamente influenciado pela taxa de deformação, com a tensão de escoamento e o encruamento aumentando conforme o aumento da taxa, especialmente em testes realizados até 2500 s^{-1} (taxa de deformação extremamente alta).

Os valores aplicados categorizam os ensaios conduzidos em regime quase estático, o que é o mais indicado para testes de compressão em materiais metálicos como o 316L sinterizado, principalmente quando se busca avaliar com precisão propriedades como módulo de elasticidade e tensão de escoamento.

A figura 33 ilustra a máquina de compressão disponível no laboratório do Instituto:

Figura 33 – Máquina de compressão utilizada



Fonte: Do autor (2025).

O modelo da máquina de compressão utilizada é da linha DL da EMIC/INSTRON.

Assim, mesmo em condições de deformação moderadas como as aplicadas neste trabalho, a escolha de uma velocidade de deslocamento controlada e o uso de um critério de parada se mostraram decisões importantes para manter a coerência dos resultados e garantir comparabilidade entre os grupos testados.

Contudo, para realizar os procedimentos na máquina de compressão do IFSC, foi necessário ajustar o modelo de ensaio adotado, o que exigiu o uso de peças de sacrifício. Considerando o tempo e o valor investidos no tratamento térmico das peças impressas, optou-se por utilizar amostras obtidas a partir de um aço de baixo carbono exclusivamente para a etapa de aferição. Essas peças foram produzidas com o mesmo diâmetro, o material estava disponível e foi coletado no Laboratório de Máquinas Operatrizes (MOP) do IFSC.

As peças brutas foram cortadas com a utilização da máquina de eletroerosão a fio, como mostra a figura 34.

Figura 34 – Eletroerosão a fio FW 1U



Fonte: Do autor (2025).

A figura 35 mostra a comparação direta da peça impressa com a peça de sacrifício e aferição após o corte na eletroerosão a fio.

Figura 35 – Comparação de peça impressa com peça de aferição

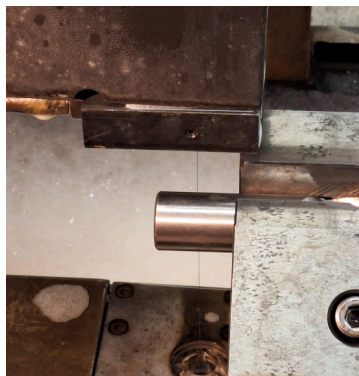


Fonte: Do autor (2025).

Adicionalmente, para realizar a aferição sem que a peça causasse deformação no prato, era necessária a adição de um disco de material mais duro que eliminasse esse problema. A solução empregada foi utilizar uma haste de uma broca de aço rápido com 25 mm de diâmetro. As imagens presentes na figura 36 mostram o corte dos discos na haste da broca. A figura 37 mostra o ensaio de

aferição sendo realizado com os discos cortados e a peça de aferição devidamente posicionada para o ensaio.

Figura 36– Compressão aplicada na peça de aferição



Fonte: Do autor (2025).

Figura 37– Compressão aplicada na peça de aferição

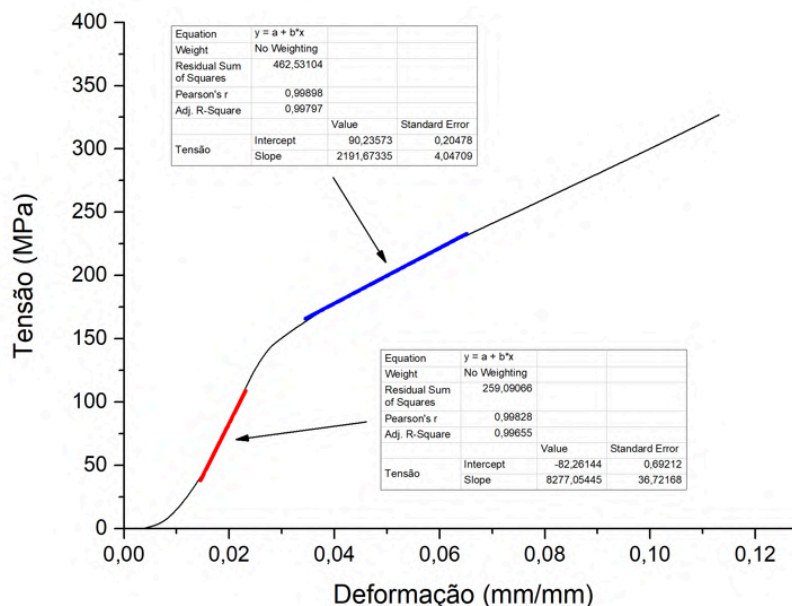


Fonte: Do autor (2025).

Para definir o ponto de escoamento das amostras, a estratégia adotada foi a divisão da curva tensão-deformação em dois trechos com comportamento linear. O primeiro segmento, mais inclinado, representa a fase elástica inicial. O segundo, com menor inclinação, marca o início do escoamento. A interseção entre essas duas regiões foi usada como referência para determinar a tensão de escoamento de cada peça. Esse procedimento foi repetido para todas as amostras testadas, sempre considerando as características individuais de cada curva.

A figura 38 a seguir mostra a ilustração desses pontos em gráfico:

Figura 38 – Tensão de escoamento



Fonte: Do autor (2025).

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta e interpreta os resultados obtidos ao longo do experimento, com foco na avaliação das propriedades físicas e mecânicas das peças fabricadas por MFFF em aço inoxidável 316L.

4.1 Obtenção das peças

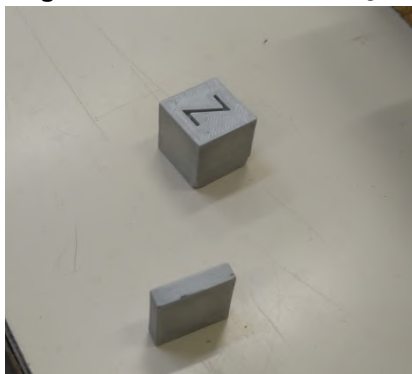
As análises foram organizadas de forma a contemplar, de maneira sistemática, os efeitos dos parâmetros de impressão adotados sobre características como densidade, dureza Vickers e resistência à compressão dos corpos de prova.

Inicialmente, são apresentados os resultados referentes às inspeções visuais, estruturais e dimensionais das peças após a sinterização, seguidos pelas análises comparativas entre os diferentes grupos experimentais. Em cada etapa, buscou-se identificar correlações entre as variações dos parâmetros de processo e o desempenho das amostras, considerando como base as normas técnicas de ensaio e referências da literatura especializada.

4.1.1 Testes pré impressão

Essa fase consistiu na calibração e familiarização com a impressora, durante este momento foram realizados testes com diferentes geometrias incluindo o cubo de calibração presente na figura 39 a seguir:

Figura 39 – Cubo de calibração



Fonte: Do autor (2025).

Subsequente a calibração, foram iniciados os testes a ajustes de impressão com diferentes geometrias. Tendo o parâmetro corpo de prova cilíndrico definido, mais uma rodada de impressão preliminar foi realizada, onde foi observado a formação de acúmulo de material no bico da extrusora (Figura 40).

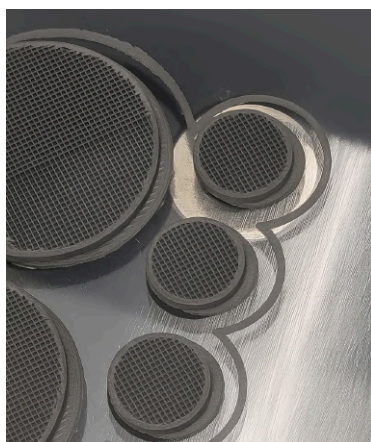
Figura 40 – Acúmulo de material no bico



Fonte: Do autor (2025).

Além desse acúmulo, os lotes iniciais também apresentaram mais falhas de impressão, como o deslocamento de camada (Figura 41).

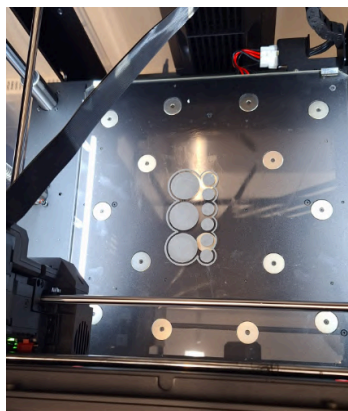
Figura 41– Deslocamento de camada nas peças de teste



Fonte: Do autor (2025).

Ajustes no fluxo foram realizados para mitigar esses erros, e com isso seguiu-se para a fabricação de mais uma rodada dos corpos de prova de cada projeto como etapa de validação, a figura abaixo mostra umas das primeiras camadas impressas dos corpos de prova dos dois estudos:

Figura 42– Rodada adicional de impressão



Fonte: Do autor (2025).

Durante essa etapa, retirar as peças impressas da mesa se mostrou um desafio, a aderência das peças ao vidro as mantiveram agarradas à superfície e mesmo com tentativas de retiradas utilizando-se de ferramentas como espátula ou estilete, as impressões se mantinham fixadas. A solução aplicada para facilitar a soltura foi a dissolução da cola através de água quente aproximadamente 80°C.

Após a última etapa de validação e uma vez estabelecido um perfil funcional para a impressão base, deu-se início ao processo de fabricação de todos os grupos de corpo de prova utilizando os parâmetros indicados pelo fabricante, cada parâmetro de impressão possuía um tempo de corrida elevado que variava de 9 até 22 horas como mostra a tabela 9:

Tabela 9 – Tempo estimado de impressão

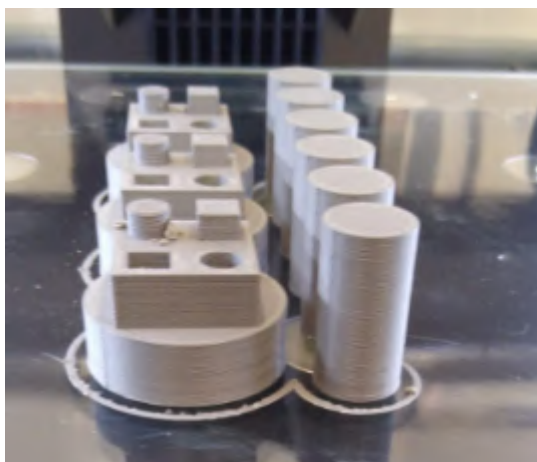
Grupo	Espessura	Perímetro	% Preenchimento	Tempo de impressão (H)
1	0,12	2	100	21:35:15
2	0,24	2	100	10:54:25
3	0,24	3	50	9:54:33
4	0,24	3	100	11:08:15
5	0,24	2	50	9:38:56
6	0,12	3	50	19:17:35
7	0,12	3	100	22:02:55
8	0,12	2	50	18:45:14

Fonte:Do autor (2025);

4.1.2 Impressão

As imagens abaixo mostram as primeiras impressões finalizadas:

Figura 43 – Preset de impressão Idea Maker



Fonte: Do autor (2025).

A conferência e coleta dos dados de dimensão foi realizada logo após a fase de impressão, com o objetivo de registrar informações iniciais da peça verde e, posteriormente, compará-las aos dados finais após a sinterização.

4.1.3 Debinding

A preparação da solução química utilizada no forno apresentou dificuldades operacionais, especialmente relacionadas ao preparo do agente ácido oxálico, dificuldades essas que foram tratadas aplicando o uso de um triturador para facilitar esse processo, conforme figura 44 a seguir:

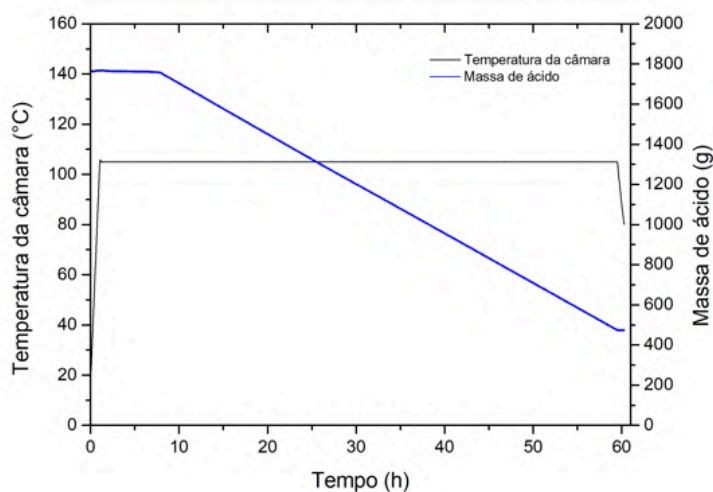
Figura 44– Triturador



Fonte: Do autor (2025).

Durante o processo o forno químico ofereceu a possibilidade de coletar dados durante o processo, com a coleta, análise e tratamento desses valores de temperatura e massa aplicada foi possível obter o seguinte gráfico:

Figura 45 – Curva de temperatura aplicada no *debinding*



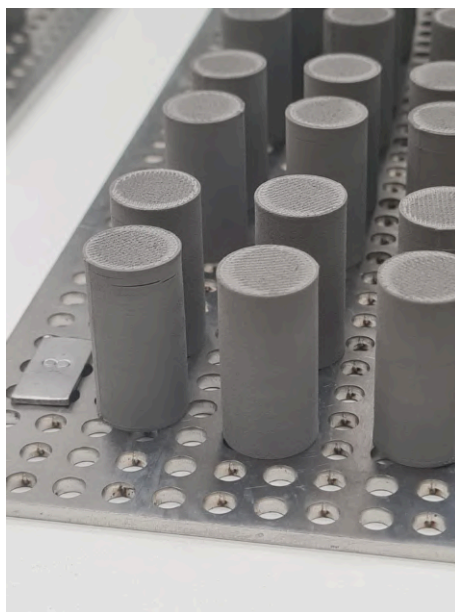
Fonte: Do autor (2025).

O gráfico apresenta duas linhas principais. A linha azul representa a massa de ácido disponível (em gramas) ao longo do processo. No início, ela permanece constante, já que a solução não é aplicada imediatamente. Com o avanço do tempo (em horas), a massa começa a diminuir gradualmente, indicando o consumo do ácido durante a etapa de *debinding*. Já a linha cinza mostra a variação da temperatura interna da câmara do forno. Ela apresenta um aumento progressivo

até atingir a faixa de 100 °C, onde então se estabiliza, mantendo-se constante durante o restante do processo.

Após o debinding também foi possível verificar que algumas peças posicionadas nas extremidades da plataforma sofreram delaminação (figura 46):

Figura 46 – Delaminações nas peças



Fonte: Do autor (2025).

A seguir a figura 47 mostra a taxa de *debinding* alcançada por grupo de peças, todos os grupos obtiveram o resultado dentro da faixa esperada (10%).

Figura 47– Delaminações nas peças

Dados dimensionais por grupo de peças		
Médias		
Grupo	Taxa de debinding %	
1	0,108784307	
2	0,108541592	
3	0,108297379	
4	0,109354825	
5	0,109184122	
6	0,108257343	
7	0,102642746	
8	0,109016379	

Fonte: Do autor (2025).

4.1.4 Sinterização

Foram sinterizadas ao todo 72 peças, sendo 48 destinadas a ensaios mecânicos e 24 voltadas à análise dimensional, posicionadas sobre bandejas e dispostas de forma a evitar contato direto ou interferência térmica entre si (Figura 48). O resfriamento foi conduzido de forma controlada, com aplicação de patamares de descida gradual de temperatura, a fim de evitar choques térmicos e assegurar a estabilidade dimensional das peças.

Figura 48 – Peças alocadas nas plataformas de grafite



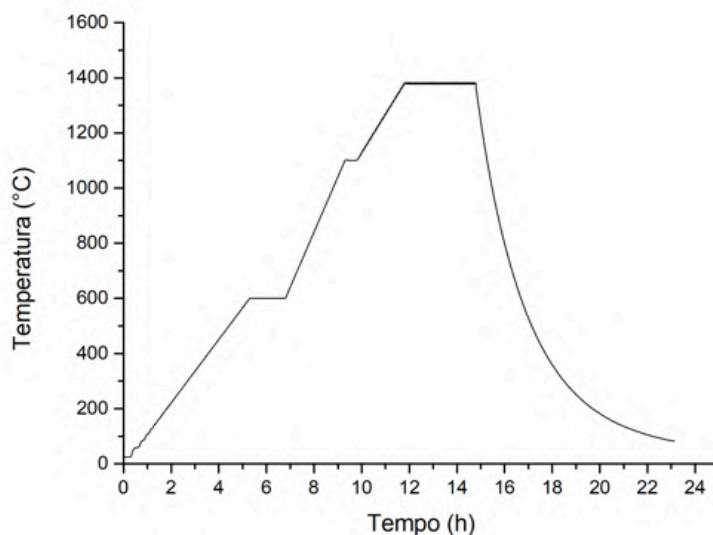
Fonte: Do autor (2025).

Assim como no processo de *debinding*, a sinterização também contou com a coleta de dados ao longo de todo o ciclo. Nesse caso, as informações registradas estão principalmente relacionadas à temperatura aplicada ao longo do tempo.

A figura 49 ilustra o perfil térmico adotado durante a sinterização. A primeira etapa do aquecimento leva a peça até 600 °C em aproximadamente 5 horas e posteriormente por um período de 1 hora a 1100°C, o ciclo térmico adotado nessa faixa por esses dois períodos tem o objetivo de eliminar resíduos remanescentes de material ligante. Em seguida, a temperatura é elevada gradualmente até atingir 1400 °C, permanecendo nesse patamar por tempo suficiente para promover a sinterização das partículas metálicas e garantir a densificação da peça. Por fim,

ocorre o resfriamento também de forma gradual, seguindo a curva descendente observada no gráfico.

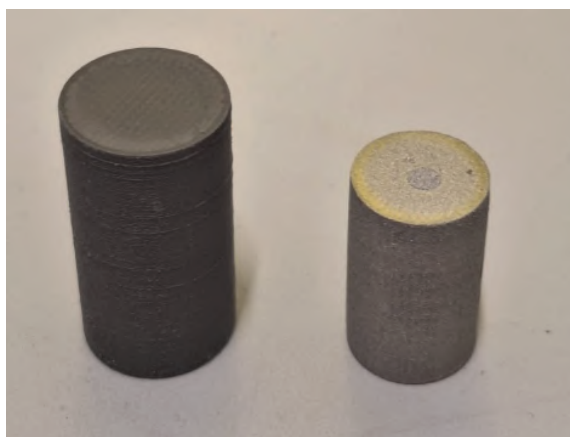
Figura 49– Curva de temperatura aplicada na sinterização



Fonte: Do autor (2025).

Após o processo, observou-se a ocorrência esperada de contração volumétrica, compatível com a retração documentada do aço inoxidável 316L sinterizado. A deformação geométrica não foi identificada de forma significativa, e os valores de retração foram posteriormente medidos para fins de análise e validação dimensional, os resultados obtidos dessas contrações foram de 16% em diâmetro e 18% em altura, conforme ilustrado pela figura 50 a seguir. A aplicação cuidadosa dos parâmetros de sinterização permitiu garantir a coalescência eficiente das partículas metálicas, resultando em peças com boa integridade estrutural e propriedades adequadas para os testes subsequentes.

Figura 50 – Contração observada em peças

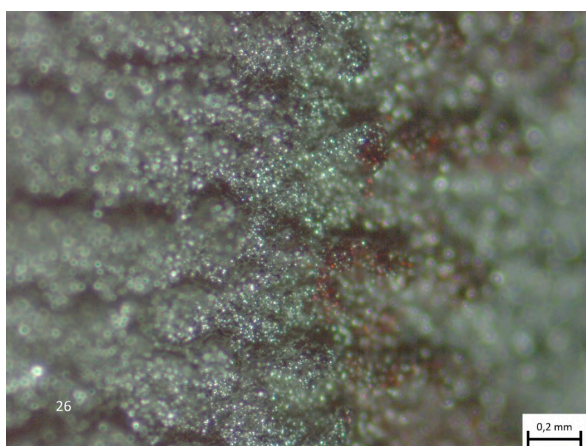


Fonte: Do autor (2025).

4.2 Resultado das análises de qualidade de superfície

Este tópico apresenta as imagens obtidas e as comparações entre os diferentes grupos experimentais. A utilização do estereoscópio permitiu a captura de imagens detalhadas (Figura 51), possibilitando a observação de aspectos como a porosidade superficial e a sobreposição das camadas na região lateral das peças.

Figura 51 – Vista da superfície lateral com Estereoscópio



Fonte: Do autor (2025).

A mesma peça de numeração 26, pertencente ao grupo 5, fotografada de perto com uma câmera convencional de dispositivo celular, também apresentou nível

de detalhamento para enxergar a separação das camadas, as pequenas linhas na superfície lateral do cilindro (Figura 52) mostram isso.

Figura 52 – Vista da peça pós sinterização



Fonte: Do autor (2025).

As peças com maior porcentagem de preenchimento também tiveram uma superfície final mais lisa, a tabela 10 evidência o método comparativo aplicado entre os grupos de impressão:

Tabela 10 – Critério de comparação de imagens via câmera usual

Comparação	Peça	Grupo	Peça	Grupo	Critério de comparação
A	1	E12-P2-100	12	E24-P2-100	Espessura
B	17	E24-P3-50	39	E12-P3-100	Preenchimento
C	20	E24-P3-100	44	E12-P2-50	Espessura, Preenchimento e perímetro

Fonte:Do autor (2025);

Onde:

- A: Compara o resultado direto para variações de espessura 0,12 e 0,24 respectivamente;
- B: Compara o resultado direto para variações de preenchimento 50% e 100% respectivamente;

- C: Compara o resultado direto para variações de nível alto e nível baixo (menor espessura, perímetro e preenchimento contra maior)

As figuras 53, 54 e 55 mostram as evidências fotográficas de cada peça e grupo

Figura 53 – Comparação A (Grupos E12-P2-100 e E24-P2-100)



Fonte: Do autor (2025).

Figura 54 – Comparação B (Grupos E24-P3-50 e E12-P3-100)



Fonte: Do autor (2025).

Figura 55 – Comparação C (Grupos E24-P3-100 e E12-P2-50)

Fonte: Do autor (2025).

A mesma comparação foi realizada utilizando imagens de maior ampliação obtidas por meio do estereoscópio. No entanto, como apenas as peças submetidas ao ensaio de dureza foram registradas neste equipamento, não foi possível manter a correspondência numérica exata das amostras utilizadas na análise anterior. Ainda assim, foram preservados os mesmos grupos experimentais e os critérios de avaliação. A Tabela 11 apresenta a organização das peças, os grupos analisados e os parâmetros considerados na comparação.

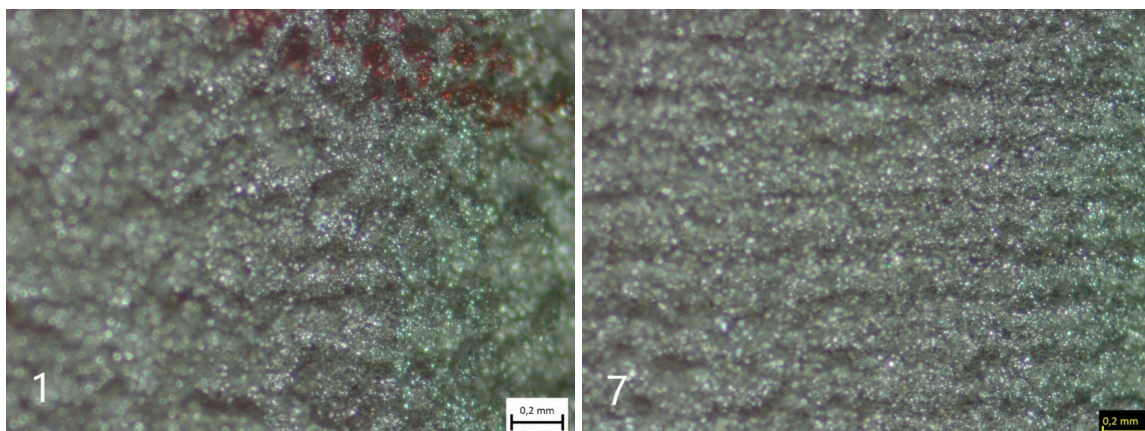
Tabela 11 – Critério de comparação de imagens via estereoscópio

Comparação	Peça	Grupo	Peça	Grupo	Critério de comparação
D	1	E12-P2-100	7	E24-P2-100	Espessura
E	17	E24-P3-50	39	E12-P3-100	Preenchimento
F	20	E24-P3-100	44	E12-P2-50	Espessura, Preenchimento e perímetro

Fonte:Do autor (2025);

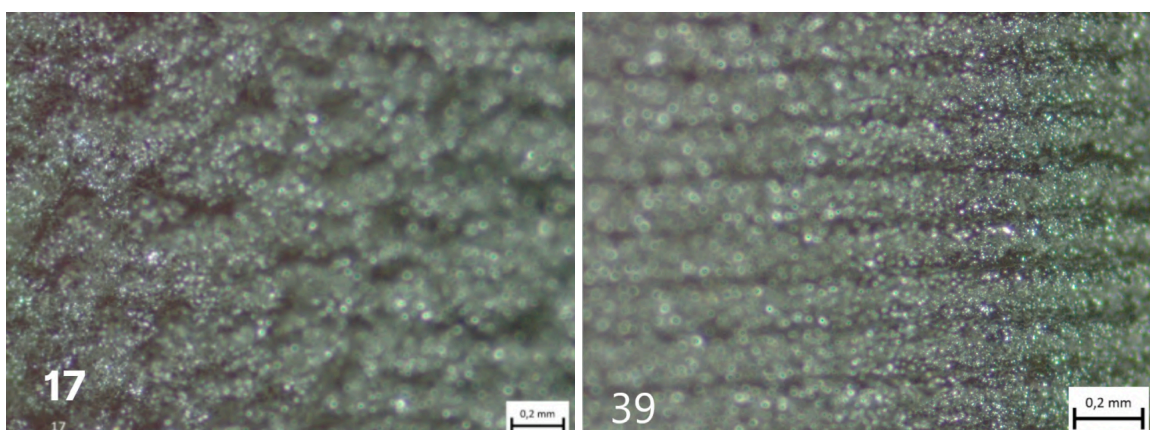
As figura 56, 57 e 58 mostram as imagens comparativas da superfície observada via estereoscópio:

Figura 56 – Comparação D (Grupos E12-P2-100 e E24-P2-100)



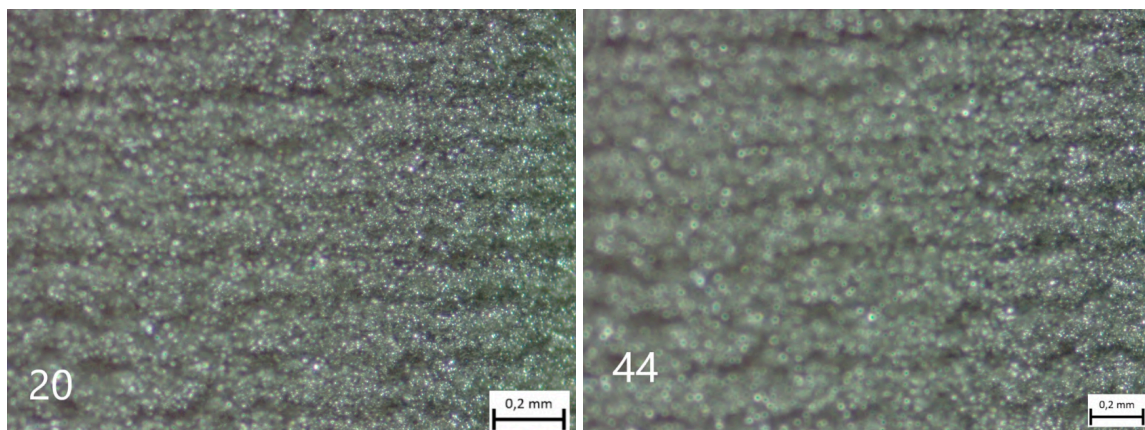
Fonte: Do autor (2025).

Figura 57 – Comparação E (Grupos E24-P3-50 e E12-P3-100)



Fonte: Do autor (2025).

Figura 58 – Comparação F (Grupos E24-P3-100 e E12-P2-50)

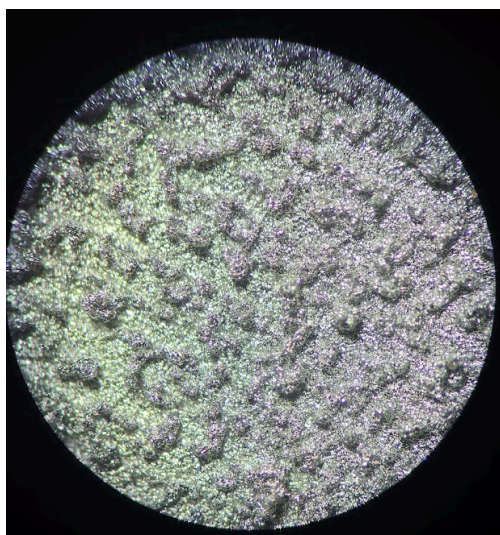


Fonte: Do autor (2025).

Após análise das imagens, em um aspecto geral as peças com maior preenchimento e menor espessura de camada apresentaram maior nível de qualidade superficial, essas tiveram tendência a manter a linha de camada mais uniforme e sem deformações observáveis.

Contudo, ao conferir a superfícies de topo e base, a superfície de topo que não teve contato com o suporte apresentou resultados de arrepiamento das camadas externas (figura 59), esse fator dificultou a identificação da marca de medida para a dureza e fez com que o resultado precisasse ser obtido se baseando na superfície de base.

Figura 59– Superfície superior do corpo de prova aproximada

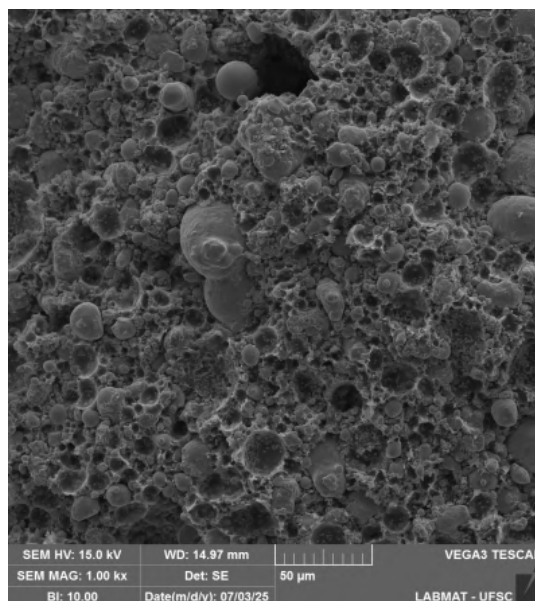


Fonte: Do autor (2025).

4.2.1 Resultado da MEV

A Figura 60 apresenta o resultado da análise por MEV realizada em uma região rompida de um cabo de filamento de aço 316L. A ampliação permitiu visualizar com clareza os detalhes da superfície interna, revelando tanto a morfologia das partículas metálicas quanto a presença do material ligante.

Figura 60 – Vista do filamento rompido pós MEV



Fonte: Do autor (2025).

Na imagem, é possível identificar as esferas mais densas e definidas como sendo as partículas metálicas. Já as regiões com aparência mais porosa e com aspecto de “esponja” correspondem aos resíduos do ligante polimérico presente na estrutura do filamento antes do processo de debinding.

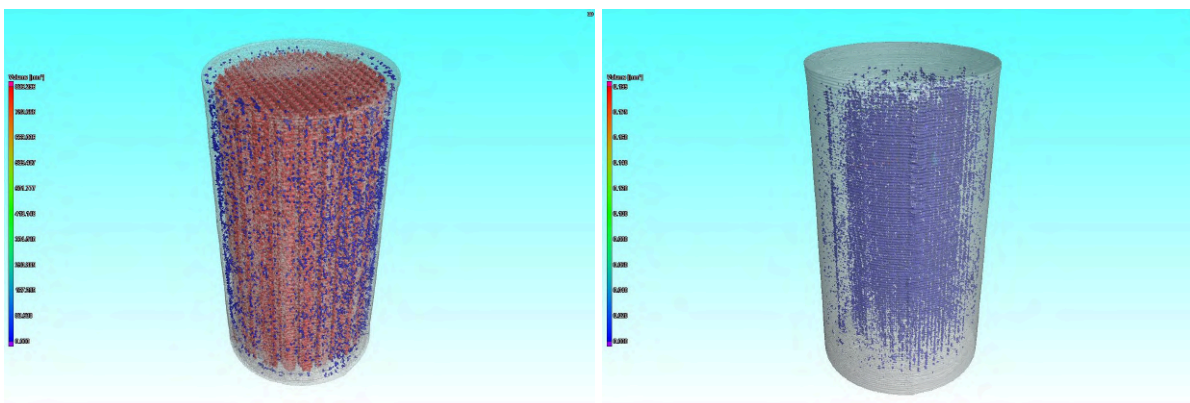
Essa análise contribui para a compreensão do arranjo interno do filamento utilizado na fabricação das peças e reforça a importância do controle durante o tratamento para separar esses materiais através do tratamento químico de forma eficiente, pois essa etapa é a de maior relevância para a qualidade final da peça sinterizada.

4.2.2 Resultado da Tomografia

O uso da tomografia nesse estudo complementou os ensaios mecânicos, contribuindo para uma avaliação mais abrangente do desempenho das peças impressas pelo processo MFFF.

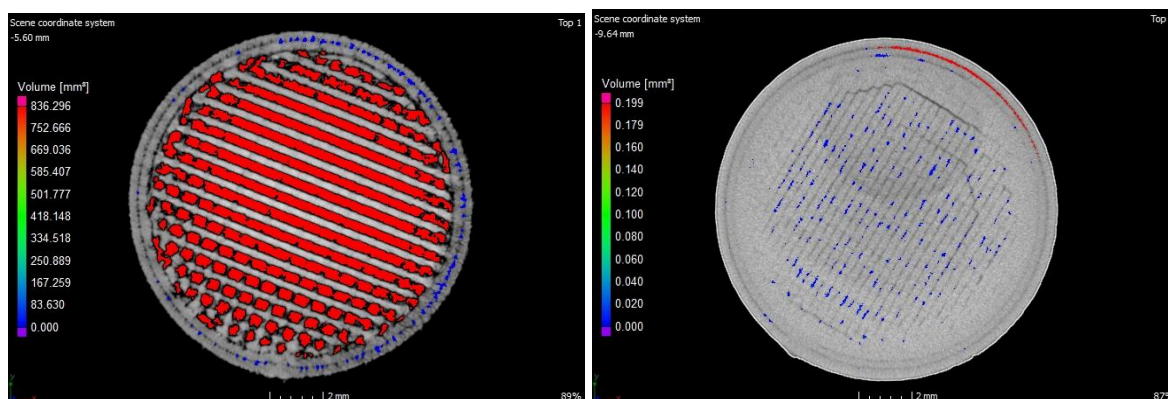
As figuras 61, 62 e 63 mostram os resultados fazendo comparações diretas entre duas peças, a esquerda uma imagem com 50% de preenchimento e a direita uma imagem com 100%, respectivamente.

Figura 61 – Comparativo vista diagonal superior



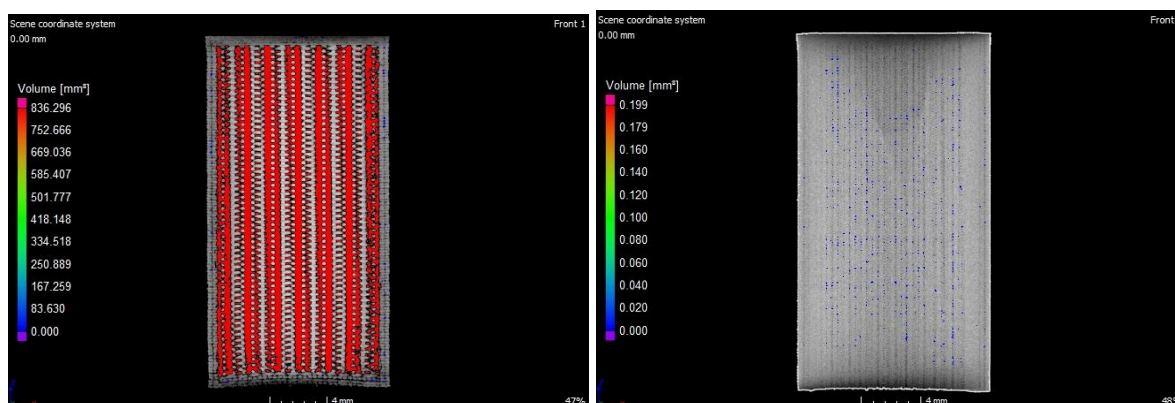
Fonte: Do autor (2025).

Figura 62 – Comparativo de peças vista superior



Fonte: Do autor (2025).

Figura 63 – Comparativo de peças vista lateral



Fonte: Do autor (2025).

A análise dos resultados foi realizada com o auxílio dos profissionais e pesquisadores do laboratório de metrologia e instrumentação da Fundação CERTI. Os resultados obtidos na análise dessas imagens revelou 31,2% de vazios na amostra com 50% de preenchimento, enquanto a peça com 100% apresentou apenas 0,64% de vazios internos. Esses dados confirmam a diferença significativa na densidade entre as duas condições de impressão.

4.3 Análise dimensional e cálculo da contração

A análise dimensional teve como objetivo avaliar a precisão geométrica das peças fabricadas por meio do processo. Comparando os valores obtidos e traçando uma média para cada grupo, a figura 64 mostra a média obtida de cada peça. Essa análise permite quantificar as contrações lineares ocorridas no processo e identificar possíveis distorções associadas aos diferentes parâmetros de impressão aplicados em cada grupo.

O cálculo de contração traz a porcentagem obtida através do diâmetro da peça verde menos o diâmetro da peça sinterizada, a fórmula utilizada no cálculo foi:

$$\text{Contração (\%)} = \left(\frac{D_{\text{verde}} - D_{\text{sinterizada}}}{D_{\text{verde}}} \right) * 100 \quad (6)$$

Os dados necessários para realizar o cálculo de contração foram obtidos ao longo do trabalho nas etapas de impressão e sinterização, a figura 64 mostra os dados de diâmetro e altura para cada grupo e sua porcentagem de contração obtida.

Figura 64 – Médias obtidas após análise dimensional de cada etapa

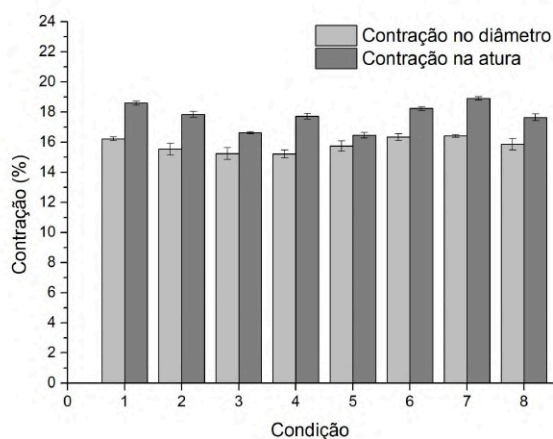
Dados dimensionais por grupo de peças												
Médias												
Grupo	Pós impressão				Pós sinterização				Contração			
	Diametro (mm)	Altura (mm)	Desvio P. Diametro (mm)	Desvio P. Altura (mm)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Desvio P. Diametro (mm)	Desvio P. Altura (mm)	Diametro (%)	Altura (%)	Desvio P. Diametro	Desvio P. Altura
1	15,68	29,92	0,020	0,017	13,14	24,36	0,013	0,034	16,22	18,58	0,1170	0,1277
2	15,69	29,94	0,040	0,015	13,25	24,60	0,044	0,062	15,53	17,84	0,3916	0,1883
3	15,60	29,93	0,038	0,020	13,22	24,95	0,037	0,021	15,35	16,81	0,3927	0,0674
4	15,65	29,93	0,013	0,021	13,27	24,63	0,042	0,061	15,20	17,71	0,2747	0,1921
5	15,59	29,96	0,008	0,016	13,14	25,02	0,049	0,048	15,73	16,46	0,3446	0,1840
6	15,61	29,93	0,030	0,018	13,06	24,48	0,026	0,046	16,33	18,27	0,2328	0,1265
7	15,67	29,94	0,012	0,020	13,10	24,28	0,017	0,029	16,40	18,90	0,0921	0,1138
8	15,58	29,96	0,035	0,020	13,11	24,67	0,039	0,079	15,85	17,65	0,3757	0,2243

Fonte: Do autor (2025).

Com base no planejamento fatorial aplicado, foi possível observar que a variação da densidade entre peças pode ser correlacionada diretamente com os parâmetros de preenchimento e espessura de camada aplicados durante a impressão, tal como observado na tabela de dados da figura 65, onde diferentes presets resultaram em variações notáveis na densidade final (CONDURZ et al., 2018, p. 39).

Com esses dados foi possível gerar o gráfico de impacto da contração ao variar a condição (Figura 65), as colunas em barra apresentam diâmetro e altura.

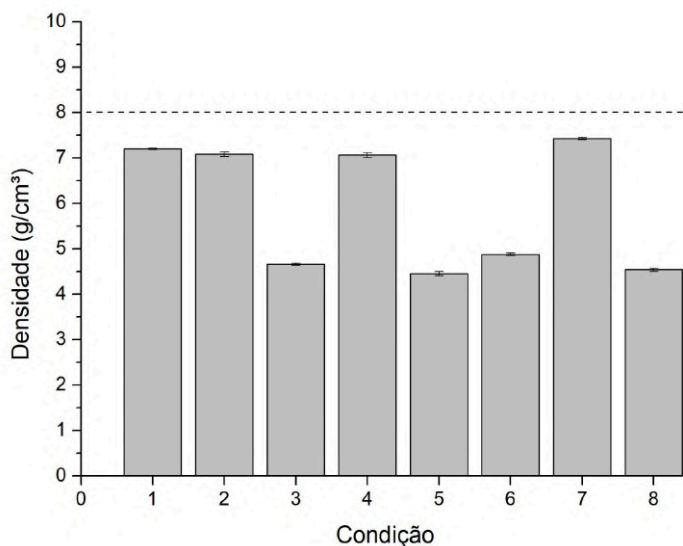
Figura 65 – Contração de altura e diâmetro por condição



Fonte: Do autor (2025).

Também foi gerado um gráfico que mostra a variação da densidade por condição (Figura 66).

Figura 66 – Variação de densidade por condição



Fonte: Do autor (2025).

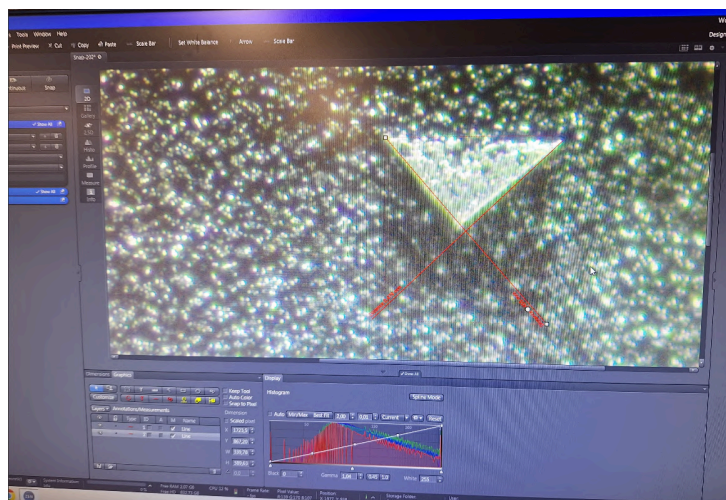
As constatações obtidas através do gráfico indicam que os fatores que mais impactam na densidade, estão diretamente relacionados à porcentagem de preenchimento de cada grupo de peças.

4.4 Resultados dos ensaios mecânicos

4.4.1 Resultados de dureza

Após aplicação dos ensaios, o programa Zeiss foi utilizado para a coleta das dimensões necessárias para o cálculo da dureza, a figura 67 abaixo mostra a utilização do programa:

Figura 67– Medidas realizadas no programa Zeiss Stemi2000-C



Fonte: Do autor (2025).

Os ensaios de dureza foram aplicados em uma peça de cada grupo, os valores obtidos pós teste variaram entre 70 e 105 HV, conforme a figura 68 abaixo:

Figura 68– Dureza por grupo de peças

Informações calculadas pós sinterização				
Grupo	D1	D2	D final	Dureza (HV)
1	0,440	0,420	0,430	100
2	0,446	0,465	0,456	89
3	0,479	0,455	0,467	85
4	0,423	0,415	0,419	106
5	0,529	0,494	0,512	71
6	0,426	0,474	0,450	92
7	0,451	0,443	0,447	93
8	0,444	0,464	0,454	90

Fonte: Do autor (2025).

4.4.2 Resultados de Compressão

Com os ensaios de compressão realizados, foi possível analisar e obter o resultado de comportamento mecânico das peças impressas, permitindo avaliar parâmetros como deformação, tensão de escoamento e variação das resistências obtidas por parâmetro, principalmente em função do nível de preenchimento interno.

A seguir, são apresentados os principais dados obtidos nos testes e suas respectivas análises.

A Figura 69 ilustra o resultado da compressão do primeiro corpo de prova utilizado para testes. Esse se tratava do corpo de prova da condição do grupo 1, através da comparação das peças n°1 da esquerda que já realizou ensaio com a peça n°3 da direita que ainda não passou pelo ensaio de compressão é possível observar a redução da altura obtida, sendo de aproximadamente 7mm.

Figura 69 – Comparativo de peças de 100% de preenchimento



Fonte: Do autor (2025).

A identificação das peças foi mantida visível ao longo de todo o ensaio, as superfícies não foram comprometidas nem sofreram marcas profundas ou delaminações, indicando que o carregamento foi bem distribuído e o alinhamento do ensaio ocorreu conforme esperado. A amostra da esquerda passou por deformação plástica evidente durante o ensaio de compressão. O comportamento observado é típico de materiais dúcteis, como o aço 316L, e confirma que a carga aplicada ultrapassou o limite de escoamento da peça.

Esse tipo de resposta é esperado em materiais com maior capacidade de deformação, onde o carregamento não costuma levar à formação de trincas, mas sim ao aparecimento de dilatações laterais, popularmente chamadas de “barrigas”. A geometria cilíndrica do corpo de prova favorece esse tipo de deformação, onde conforme a peça sofre deformação diminuindo sua altura, seu diâmetro aumenta junto com a superfície de contato com a máquina.

Figura 70 – Peça de 100% de preenchimento pós ensaio



Fonte: Do autor (2025).

Mesmo com a deformação intensa na peça com 100% de preenchimento, não há sinais visíveis de colapso estrutural, o que reforça a ductilidade do material nessa condição e sua capacidade de suportar altos níveis de deformação antes da ruptura.

Já na peça com 50% de preenchimento (Figura 71) o ensaio inicial obteve uma deformação de 19mm, isso ocorreu por conta da aplicação de mesma força aplicada a peça de 100% (19.900kN)

Figura 71 – Peça de 50% de preenchimento pós ensaio



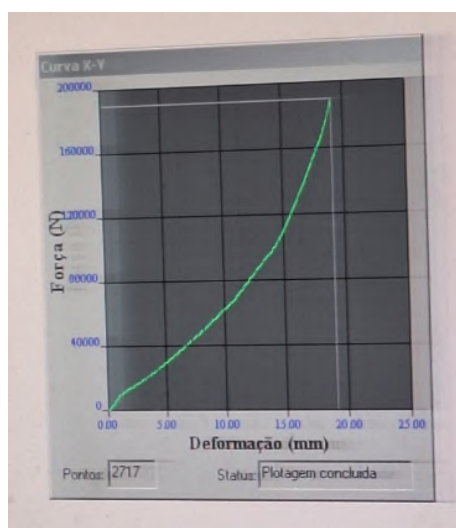
Fonte: Do autor (2025).

Apesar de se tratar do mesmo material, a peça em questão apresentou sinais visíveis de colapso estrutural, com formação de trincas ao longo da superfície.

Isso ocorreu devido ao regime adotado nos testes iniciais, em que os dois primeiros ensaios foram conduzidos com foco na carga máxima suportada, sem considerar um limite prévio de deformação. Essa abordagem acabou levando a uma aplicação de força além do ideal para esse tipo de análise.

Ainda assim, esses primeiros resultados foram importantes para ajustar os parâmetros adotados nos ensaios seguintes e definir um critério de comparação mais adequado entre as amostras. Abaixo, a Figura 72 apresenta a curva de deformação obtida para a amostra com 50% de preenchimento.

Figura 72 – Curva de deformação por força aplicada na peça de 50%



Fonte: Do autor (2025).

Antes de prosseguir com os demais ensaios, foram realizadas aferições utilizando as peças de sacrifício. A Figura 73 mostra os corpos de prova utilizados e sua deformação, proporcionalmente menor, já que o objetivo era apenas aferir e ajustar os parâmetros de ensaio da máquina empregada nos testes.

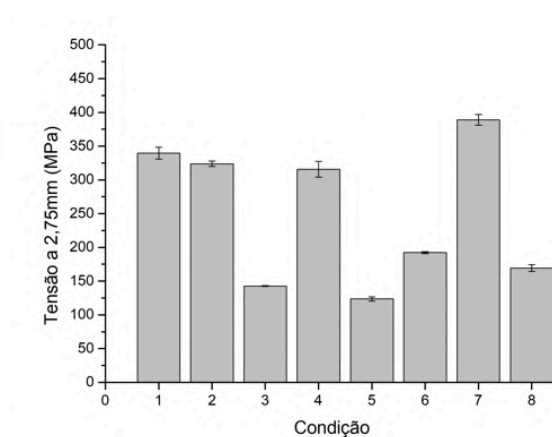
Figura 73 – Compressão aplicado nas peças destinadas a aferição



Fonte: Do autor (2025).

A figura 74 abaixo mostra o gráfico de resultado gerado a partir da tensão aplicada a uma deformação de 2,75mm em cada grupo de peças.

Figura 74 –Gráfico tensão aplicada nas peças



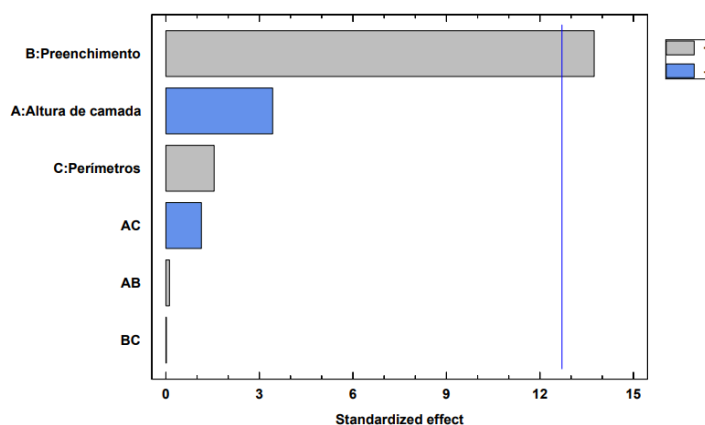
Fonte: Do autor (2025).

Os resultados obtidos com esse gráfico evidenciam que as condições 3, 5, 6 e 8 apresentam menor tensão suportada, com o valor máximo de 200 Mpa, esses grupos são as peças de 50% de preenchimento. Já os outros grupos 1, 2, 4 e 7 são as peças com 100% de preenchimento, esses obtiveram as maiores tensões suportadas com o valor máximo de até 400 Mpa.

Apesar do preenchimento ter sido o fator com maior impacto na resistência à compressão das peças, a altura de camada se mostrou o segundo parâmetro mais relevante. Entre os grupos com 50% de preenchimento, o grupo 6 apresentou o melhor desempenho. Já entre os grupos com 100%, o destaque foi o grupo 7. Ambos os grupos possuem altura de camada de 0,12 mm, o que sugere a influência direta desse parâmetro na melhoria do desempenho mecânico.

A figura 75 a seguir ilustra através de um gráfico de pareto a influência de cada fator variado nas impressões

Figura 75—Gráfico de pareto das variáveis



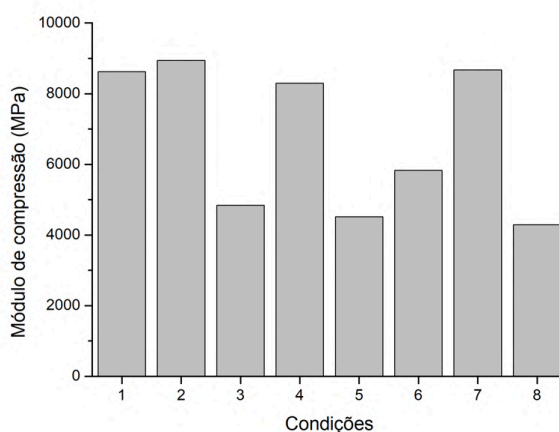
Fonte: Do autor (2025).

Como já citado, o fator B: Preenchimento foi o que mais impactou nos resultados. Em seguida, o fator A: Altura de camada obteve influência considerável, mas significativamente menor do que o preenchimento. O fator C: Perímetro mostra efeito limitado. As interações entre os fatores AC, AB e BC apresentaram efeitos residuais ou irrelevantes dentro da análise, o que indica que os fatores atuam de forma mais isolada do que combinada neste contexto.

Esses dados reforçam o que já havia sido observado nos resultados dos ensaios de compressão: o preenchimento é a variável dominante no desempenho mecânico das peças, seguido por uma influência secundária, mas ainda relevante, da altura de camada. Já os demais parâmetros e suas interações não tiveram impacto estatisticamente significativo.

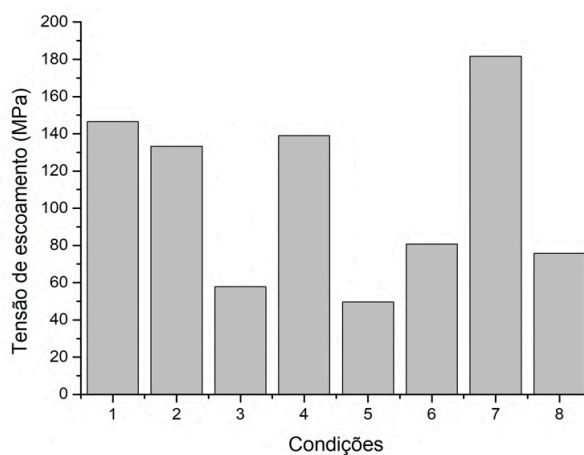
O gráfico apresentado na Figura 76 exibe os valores de compressão obtidos para cada condição avaliada. As condições 1, 2, 4 e 7 apresentaram os maiores resultados, todos acima de 8000 MPa, indicando maior rigidez do material frente à carga compressiva. Em contraste, as condições 3, 5 e 8 registraram os menores valores, entre 4500 e 5000 MPa, o que reflete uma menor resistência à deformação elástica. A condição 6 ficou em um patamar intermediário.

Figura 76 – Módulo de compressão



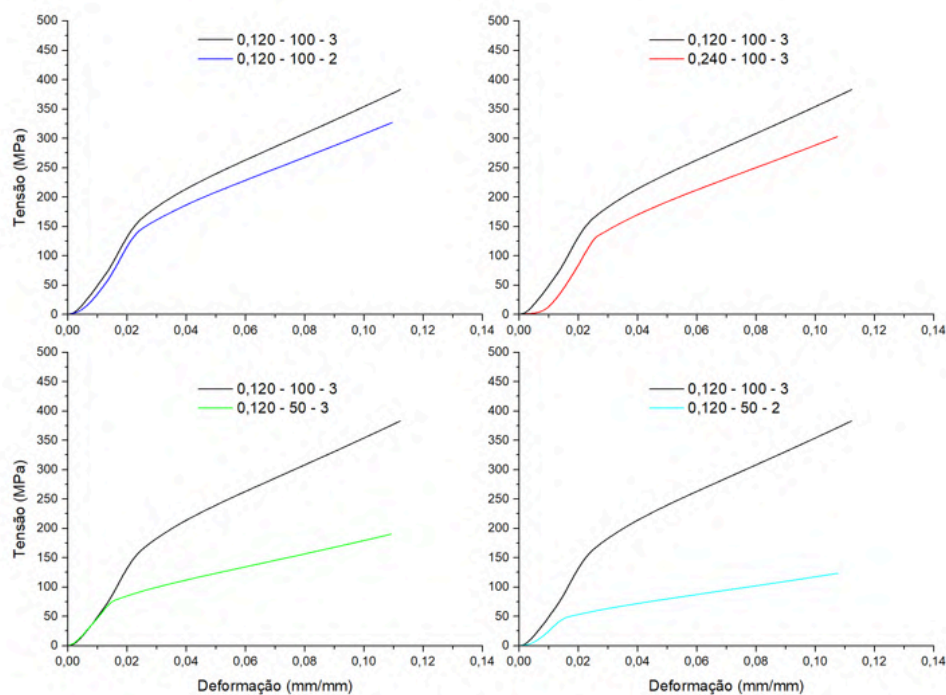
Fonte: Do autor (2025).

Analisando o gráfico apresentado na Figura 77, referente à tensão de escoamento, observa-se que a condição 7 foi a que atingiu o maior valor, ultrapassando 180 MPa. Isso indica que essa configuração foi a mais resistente ao início da deformação plástica. Por outro lado, as condições 5 e 3 apresentaram os menores valores, com tensão de escoamento inferior a 60 MPa. As demais condições seguiram um padrão coerente com o nível de preenchimento adotado: os grupos com 100% de preenchimento registraram os maiores valores, enquanto os com 50% apresentaram desempenho inferior. De forma geral, as variações de desempenho entre os grupos estão fortemente associadas ao nível de preenchimento e à altura de camada utilizada em cada configuração.

Figura 77 – Tensão de escoamento

Fonte: Do autor (2025).

As curvas dos quatro gráficos (Figura 78) ajudam a visualizar o impacto dos parâmetros de impressão na resistência das peças, sempre usando o grupo 7 como referência (linha preta), que combina 100% de preenchimento, altura de camada de 0,120 mm e três perímetros.

Figura 78– Curvas de deformação das condições

Fonte: Do autor (2025).

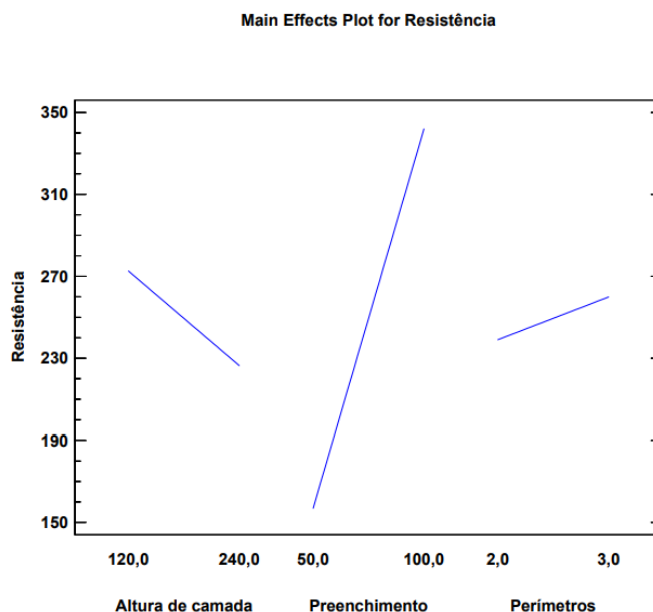
No gráfico superior esquerdo, a comparação entre os grupos 7 e 1 mostra que, ao manter altura de camada e preenchimento constantes, mas reduzindo o número de perímetros de 3 para 2, há uma leve queda na tensão ao longo da deformação. A diferença existe, mas não é tão significativa, o que indica que os perímetros têm um papel mais secundário nesse contexto.

Já no gráfico superior direito, a comparação entre os grupos 7 e 4 destaca o efeito da espessura de camada. A única mudança foi o aumento de 0,120 mm para 0,240 mm, e isso já foi suficiente para reduzir de forma considerável a resistência. Camadas mais finas tendem a garantir melhor adesão entre as passadas e, como reflexo, uma capacidade de carga superior.

O gráfico inferior esquerdo, o grupo 6 (com 50% de preenchimento) tem desempenho visivelmente inferior ao grupo 7, mesmo mantendo os mesmos parâmetros de camada e perímetro. Isso reforça que o preenchimento é um dos principais fatores que afetam a capacidade de carga das peças.

Por fim, o gráfico inferior direito mostra o grupo 8, que combina menor preenchimento (50%) com menor perímetro (2). Como esperado, é o que apresenta menor resistência entre todos os comparados. A diferença em relação ao grupo 7 é clara em toda a curva, desde o início da deformação até o escoamento, reforçando os efeitos desses dois parâmetros.

A Figura 79 mostra como cada um dos parâmetros avaliados impactou diretamente na resistência das peças. O gráfico apresenta os efeitos principais isolados de altura de camada, preenchimento e número de perímetros.

Figura 79– Resistência proporcional das variáveis aplicadas

Fonte: Do autor (2025).

O preenchimento, como já era esperado, foi o fator com maior influência sobre a resistência das peças. A diferença entre os valores médios é bastante expressiva: enquanto as amostras com 50% de preenchimento apresentaram resistência média em torno de 175 MPa, aquelas com 100% atingiram cerca de 325 MPa. Esse resultado reforça o que já havia sido observado nos dados e gráficos anteriores, confirmando que o preenchimento total proporciona um ganho significativo de resistência mecânica.

A altura da camada também demonstrou impacto, embora em menor escala. As peças fabricadas com 0,120 mm de altura apresentaram resistência média de aproximadamente 270 MPa, contra 235 MPa nas peças com 0,240 mm. Esse comportamento sugere que camadas mais finas favorecem uma melhor adesão entre as passadas, resultando em maior estabilidade estrutural.

Por fim, o número de perímetros teve o menor efeito entre os três fatores. Ainda assim, peças com três perímetros mostraram leve vantagem em relação às com dois, indicando que, mesmo com impacto mais discreto, esse parâmetro pode contribuir positivamente quando combinado com os demais.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo focado na análise da resistência mecânica das peças impressas em aço inox 316L produzidas via MFFF. Durante a execução do projeto, desafios relacionados à impressão, remoção de ligantes e sinterização foram enfrentados — desde configurações e aprendizados sobre o uso dos equipamentos até aspectos mais técnicos, como os parâmetros e procedimentos de tratamento das peças. Esses desafios contribuíram diretamente para o amadurecimento metodológico do trabalho e para uma compreensão mais ampla sobre o processo MFFF.

Adicionalmente, por se tratar de um trabalho prático e experimental, diversas rodadas de testes e falhas ocorreram, tanto nas etapas de impressão quanto na preparação eficiente da solução de ácido utilizada na remoção do ligante durante o debinding.

Entre os objetivos do trabalho, foi possível medir a contração dimensional das peças após a sinterização e confirmar que a variação apresentada pelo processo como um todo. Também foi realizada a avaliação de densidade e porosidade por tomografia computadorizada, que evidenciou uma relação direta entre os níveis de preenchimento e a quantidade de vazios internos, com destaque para o grupo de 50%, que apresentou maior índice de porosidade.

Por fim, os ensaios mecânicos de compressão e dureza confirmaram o comportamento dúctil do material e permitiram quantificar o desempenho mecânico em diferentes condições, com destaque para o grupo com 100% de preenchimento e camada de 0,12 mm, que apresentou os melhores resultados.

A partir dos objetivos específicos, foi possível identificar que o preenchimento é o fator com maior impacto sobre o desempenho mecânico das peças, seguido pela altura de camada. Os resultados evidenciaram a diferença entre os grupos de 50% e 100%, principalmente nos valores de tensão de escoamento e no módulo de compressão.

Com base nos dados obtidos, conclui-se que o processo MFFF se mostra versátil na entrega de resistência mecânica em peças metálicas fabricadas por manufatura aditiva. A variação no preenchimento impacta diretamente no

desempenho final do componente, e, dependendo das especificações exigidas pela aplicação, a tecnologia demonstra viabilidade prática e funcional.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, seria interessante explorar outros parâmetros e peças de impressão, para entender se esses fatores também impactam de forma significativa o desempenho mecânico das peças. Além disso, avaliar o comportamento das amostras sob diferentes tipos de carregamento, como tração e flexão, já que esse trabalho teve foco exclusivo na compressão.

Outra possibilidade viável é aprofundar a análise metalográfica das peças, buscando observar de forma mais detalhada como as configurações de impressão influenciam na microestrutura interna. Testes com diferentes materiais de suporte também podem ser úteis para investigar a qualidade superficial e a aderência das primeiras camadas durante a impressão.

Por fim, aplicar essa mesma metodologia utilizando outro tipo de filamento metálico, como o Ultrafuse 17-4PH, permitiria fazer uma comparação direta entre ligas e ampliar a compreensão sobre o potencial de aplicação do processo MFFF em diferentes contextos.

REFERÊNCIAS

ALYAMMAHI, A. et al. Evaluation of dimensional accuracy of FFF metallic parts using 3D scanning techniques. *Materials*, Basel, v. 16, n. 21, p. 7505, 2023.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E9-09: Standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature. Reapproved 2018. West Conshohocken, PA: ASTM, 2018.

BAIT-MANSOUR, A. et al. Effect of infill and print orientation on the shrinkage and mechanical properties of metal fused filament fabricated parts. *Materials*, Basel, v. 12, n. 24, p. 4122, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12244122>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/24/4122>. Acesso em: 7 jul. 2025.

BASF. Ultrafuse® 316L Technical Data Sheet. Forward AM, 2023a. Disponível em: <https://forward-am.com>. Acesso em: 21 jun. 2025.

BASF. Ultrafuse® 316L User Guidelines. Forward AM, 2023b. Disponível em: <https://forward-am.com>. Acesso em: 21 jun. 2025.

BASF. Debinding and Simulation Guidelines – Ultrafuse® 316L. Forward AM, 2022.

BROXTERMANN, S. et al. Compressive strength of syntactic metal foams made by pressure infiltration of expanded perlite in aluminium. *Journal of Alloys and Compounds*, Amsterdam, v. 707, p. 343–354, 2017.

CONDRUZ, M. R.; PARASCHIV, A.; PUSCASU, C. Heat treatment influence on hardness and microstructure of ADAM manufactured 17-4 PH. *TURBO*, v. 5, n. 2, p. 39–45, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/332423408>. Acesso em: 7 jul. 2025.

COSTA, E. W. S. et al. Metal FFF: Challenges, materials, and post-processing. *Additive Manufacturing Letters*, v. 3, p. 100122, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100122>.

DE LIMA, R. G. et al. Thermal Post-Processing Effects on Dimensional Accuracy of Metal FFF Parts. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 5, n. 4, p. 93–100, 2021.

FORWARD AM. Process Guidelines for Ultrafuse® 316L. BASF 3D Printing Solutions GmbH, 2022.

GALATI, M.; MINETOLA, P. Influence of printing parameters on surface roughness of metallic parts produced by bound metal deposition. *Additive Manufacturing*,

Amsterdam, v. 28, p. 600–610, 2019. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.012>.

GERMAN, Randall M. Sintering Theory and Practice. New York: Wiley-Interscience, 1996.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2. ed. New York: Springer, 2015.

PETERSMANN, H. et al. Sintering Behavior and Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Produced via Bound Metal Deposition. Materials Science Forum, v. 1016, p. 291–296, 2022.

SANTOS, F. M. dos et al. Segurança ocupacional em processos de manufatura aditiva com metais: uma análise comparativa entre SLM e MFFF. Revista Brasileira de Engenharia de Fabricação, v. 10, n. 2, p. 85–92, 2021.

VEIT, Douglas Rafael. *Impactos da manufatura aditiva nos sistemas produtivos e suas repercussões nos critérios competitivos*. 2018. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018. Disponível em:
<https://repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/6927>. Acesso em: 4 jul. 2025.

ALYAMMAHI, A. et al. Evaluation of dimensional accuracy of FFF metallic parts using 3D scanning techniques. *Technologies*, [S. l.], v. 12, n. 12, p. 267, 2023. DOI: [10.3390/technologies12120267](https://doi.org/10.3390/technologies12120267). Disponível em:
<https://www.mdpi.com/2227-7080/12/12/267>. Acesso em: 17 jul. 2025.

GÜDEN, Mustafa et al. The strain rate sensitive flow stresses and constitutive equations of a selective-laser-melt and an annealed-rolled 316L stainless steel: a comparative study. *Materials Science & Engineering A*, [S. l.], v. 838, p. 142743, 2022. DOI: [10.1016/j.msea.2022.142743](https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142743). Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509322001514>. Acesso em: 17 jul. 2025.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Medições peças impressas

Medições peças impressas										
Código	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Diametro Final	Altura 1	Altura 2	Altura 3	Altura Final	Preset da impressão	
P1	15,73	15,68	15,67	15,68	29,93	29,93	29,96	29,93		1
P2	15,66	15,71	15,68	15,68	29,89	29,9	29,94	29,9		1
P3	15,71	15,73	15,57	15,71	29,93	29,94	29,93	29,93		1
P4	15,71	15,71	15,71	15,71	29,95	29,94	29,97	29,95		1
P5	15,66	15,66	15,67	15,66	29,92	29,93	29,92	29,92		1
P6	15,68	15,69	15,68	15,68	29,93	29,95	29,94	29,94		1
P7	15,63	15,63	15,62	15,63	29,92	29,97	29,94	29,94		2
P8	15,67	15,66	15,65	15,66	29,96	29,95	29,97	29,96		2
P9	15,68	15,77	15,71	15,71	29,94	29,92	29,92	29,92		2
P10	15,69	15,71	15,72	15,71	29,96	29,95	29,97	29,96		2
P11	15,68	15,77	15,71	15,71	29,94	29,96	29,94	29,94		2
P12	15,67	15,79	15,74	15,74	29,94	29,97	29,91	29,94		2
P13	15,7	15,67	15,62	15,67	29,92	29,92	29,91	29,92		3
P14	15,62	15,62	15,6	15,62	29,95	29,99	29,93	29,95		3
P15	15,58	15,57	15,57	15,57	29,92	29,97	29,94	29,94		3
P16	15,59	15,59	15,58	15,59	29,93	29,91	29,92	29,92		3
P17	15,56	15,58	15,57	15,57	29,9	29,93	29,91	29,91		3
P18	15,68	15,55	15,6	15,6	29,95	29,96	29,96	29,96		3
P19	15,65	15,64	15,61	15,64	29,91	29,93	29,92	29,92		4
P20	15,68	15,67	15,69	15,68	29,98	29,98	30	29,98		4
P21	15,66	15,66	15,65	15,66	29,92	29,95	29,93	29,93		4
P22	15,62	15,66	15,68	15,66	29,94	29,94	29,93	29,94		4
P23	15,66	15,68	15,64	15,66	29,92	29,93	29,94	29,93		4
P24	15,65	15,6	15,65	15,65	29,92	29,93	29,93	29,93		4
P25	15,67	15,6	15,6	15,6	29,97	29,94	29,95	29,95		5
P26	15,59	15,55	15,6	15,59	29,95	29,96	29,95	29,95		5
P27	15,6	15,59	15,6	15,6	29,99	30,02	29,99	29,99		5
P28	15,51	15,6	15,6	15,6	30,01	29,93	29,95	29,95		5
P29	15,58	15,59	15,58	15,58	29,97	29,96	29,93	29,96		5
P30	15,6	15,6	15,61	15,6	29,94	29,95	30,02	29,95		5
P31	15,61	15,6	15,6	15,6	29,94	29,99	29,93	29,94		6
P32	15,6	15,61	15,61	15,61	29,97	29,92	29,97	29,97		6
P33	15,61	15,53	15,62	15,61	29,93	29,92	29,94	29,93		6
P34	15,61	15,61	15,61	15,61	29,93	29,93	29,92	29,93		6
P35	15,59	15,58	15,56	15,58	29,99	29,92	29,93	29,93		6
P36	15,61	15,67	15,69	15,67	29,92	29,94	29,91	29,92		6
P37	15,56	15,72	15,68	15,68	30,01	29,91	29	29,91		7
P38	15,69	15,68	15,68	15,68	29,95	29,97	29	29,95		7
P39	15,64	15,67	15,65	15,65	29,89	29,94	29,97	29,94		7
P40	15,66	15,67	15,67	15,67	29,98	29,95	29,93	29,95		7
P41	15,65	15,67	15,67	15,67	29,97	29,99	29,94	29,97		7
P42	15,68	15,68	15,69	15,68	29,97	29,93	29,93	29,93		7
P43	15,62	15,59	15,56	15,59	29,94	29,91	29,95	29,94		8
P44	15,58	15,59	15,59	15,59	29,98	29,96	29,97	29,97		8
P45	15,58	15,65	15,6	15,6	29,94	29,94	29,95	29,94		8
P46	15,58	15,58	15,59	15,58	29,94	29,99	30	29,99		8
P47	15,71	15,64	15,56	15,64	29,95	29,97	29,95	29,95		8
P48	15,57	15,53	15,53	15,53	29,99	29,97	29,95	29,97		8

APÊNDICE B – Catálogo de informações gerais peças impressas

Catálogo peças impressas												
Grupo	Código	Diâmetro I	Altura I	Diâmetro F	Altura F	Peso pré debinding	Peso pós debinding	Peso Pós sinterização	Densidade (g/cm³)	Debinding Rate %	Contração Diâmetro	Contração Altura
1 P1	15.68	29.93	24.39	13.13	24.39	27	24.1	23.83	0.00715939918	0.1074074074	16.2627551	18.50985633
1 P2	15.68	29.9	24.39	13.12	24.39	26.95	24.01	23.77	0.007208747768	0.109690991	16.32653061	18.42809365
1 P3	15.71	29.93	24.32	13.15	24.32	27.02	24.05	23.79	0.007202603113	0.1099185788	16.29535328	18.74373538
1 P4	15.71	29.95	24.4	13.15	24.4	26.97	24.06	23.81	0.007180268464	0.1082684464	16.29535328	18.53088481
1 P5	15.66	29.92	24.36	13.15	24.36	27.01	24.07	23.8	0.007193798784	0.1088485746	16.02809706	18.5828877
1 P6	15.68	29.94	24.33	13.15	24.33	26.93	23.89	23.74	0.007184511076	0.1091719372	16.13520408	18.73747495
2 P7	15.63	29.84	24.66	13.24	24.66	27.21	24.27	24.02	0.007074798568	0.1080485116	15.79110685	17.63527054
2 P8	15.66	29.96	24.64	13.23	24.64	27.31	24.32	24.06	0.007028485549	0.1094837056	15.07024266	17.75700935
2 P9	15.71	29.92	24.57	13.23	24.57	27.21	24.27	24.02	0.00711451899	0.1080485116	15.78612349	17.88101604
2 P10	15.71	29.96	24.66	13.32	24.66	27.36	24.38	24.11	0.007016262147	0.1089181187	15.21323997	17.68025367
2 P11	15.71	29.94	24.51	13.22	24.51	27.26	24.29	24.03	0.007142622013	0.1089508437	15.84977721	18.13627255
2 P12	15.74	29.94	24.56	13.22	24.56	27.18	24.25	24	0.007119181867	0.1077988228	16.01016518	17.96927188
3 P13	15.67	29.92	24.95	13.17	24.95	18.09	16.14	15.97	0.004698648258	0.1077943615	15.95405233	16.61096257
3 P14	15.62	29.95	24.96	13.25	24.96	18.1	16.14	15.96	0.004637315756	0.1082872928	15.17285531	16.66110184
3 P15	15.57	29.94	24.97	13.2	24.97	18.07	16.12	15.98	0.004676495156	0.1079136691	15.22157996	16.5988664
3 P16	15.59	29.92	24.98	13.26	24.98	18.13	16.19	16.02	0.004644010021	0.1070049641	14.94547787	16.51069519
3 P17	15.57	29.91	24.92	13.26	24.92	18.11	16.12	15.95	0.004634850389	0.109884042	14.83622351	16.68338348
3 P18	15.6	29.96	24.96	13.21	24.96	18.09	16.12	15.95	0.004662518734	0.108899447	15.32051282	16.68891856
4 P19	15.64	29.92	24.61	13.27	24.61	27.29	24.29	24.06	0.007068907231	0.1099303774	15.15345269	17.7473362
4 P20	15.68	29.98	24.66	13.28	24.66	27.37	24.37	24.14	0.007067375426	0.1096909061	15.30612245	17.74516344
4 P21	15.66	29.93	24.66	13.34	24.66	27.29	24.33	24.1	0.006992338265	0.1084646391	14.81481481	17.60775142
4 P22	15.66	29.94	24.68	13.27	24.68	27.31	24.32	24.07	0.007051787356	0.1094837056	15.26181354	17.56847027
4 P23	15.66	29.93	24.52	13.21	24.52	27.27	24.29	24.03	0.007150522678	0.1092775844	15.6449553	18.07550952
4 P24	15.65	29.93	24.67	13.29	24.67	27.34	24.35	24.11	0.007045117125	0.1093636569	15.0798722	17.57434013
5 P25	15.6	29.95	25.03	13.1	24.97	17.17	16.28	15.11	0.00448784408	0.1091015169	15.65105837	16.42737896
5 P26	15.59	29.95	25.03	13.15	25.03	17.14	16.27	15.12	0.00444784408	0.1091015169	15.65105837	16.42737896
5 P27	15.6	29.99	24.99	13.1	24.99	17.14	16.29	15.11	0.004486066793	0.1079346258	16.02564103	16.6722407
5 P28	15.6	29.95	25.11	13.2	25.11	17.07	16.27	15.1	0.004394328208	0.105448147	15.38461538	16.6026711
5 P29	15.58	29.96	25.02	13.2	25.02	17.15	16.26	15.1	0.004410315144	0.1102040816	15.27599487	16.48865154
5 P30	15.6	29.95	25.04	13.1	25.04	17.18	16.27	15.14	0.004485988024	0.1111757858	16.02564103	16.39389898
6 P31	15.6	29.94	24.45	13.03	24.45	18.12	16.18	16.02	0.004913658113	0.1070640177	16.47435897	18.33667335
6 P32	15.61	29.97	24.55	13.1	24.55	18.2	16.19	16.03	0.004844506615	0.1104395604	16.07943626	18.08425142
6 P33	15.61	29.93	24.43	13.04	24.43	18.13	16.18	16	0.004940401179	0.1086596801	16.46380525	18.37621116
6 P34	15.61	29.93	24.52	13.08	24.52	18.08	16.14	15.98	0.004850102756	0.107300885	16.20755926	18.07550952
6 P35	15.58	29.93	24.46	13.07	24.46	18.07	16.13	15.97	0.004866395557	0.1073602656	16.11039795	18.27597728
6 P36	15.67	29.92	24.47	13.06	24.47	18.12	16.15	15.99	0.004877960274	0.1087196468	16.65603063	18.21524064
7 P37	15.68	29.91	24.29	13.08	24.29	27.38	24.53	24.28	0.007439021232	0.1040905771	16.58163265	18.78970244
7 P38	15.68	29.95	24.3	13.12	24.3	27.34	24.54	24.31	0.007399819627	0.1024140054	16.32653061	18.86477462
7 P39	15.65	29.94	24.23	13.08	24.23	27.35	24.53	24.3	0.007463585119	0.1031078611	16.42172524	19.07147629
7 P40	15.67	29.95	24.27	13.11	24.27	27.35	24.63	24.25	0.007401959455	0.1031078611	16.33694959	18.56464157
7 P41	15.67	29.97	24.29	13.1	24.29	27.32	24.59	24.32	0.0074298542	0.09992679356	16.40076579	18.9228562
7 P42	15.68	29.93	24.31	13.11	24.31	27.42	24.59	24.34	0.00741720616	0.1032093363	16.39030612	18.77714668
8 P43	15.59	29.94	24.69	13.12	24.69	17.16	16.29	15.14	0.004535730413	0.108974359	15.84348942	17.53507014
8 P44	15.59	29.97	24.73	13.1	24.73	17.21	16.33	15.15	0.004545231877	0.1092388146	15.97177678	17.48415082
8 P45	15.6	29.94	24.58	13.05	24.58	17.17	16.3	15.14	0.00460203666	0.1089108911	16.34615385	17.90247161
8 P46	15.58	29.99	24.75	13.16	24.75	17.15	16.27	15.15	0.004500240975	0.1096269913	15.3273427	17.47249083
8 P47	15.64	29.95	24.57	13.12	24.57	17.12	16.26	15.09	0.004542830489	0.1086448798	16.11253197	17.96327212
8 P48	15.53	29.97	24.72	13.15	24.72	17.11	16.25	15.09	0.004494686302	0.1087083577	15.32517708	17.51751752

ANEXOS

ANEXO A – Data Sheet Ultrafuse 316L




Technical Data Sheet

Ultrafuse 316L

Date / Revised: 02.07.2021
Version No.: 1.1

General information

Components

316L stainless steel composite filament for Fused Filament Fabrication.

Product Description

Ultrafuse® 316L is a Metal-polymer composite filament to produce metal components in a stainless steel type 316L using standard FFF printer systems and subsequently an industry standard debinding and sintering process. The filament has a non-slip surface allowing its application in any Bowden or direct drive extruder. Its high flexibility allows it to be funnelled through complex idler pulleys as well as many guide roller filament transportation systems in any printer.

Delivery form and warehousing

Ultrafuse® 316L filament should be stored at 15 - 25°C in its originally sealed package in a clean and dry environment. If the recommended storage conditions are observed the products will have a minimum shelf life of 12 months.

Product safety

Recommended: Process materials in a well ventilated room, or use professional extraction systems. For further and more detailed information please consult the corresponding material safety data sheets.

For your information

Standards: DIN 1.4404, X 2 CrNiMo 17 13 2, AISI 316L; UNS S31603

Notice

The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application of our product, these data do not relieve processors from carrying out their own investigations and tests; neither do these data imply any guarantee of certain properties, nor the suitability of the product for a specific purpose. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights etc. given herein may change without prior information and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.

The safety data given in this publication is for information purposes only and does not constitute a legally binding Material Safety Data Sheet (MSDS). The relevant MSDS can be obtained upon request from your supplier or you may contact BASF 3D Printing Solutions GmbH directly at sales@basf-3dps.com.

BASF 3D Printing Solutions BV
sales@basf-3dps.com
www.forward-am.com

Technical Data Sheet for Ultrafuse 316L

Version No. 1.1

Recommended 3D-Print processing parameters

Nozzle Temperature	230 – 250 °C / 446 – 482 °F
Build Chamber Temperature	-
Bed Temperature	90 – 120 °C / 194 – 248 °F
Bed Material	Glass + approved glues* / polyimide tape (*Dimafix® suggested)
Nozzle Diameter	≥ 0.4 mm
Print Speed	15 - 50 mm/s

Drying Recommendations

Drying recommendations to ensure printability	316L is in a printable condition, drying is not necessary
---	---

General Properties

Standard

Sintered Part Density	7850 kg/m ³ / 490.1 lb/ft ³	ISO 1183-1
-----------------------	---	------------

Filament Properties

Filament Diameter	1.75 mm	2.85 mm
Tolerance	±0.050 mm	±0.075 mm
Roundness	±0.050 mm	±0.075 mm
Bending Radius	5 ± 1 mm	10 ± 3 mm
Length per Spool	250 m	95 m
Weight per Spool	3 kg	3 kg

Technical Data Sheet for Ultrafuse 316L

Version No. 1.1

Mechanical Properties | sintered


Print direction	Standard	XY Flat	ZX Upright
Tensile strength	ISO 6892-1 ¹	561 MPa / 81.4 ksi	521 MPa / 75.6 ksi
Elongation at Break	ISO 6892-1 ¹	53 %	36 %
Yield Strength, R _{p0.2}	ISO 6892-1 ¹	251 MPa / 36.4 ksi	234 MPa / 33.9 ksi
Impact Strength Charpy (notched)	ISO 148-1 ²	111 kJ/m ²	-
Vickers Hardness	ISO 6507-1	128 HV10	128 HV10

¹ Specimen shape Form E26x20 according to DIN 50125
² V-notched

ANEXO B – Máquinas da Metal Fuse

