

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

EDUARDO OSVINO SIPPEL

**AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DE PEÇAS PRODUZIDAS COM IMPRESSÃO 3D
UTILIZANDO O MÉTODO MFFF**

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**

EDUARDO OSVINO SIPPEL

**AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DE PEÇAS PRODUZIDAS COM IMPRESSÃO 3D
UTILIZANDO O MÉTODO MFFF**

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. Dr. Aurélio da Costa Sabino Netto

Coorientador:
Prof. Dr. Luiz Fernando Segalin de Andrade

FLORIANÓPOLIS, 2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca do IFSC.

Sippel, Eduardo Osvino

AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DE PEÇAS PRODUZIDAS COM IMPRESSÃO
3D UTILIZANDO O MÉTODO MFFF / Eduardo Osvino Sippel ;
orientador, Aurélio da Costa Sabino Netto, coorientador,
Luiz Fernando Segalin de Andrade, 2025.

96 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. Manufatura Aditiva. 3.
Impressão 3D. 4. Fabricação por Filamento Fundido com
Metal. 5. Ultrafuse 316L. 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 DIMENSIONAL DE PEÇAS PRODUZIDAS COM IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO O MÉTODO MFFF

EDUARDO OSVINO SIPPEL

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em Mecatrônica 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, 28 de Julho, 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **AURELIO DA COSTA SABINO NETTO**
Data: 25/08/2025 10:16:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr.

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ FERNANDO SEGALIN DE ANDRADE**
Data: 21/08/2025 17:59:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luiz Fernando Segalin de Andrade, Dr.

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE ROBERTO DE SOUSA**
Data: 21/08/2025 15:00:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Andre Roberto de Sousa, Dr.

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO NIEHUES SCHLICKMANN**
Data: 21/08/2025 13:56:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marcelo Niehues Schlickmann, Dr.

Para minha família, especialmente minha avó.

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso representa muito mais do que o fim de uma etapa acadêmica: é a concretização de um sonho que só foi possível graças ao apoio e à presença de pessoas especiais ao longo dessa caminhada. A todos que fizeram parte dessa história, deixo aqui minha gratidão sincera.

Agradeço primeiramente à minha família, pelo apoio incondicional durante todos esses anos. Por acreditarem em mim, me incentivarem a seguir com os estudos, mesmo quando isso exigiu estar longe de casa, e por oferecerem sempre amor, suporte emocional e segurança nos momentos mais desafiadores.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado nos momentos bons e difíceis. Aos que estão comigo desde sempre, mesmo em diferentes cantos do Brasil, e aos que tive a alegria de conhecer durante a graduação: cada conversa, cada risada e cada momento de apoio tornaram esse caminho mais leve e memorável. A amizade e o incentivo de vocês foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente.

Aos professores e professoras que me acompanharam ao longo da graduação, deixo um agradecimento especial. Pela dedicação, paciência, ensinamentos e pelo exemplo profissional e humano que transmitiram em cada aula. Em especial, agradeço aos docentes que me orientaram mais de perto neste trabalho, contribuindo com seu conhecimento, sugestões e disponibilidade ao longo do processo. Aos demais professores, pelo papel na minha formação acadêmica e pelo comprometimento em transmitir o conhecimento necessário para que eu pudesse evoluir como profissional.

Aos colegas de curso, pelo companheirismo, pelas trocas de experiências e pelos desafios superados juntos, que transformaram o ambiente de aprendizado em algo muito mais enriquecedor.

Este trabalho não é apenas um resultado acadêmico, mas o reflexo de anos de aprendizado, crescimento e dedicação. Cada pessoa que cruzou meu caminho deixou uma marca que levarei comigo para além da universidade.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, meu mais sincero e profundo agradecimento.

Muito obrigado!

Não espere o futuro mudar tua vida, porque o futuro é a consequência do presente.
- Racionais MC's

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento dimensional de peças metálicas fabricadas por Manufatura Aditiva por Filamento Fundido com Metal (*Metal Fused Filament Fabrication* – MFFF), utilizando o filamento Ultrafuse 316L da BASF. A pesquisa explora as três principais etapas envolvidas no processo, impressão, *debinding* e sinterização, buscando compreender de que forma cada uma delas influencia as alterações dimensionais nas peças ao longo do processo. Para isso, foram definidos três parâmetros que seriam avaliados e alterados: a altura de camada, porcentagem de preenchimento e número de perímetros, organizados em um planejamento fatorial completo 2^3 , resultando em 24 amostras. As peças foram produzidas no sistema Raise3D *MetalFuse* e medidas com uma máquina de medição por coordenadas (CMM) antes e depois das etapas térmicas. Com os dados obtidos, foram calculadas as taxas de retração e as variações geométricas, além de serem realizadas análises estatísticas para investigar o impacto dos parâmetros definidos sobre a estabilidade dimensional. A caracterização também contou com a pesagem das amostras e ensaios de dureza. De modo geral, observou-se que as maiores variações ocorreram ao longo do eixo Z, especialmente em regiões com ressaltos e furos, enquanto áreas planas em contato com a base apresentaram menor distorção. Configurações com maior densidade de preenchimento e menor altura de camada demonstraram melhor desempenho dimensional. A análise das medições permitiu identificar tendências relevantes e sugerir compensações geométricas que podem ser incorporadas em futuras etapas de projeto. Com isso, o trabalho contribui com dados experimentais que fortalecem o controle dimensional no MFFF, reforçando seu potencial para aplicações industriais que exigem maior precisão geométrica.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. MFFF, Retração Dimensional. Medição por Coordenadas. Ultrafuse 316L.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the dimensional behavior of metallic parts manufactured through Metal Fused Filament Fabrication (MFFF) using Ultrafuse 316L filament. The research investigates the three main stages of the process, printing, debinding, and sintering, in order to understand how each contributes to dimensional changes throughout production. Three slicing parameters were defined: layer height, infill percentage, and number of perimeters, organized into a full factorial design 2^3 , resulting in 24 samples. The parts were printed using the Raise3D MetalFuse system and measured with a coordinate measuring machine (CMM) before and after thermal processing. Based on the collected data, shrinkage rates and geometric deviations were calculated, and statistical analyses were conducted to assess the influence of the process parameters on dimensional stability. The study also included sample weighing and hardness testing to support material characterization. Overall, the most significant variations were observed along the Z-axis, particularly in areas with protrusions and holes, whereas flat surfaces in contact with the build platform showed greater dimensional stability. Configurations with higher infill and lower layer height tended to perform better in terms of dimensional consistency. The measurements revealed key trends and enabled the proposition of geometric compensations for future design strategies. Therefore, this work provides experimental data that contributes to the advancement of dimensional control in MFFF, reinforcing its potential for industrial applications requiring geometric precision.

Keywords: Additive Manufacturing. MFFF. Dimensional Shrinkage. Coordinate Measuring. Ultrafuse 316L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do MFFF	23
Figura 2 – Peça verde impressa via MFFF (acima) e esquema da sua micro- estrutura (abaixo)	25
Figura 3 – Peça marrom (acima) e representação da microestrutura (abaixo)	26
Figura 4 – Peça durante a Sinterização (a esquerda) e Peça após Sinteriza- ção (a direita)	27
Figura 5 – Filamento Ultrafuse 316L	29
Figura 6 – Influência da densidade do preenchimento	30
Figura 7 – Tipos de preenchimento interno utilizados no estudo	31
Figura 8 – Imagens escaneadas das peças fabricadas com diferentes mate- riais	32
Figura 9 – Máquinas do sistema MetalFuse	34
Figura 10 – Etapas do Processo de MFFF	35
Figura 11 – Vista por dentro do Forno de <i>Debinding</i>	36
Figura 12 – Forno de <i>Debinding</i>	37
Figura 13 – Disposição dentro do forno de Sinterização	38
Figura 14 – Fenômeno de retração dentro do forno	38
Figura 15 – Forno de Sinterização	39
Figura 16 – Filamento Ultrafuse 316L com peça de teste	40
Figura 17 – Corpo de Prova utilizado como referência	40
Figura 18 – Corpo de Prova	41
Figura 19 – Primeiro cubo de calibração impresso	43
Figura 20 – Problemas de deslocamento entre camadas nas primeira impres- sões	44
Figura 21 – Primeira peça do estudo impressa	44
Figura 22 – Interface do <i>software</i> IdeaMaker for Metal	45
Figura 23 – Impressora Forge 1	46
Figura 24 – Estratégia de espaçamento entre as amostras	47
Figura 25 – Disposição das peças verdes em cima da bandeja	48
Figura 26 – Organização dentro do forno	49
Figura 27 – Forno de <i>Debinding</i>	49
Figura 28 – Estado inicial do ácido e o estado final preparada para a mistura com o álcool	51
Figura 29 – Forno de Sinterização	52
Figura 30 – Peças pós Sinterização	53
Figura 31 – Medição com relógio comparador	55
Figura 32 – Coleta das dimensões com a CMM das peças verdes	56

Figura 33 – Coleta das dimensões com a CMM das peças brancas	57
Figura 34 – Balança de precisão digital KN Waagen	58
Figura 35 – Amostras polidas utilizadas no ensaio de dureza Vickers	60
Figura 36 – Durômetro Rockwell adaptado para Vickers e a peça no posicio- nada no local	60
Figura 37 – Microdurômetro utilizado	61
Figura 38 – Formato de pirâmide feita pelo durômetro	62
Figura 39 – Gráfico da etapa de <i>Debinding</i> das peças impressas	68
Figura 40 – Gráfico da etapa de Sinterização das peças marroms	70
Figura 41 – Peça metálica final sem acabamento superficial	72
Figura 42 – Comparação visual entre peça verde e peça branca	74
Figura 43 – Valores de p obtidos nas análises ANOVA one-way para as di- mensões das peças sinterizadas.	77
Figura 44 – Valores de F obtidos nas análises ANOVA one-way para as di- mensões das peças sinterizadas.	78
Figura 45 – Destaque da geometria do cilindro da base analisado	81
Figura 46 – Destaque da geometria do prisma de base quadrada analisada	83
Figura 47 – Destaque da geometria dos furos analisados	85
Figura 48 – Destaque da geometria dos ressaltos analisados	87
Figura 49 – Resultados dimensionais de peças verdes em aço 17-4 PH SS produzidas por MFFF	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre tecnologias de Manufatura Aditiva por extrusão de material	21
Tabela 2 – Comparativo entre tecnologias de Manufatura Aditiva metálica . . .	24
Tabela 3 – Tabela das dimensões e dimensões nominais do modelo	41
Tabela 4 – Fatores e níveis adotados	42
Tabela 5 – Corridas de impressão	42
Tabela 6 – Etapa de <i>Debinding</i>	50
Tabela 7 – Tabela da Etapa de Sinterização	53
Tabela 8 – Resumo das nomenclaturas das condições de análise	54
Tabela 9 – Medidas das Peças Verdes	64
Tabela 10 – Tabela da Média, Desvio Padrão e Porcentagem de Desvio de cada Grupo das amostras Impressas	65
Tabela 11 – Comparação dos valores médios medidos com as dimensões de referência do <i>ideaMaker</i>	66
Tabela 12 – Massa das peças antes do <i>debinding</i>	67
Tabela 13 – Massa das peças antes e depois do <i>debinding</i> e taxa de remoção de ligante	69
Tabela 14 – Tabela da Média, Desvio Padrão e Porcentagem de Desvio de cada Grupo das amostras Sinterizadas	70
Tabela 15 – Comparação entre as médias das dimensões das peças sinterizadas e os valores de referência do CAD	72
Tabela 16 – Perda de massa ao longo das etapas do MFF	73
Tabela 17 – Valores de F da ANOVA para dimensões das peças verdes	75
Tabela 18 – Valores de <i>p</i> da ANOVA para dimensões das peças verdes	75
Tabela 19 – Valores de F da ANOVA para dimensões das peças brancas	76
Tabela 20 – Valores de <i>p</i> da ANOVA para dimensões das peças brancas	76
Tabela 21 – Altura de Camada	79
Tabela 22 – Preenchimento Interno	80
Tabela 23 – Linha de Perímetro	80
Tabela 24 – Porcentagem de retração do cilindro	82
Tabela 25 – Comparação entre a retração média observada e a indicada pelo fabricante	83
Tabela 26 – Porcentagem de retração do prisma de base quadrada	84
Tabela 27 – Comparação da retração calculada e a indicada pelo fabricante para o prisma de base quadrada	84
Tabela 28 – Porcentagem de retração dos furos	86

Tabela 29 – Comparação entre a retração média calculada nos furos e a indicada pelo fabricante	86
Tabela 30 – Porcentagem de retração dos ressaltos cilíndrico e quadrado	88
Tabela 31 – Comparação entre a retração média calculada nos ressaltos e a indicada pelo fabricante	88
Tabela 32 – Comparação entre valores de dureza Vickers para o aço inoxidável 316L	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Manufatura Aditiva
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais
BJ	Injeção de Ligante
CAD	Desenho Assistido por Computador
CF3	Fabricação por Filamento Fundico com Cerâmica
CMM	Máquina de Medição por Coordenadas
EBM	Fusão por Feixe de Elétrons
FFF	Fabricação por Filamento Fundido
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
MFFF	Fabricação por Filamento Fundido com Metal
PBF	Fusão em Leito de Pó
SLM	Fusão Seletiva a Laser

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	20
2.1	Manufatura Aditiva	20
2.2	Processo de Fabricação por Filamento Fundido com Metal	21
2.2.1	Impressão via MFFF	25
2.2.2	Remoção do Ligante	26
2.2.3	Sinterização	26
2.3	Aço Inox 316L	27
2.3.1	Filamento Aço Inox 316L	28
2.4	Avaliação Dimensional na Impressão 3D	29
2.5	Análise de Variância	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Sistema <i>MetalFuse</i> da Raise3D	34
3.2	Filamento BASF 316L	39
3.3	Concepção da Geometria do Estudo	40
3.4	Condições de Impressão	42
3.5	Primeiros testes de Impressão	42
3.6	Preparação do Modelo e Fatiamento	45
3.7	Impressão	46
3.8	<i>Debinding</i>	46
3.8.1	Preparação do Ácido	50
3.9	Sinterização	51
3.10	Análise de Variância	53
3.11	Medição Dimensional	54
3.11.1	Medição das peças verdes	54
3.11.2	Medição das peças brancas	56
3.12	Pesagem das Amostras	57
3.12.1	Pesagem das peças verdes	57
3.12.2	Pesagem das peças marrom	58
3.12.3	Pesagem das peças brancas	59
3.13	Ensaio de Dureza	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	Obtenção das peças	63
4.1.1	Avaliação da Impressão	63
4.1.2	Avaliação do <i>Debinding</i>	67
4.1.3	Avaliação da Sinterização	69
4.2	Análise de Variância	74
4.2.1	ANOVA Peças Impressas	74
4.2.2	ANOVA Peças Sinterizadas	76
4.2.3	Análise de Variância dos Fatores Variados	78
4.2.3.1	<i>Análise da Altura de Camada</i>	78

4.2.3.2	<i>Análise do Preenchimento Interno</i>	79
4.2.3.3	<i>Análise do Número de Voltas</i>	80
4.3	Análise dimensional e cálculo da contração	81
4.3.1	Cilindro	81
4.3.2	Prisma de base quadrada	83
4.3.3	Furos cilíndrico e quadrado	85
4.3.4	Ressaltos cilíndrico e quadrado	87
4.4	Análise do Ensaio de Dureza	89
5	CONCLUSÕES	90
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	90
	REFERÊNCIAS	92
	APÊNDICES	94
	Apêndice A – Cálculo da dureza Vickers	95
	ANEXOS	96
	Anexo A – Tabela de dados dimensionais	97

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva tem experimentado um crescimento exponencial nas últimas décadas, consolidando-se como uma das principais tecnologias no cenário industrial contemporâneo. "Estima-se que a manufatura aditiva metálica deve atingir uma taxa de crescimento anual superior a 29% entre 2021 e 2025" (JACOB *et al.*, 2024, p. 2). Impulsionada pelos avanços tecnológicos da Indústria 4.0, esta modalidade de fabricação tem proporcionado às empresas novas possibilidades de desenvolvimento de produtos com maior flexibilidade e agilidade. Atualmente, as aplicações da manufatura aditiva abrangem diversos setores, incluindo prototipagem funcional, medicina, indústria aeroespacial, automotiva e joalheria (COSTA; SEQUEIROS; VIEIRA, 2023)

No contexto da fabricação metálica, a impressão 3D representa uma alternativa promissora aos métodos convencionais de produção, permitindo a criação de geometrias diferentes e componentes customizados com redução do desperdício de material. Esta tecnologia demonstra particular relevância na produção de pequenas séries e protótipos, favorecendo processos de pesquisa e desenvolvimento de novos produtos.

O processo *Metal Fused Filament Fabrication* (MFFF) baseia-se na extrusão de filamentos compostos por partículas metálicas dispersas em matriz polimérica, gerando peças em estado "verde" que requerem pós-tratamento térmico. As etapas seguintes envolvem a remoção do ligante polimérico (*debinding*) e a sinterização do material metálico, conferindo às peças suas propriedades mecânicas finais.

Outras tecnologias consolidadas na manufatura aditiva metálica incluem o *Selective Laser Melting* (SLM) e o *Electron Beam Melting* (EBM), que empregam fusão seletiva de pó metálico por meio de laser e feixe de elétrons, respectivamente. Embora estas tecnologias apresentem excelentes propriedades mecânicas, seus custos operacionais elevados e complexidade dos sistemas têm direcionado crescente interesse para o MFFF como alternativa mais acessível (ANDRADE *et al.*, 2025)

A impressão 3D metálica permite aos engenheiros e designers a criação de componentes personalizados, eliminação de estoques desnecessários e resposta rápida às demandas específicas dos clientes. Ademais, a tecnologia contribui para práticas industriais mais sustentáveis através da redução de desperdícios e otimização de processos produtivos.

A flexibilidade do MFFF permite uma produção sob demanda, eliminando a necessidade de grandes inventários e possibilitando a fabricação de soluções personalizadas que atendem precisamente às especificações dos usuários finais. Esta característica representa uma mudança na gestão da cadeia produtiva, proporcionando maior eficiência operacional e competitividade empresarial.

Entretanto, para garantir que as peças finais atendam aos requisitos geométricos de projeto, torna-se importante compreender as variações dimensionais que ocorrem ao longo do processo. A remoção do ligante e a sinterização provocam retrações consideráveis, que podem comprometer a precisão e funcionalidade das peças (ALYAMMAHI *et al.*, 2021). Diante disso, este trabalho se propôs a investigar a avaliação dimensional de amostras metálicas produzidas via MFFF, com foco na análise das retrações induzidas pelos parâmetros de fatiamento e nas implicações dessas variações sobre a qualidade final do produto.

1.1 Justificativa

A impressão 3D de peças metálicas com tecnologia MFFF ainda é recente, e como toda tecnologia nova, traz consigo alguns desafios. Um dos principais desafios é conseguir controlar as dimensões das peças. Já que, na primeira etapa, quando a peça ainda está "verde", podem aparecer problemas como delaminações, distorções ou problemas de adesão à mesa. Quando isso acontece, todo o trabalho posterior fica comprometido. E como cada etapa desse processo tem seu custo, descobrir os problemas cedo pode economizar retrabalho e desperdícios.

Enquanto processos mais consolidados, como usinagem ou fundição, já contam com normas bem estabelecidas para tolerâncias dimensionais, o MFFF carece destes instrumentos balizadores. Isso dificulta para quem trabalha com essa tecnologia, uma vez que é mais difícil saber quais tolerâncias podem ser adquiridas. Nesse cenário, este estudo busca contribuir com dados experimentais que podem servir de base para orientar ajustes no projeto das peças, como a aplicação de *oversizing* para compensar encolhimentos.

Observa-se que, apesar da expansão da tecnologia MFFF, existe uma carência de estudos focados na análise dimensional das peças no contexto desta tecnologia. A maioria das pesquisas concentra-se nas propriedades mecânicas ou nos resultados pós-sinterização, deixando uma brecha sobre o comportamento dimensional durante o processo. Desta forma, o presente trabalho busca preencher esta brecha, fornecendo uma compreensão mais abrangente que contribua tanto para o avanço científico quanto para a aplicação prática e desta tecnologia na indústria.

1.2 Definição do Problema

Embora o processo de *Metal Fused Filament Fabrication* (MFFF) apresente vantagens em termos de custo quando comparado a outras tecnologias de manufatura aditiva metálica, como o *Selective Laser Melting* (SLM) e o *Electron Beam Melting* (EBM), sua utilização para aplicações que exigem precisão dimensional ainda é limitada. Um dos grandes problemas está na ausência de estudos que avaliem, de forma

padronizada e quantitativa, o comportamento geométrico e a retração dimensional das peças produzidas, especialmente quando se utilizam filamentos compósitos como o Ultrafuse 316L da BASF.

Além disso, como ainda não existem parâmetros bem definidos para tolerância geométrica e compensação da retração, isso acaba prejudicando a previsibilidade do processo e limitando o uso dessa tecnologia em setores que demandam exatidão, como a mecatrônica, a engenharia biomédica e a indústria aeroespacial. Essa lacuna evidencia a necessidade de experimentação controlada para verificar a estabilidade dimensional ao longo das etapas do processo MFFF e estratégias de compensação geométrica.

A proposta deste trabalho é, portanto, investigar de maneira abrangente como cada etapa do processo MFFF, desde a impressão até a sinterização, afeta as dimensões finais das peças metálicas produzidas. A intenção é acompanhar e medir as amostras ao longo de todo o ciclo, desde o modelo feito em *software* de CAD até a peça sinterizada, buscando compreender como ocorrem as retrações e deformações que impactam a fidelidade dimensional em relação ao modelo original. O objetivo é gerar conhecimento que auxilie na previsão desses comportamentos e, no futuro, permitir que ajustes sejam feitos já no projeto da peça, assegurando que ela atenda às exigências e tolerâncias. Essa compreensão é precisa para que o MFFF possa ser adotado com mais confiança em aplicações que demandam precisão e confiabilidade dimensional.

1.3 Objetivo Geral

Avaliar a precisão e a uniformidade das dimensões das peças fabricadas, detectando possíveis variações e desvios em comparação ao modelo digital projetado. Compreender como alguns fatores de impressão afetam a precisão dimensional durante as etapas de impressão, remoção de ligantes e sinterização, visando aprimorar o processo de fabricação.

1.4 Objetivos Específicos

Dado os objetivos gerais acima, foram traçados os seguintes objetivos específicos, logo abaixo:

- a) Avaliar as variações dimensionais da peça em diferentes etapas do processo de manufatura;
- b) Avaliar os desvios de massa nas diferentes etapas do processo de manufatura;
- c) Comparar a variação da dureza Vickers em função das diferentes alturas de camada das peças produzidas;

- d) Analisar, com apoio de método estatístico, de que forma os fatores de impressão, como a altura de camada, porcentagem de preenchimento interno e número de perímetros, podem interferir nas dimensões finais da peça.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão expostos os conceitos para a realização deste trabalho. Serão abordados os conceitos da impressão 3D, explicação do método *Fused Filament Fabrication* (FFF) e sua aplicação na fabricação metálica (MFFF), uma explanação do aço inoxidável 316L e os conceitos relacionados à avaliação dimensional de peças impressas.

2.1 Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva (AM) começou com a impressão de peças feitas em plástico, focada na prototipagem rápida. Com o passar do tempo, essa tecnologia foi inovando e passou-se a utilizar também materiais metálicos e compósitos. Essa evolução foi possível por conta do avanço dos equipamentos e ao desenvolvimento de novos materiais. Nos dias de hoje, está comum de se ver a AM sendo aplicada na produção de peças funcionais, em setores como a indústria automotiva, onde existe uma demanda por geometrias e soluções mais personalizadas (JACOB *et al.*, 2024).

Entre os métodos existentes de Manufatura Aditiva, reconhecidos pela norma ISO/ASTM 52900:2021, pode-se destacar tecnologias como o *Powder Bed Fusion* (PBF), *Binder Jetting* (BJ) e *Material Extrusion*. Esta última, descreve o processo de impressão 3D onde um material termoplástico, em forma de filamento, é extrudado e depositado camada por camada para construir a peça. Dentro da categoria de extrusão, existem diferentes variações voltadas a materiais diferentes, como o *Fused Filament Fabrication* (FFF), usado com termoplásticos; o *Metal Fused Filament Fabrication* (MFFF), que utiliza filamentos compósitos, de pó metálico com ligante polimérico; e o *Ceramic Fused Filament Fabrication* (CF3), que utiliza pó de cerâmica com ligante polimérico.

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre essas três tecnologias, mostrando suas características e aplicações mais comuns.

Tabela 1 – Comparativo entre tecnologias de Manufatura Aditiva por extrusão de material

Tecnologia	Material típico	Formato do material	Aplicações comuns
FFF	PLA, ABS, PETG	Filamento termoplástico	Prototipagem, peças funcionais simples, ensino e design
MFFF	Aço inox (316L), Aço inox (17-4 PH)	Filamento de pó metálico com ligante polimérico	Ferramentas, suportes, protótipos, implantes, engenharia
CF3	Alumina, Zircônia,	Filamento de pó cerâmico com ligante polimérico	Odontologia, engenharia de materiais, componentes de alta resistência térmica

Embora seja relativamente simples em termos de funcionamento, essas tecnologias requerem um certo controle de parâmetros como temperatura, velocidade de impressão e adesão à base, os quais impactam na resistência mecânica, no acabamento superficial e na qualidade dimensional das peças. A geometria final é construída camada por camada, a partir da deposição controlada do filamento em estado semi-fundido, conforme orientações geradas pelo *software* de fatiamento. A precisão dos movimentos nos eixos X, Y e Z, bem como a qualidade do material utilizado, são fatores que impactam o desempenho da peça fabricada (ZANJANIJAM *et al.*, 2020).

Entre as principais vantagens do FFF estão o baixo custo do equipamentos, a facilidade de operação e a capacidade de fabricar peças com geometrias complexas sem necessidade de moldes. Essa tecnologia é bastante utilizada na prototipagem rápida, em testes funcionais e no desenvolvimento de projetos personalizados. No entanto, o processo também apresenta limitações, como a formação de superfícies com aspecto menos refinado e menor resistência mecânica em comparação a peças produzidas por métodos tradicionais, como a usinagem. Essas características devem ser consideradas na escolha da tecnologia de impressão para cada aplicação específica (BOSCHETTO *et al.*, 2022).

Com base nos princípios da AM apresentados, é possível aplicar esse conceito também à fabricação de peças metálicas. Na seção a seguir, será explicado o funcionamento do processo voltado à Manufatura Aditiva com metais, destacando suas etapas, materiais utilizados e particularidades em relação às técnicas convencionais.

2.2 Processo de Fabricação por Filamento Fundido com Metal

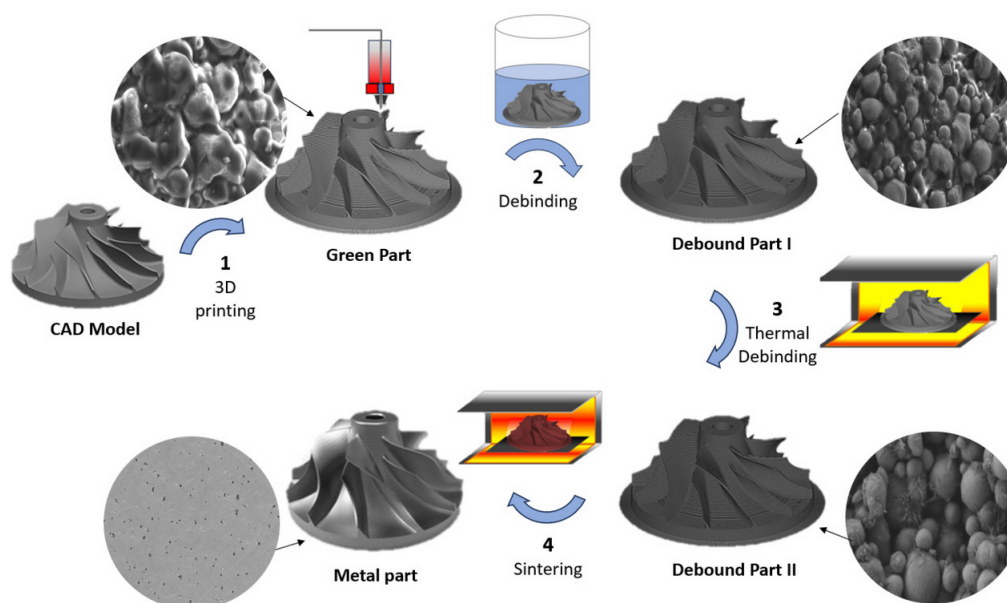
O *Metal Fused Filament Fabrication* (MFFF), traduzido para o português como Fabricação por Filamento Fundido com Metal, é uma tecnologia de Manufatura

Aditiva voltada para a produção de peças metálicas, baseada no princípio da extrusão de material. Consiste em uma adaptação do processo conhecido como *Fused Filament Fabrication* (FFF), no qual, em vez de se utilizar apenas filamentos compostos por polímeros termoplásticos, utiliza-se um filamento compósito contendo partículas de pó metálicas em conjunto com um ligante polimérico. Após a impressão da peça o material passa por outras duas etapas térmicas, de remoção do ligante (*debinding*) e sinterização, resultando em uma peça metálica.

Por utilizar o mesmo princípio de impressoras FFF convencionais, o MFFF oferece uma alternativa acessível para a fabricação de componentes metálicos com geometrias complexas sem a necessidade de moldes ou ferramentas especiais. Em comparação com outras tecnologias de AM metálica, como a Fusão Seletiva a Laser (SLM) e a Fusão por Feixe de Elétrons (EBM), o MFFF se destaca pelo menor custo, menor risco no manuseio de materiais e pela compatibilidade com equipamentos de menor porte, o que o torna atrativo tanto para aplicações industriais quanto para acadêmicas (COSTA; SEQUEIROS; VIEIRA, 2023).

Esse método utiliza um filamento compósito formado por partículas metálicas e um ligante polimérico. A seguir, a Figura 1 possui uma visão geral do processo de MFFF, desde a impressão da peça verde até a obtenção de uma peça totalmente metálica após a sinterização. (1) A peça verde, composta por uma matriz polimérica com partículas metálicas, é impressa em 3D via FFF a partir de um modelo CAD, geralmente com superdimensionamento para compensar a retração causada pela sinterização. (2) A peça verde passa por um primeiro tratamento de *debinding*, (3) seguido por um *debinding* térmico para remover completamente a matriz polimérica, no caso estudado foram feitos os dois processos de *debinding* em apenas uma etapa. (4) A peça marrom obtida após o *debinding* é sinterizada, resultando em uma peça metálica.

Figura 1 – Etapas do MFFF



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

Embora o MFFF seja uma alternativa acessível e prática dentro da AM metálica, ele apresenta diferenças grandes em relação a outras tecnologias mais consolidadas, como a Fusão Seletiva a Laser (SLM) e a Fusão por Feixe de Elétrons (EBM). Essas técnicas utilizam fontes de energia diferentes e operam com materiais e atmosferas mais controladas, impactando diretamente a densidade, precisão e custo do processo. A Tabela 2 apresenta um comparativo entre essas três tecnologias, considerando parâmetros como fonte de energia, material utilizado, a atmosfera que é feita, se precisa de etapas adicionais, densidade da peça, o custo dos equipamentos e aplicações comuns.

Tabela 2 – Comparativo entre tecnologias de Manufatura Aditiva metálica

Parâmetro	MFFF	SLM	EBM
Fonte de energia	Aquecimento da Extrusora (durante etapa de impressão)	Laser de alta potência	Feixe de elétrons
Material	Filamento metálico com ligante polimérico	Pó metálico	Pó metálico
Atmosfera	Ar (durante a impressão), inerte ou redutora na sinterização	Atmosfera inerte	Vácuo
Etapas adicionais	<i>Debinding</i> e sinterização	Pós-tratamento térmico (Opcional)	Resfriamento lento, retirada de pó fundido e alívios de tensão (Opcionais)
Densidade	Média (90–96%)	Alta (maior ou igual 99%)	Alta (maior ou igual 99%)
Precisão dimensional	Média, depende da retração	Alta	Alta
Custo do equipamento	Moderado	Alto	Muito alto
Aplicações	Protótipos funcionais, peças técnicas e ferramental leve	Indústria aeroespacial, biomédica, moldes técnicos	Componentes estruturais em titânio e ligas especiais (aeronáutica, medicina)

Apesar das vantagens do processo de MFFF, ele ainda enfrenta desafios. Um deles é o controle da retração dimensional durante as suas etapas, o qual pode variar dependendo da densidade da peça e dos parâmetros de impressão, a eficiência e a qualidade dos resultados dependem do sistema utilizado, da calibração do equipamento e da escolha dos parâmetros operacionais (ANDRADE *et al.*, 2025; RAISE3D, 2023).

Além disso, pode-se observar a presença de poros ou de pequenas deformações, principalmente em peças com preenchimento interno baixo ou orientação desfavorável. A fragilidade da peça marrom após o *debinding* também exige cuidado no manuseio, considerando que qualquer impacto pode comprometer a estrutura da peça e o resultado final. Esses fatores fazem com que seja necessário um bom ajuste dos parâmetros e um entendimento do comportamento do material ao longo do processo (COSTA; SEQUEIROS; VIEIRA, 2023; JACOB *et al.*, 2024).

2.2.1 Impressão via MFFF

Durante a etapa de impressão da peça verde, existem alguns parâmetros que interferem diretamente a estrutura final da peça. Essa etapa é realizada com base no mesmo princípio da extrusão de filamento, o filamento compósito, formado por partículas metálicas e uma matriz polimérica, é depositado camada por camada seguindo as instruções programadas no *software* de fatiamento. Tendo em vista que é um processo de extrusão, a adesão entre as camadas da peça ao longo da impressão e a própria extrusão do material são fatores que garantem uma peça verde com boa estabilidade estrutural. Entre os principais parâmetros estão a altura de camada, a porcentagem de preenchimento interno, o número de perímetros e a orientação da peça na mesa de impressão, os quais foram objeto deste estudo. Essas variáveis influenciam a densidade da peça verde, ou seja, afetam o comportamento da peça nas etapas subsequentes, principalmente quanto à retração volumétrica durante a sinterização e às propriedades mecânicas do material final (MARTIGNONI *et al.*, 2024; JACOB *et al.*, 2024).

Durante a etapa de impressão, o material extrudado ainda não é o metal puro, mas sim uma mistura de material metálico com plástico. Esse compósito, geralmente à base de POM (polioximetileno), é o responsável por manter a forma da peça e viabilizar o processo de deposição por extrusão (RAISE3D, 2023).

A Figura 2 mostra uma peça recém impressa, ainda na condição conhecida como peça verde, e também uma representação da sua microestrutura, evidenciando a presença do material ligante entre as partículas metálicas.

Figura 2 – Peça verde impressa via MFFF (acima) e esquema da sua microestrutura (abaixo)



Fonte: Adaptado de (RAISE3D, 2023)

Uma das vantagens do MFFF é que ele não exige o uso de lasers potentes nem câmaras com gases nobres, o que torna o processo mais seguro e com menos exigências relacionadas ao local de trabalho durante a impressão. Por outro lado, é

importante ter um cuidado durante a etapa de *debinding*. Mesmo sendo um processo mais simples em comparação com outras técnicas, aconselha-se que o forno seja mantido em um local isolado e com boa ventilação (COSTA; SEQUEIROS; VIEIRA, 2023; JACOB *et al.*, 2024).

2.2.2 Remoção do Ligante

A peça marrom, resultante do processo de *debinding*, torna-se frágil, composta por partículas metálicas ligeiramente coesas. Isso ocorre porque, durante essa etapa, o ligante polimérico presente na peça verde é removido, deixando uma estrutura porosa e com baixa resistência mecânica. O processo pode ser realizado por meio de solventes, reações químicas catalíticas ou decomposição térmica, a depender do fabricante do sistema, no caso estudado foi utilizado um *debinding* químico com ácido oxálico. Portanto, a peça marrom fica suscetível a colapsos ou deformações causadas por qualquer esforço físico. Logo, recomenda-se que após o *debinding*, sejam realizadas apenas operações mínimas e controladas, como a pesagem e a transferência cuidadosa para o forno de sinterização, evitando qualquer tipo de esforço mecânico (COSTA; SEQUEIROS; VIEIRA, 2023; JACOB *et al.*, 2024).

Após o processo de *debinding*, o material ligante é removido, restando as partículas metálicas em contato superficial. O nome dado a estrutura resultante é peça marrom, caracterizada por sua porosidade e fragilidade. A Figura 3 evidencia essa condição, destacando a ausência do material de ligação entre as partículas metálicas.

Figura 3 – Peça marrom (acima) e representação da microestrutura (abaixo)



Fonte: Adaptado de (RAISE3D, 2023)

2.2.3 Sinterização

A etapa de sinterização é fundamental para dar resistência mecânica e integridade para a peça final. Nessa fase, as partículas metálicas da peça marrom são unidas, o que dá a densidade ao material. Para que esse processo ocorra corretamente, é necessário o controle da temperatura e da atmosfera interna do forno. A sinterização

é geralmente realizada em ambientes com atmosfera inerte (como argônio), utilizada neste estudo, ou redutora (como hidrogênio), a fim de evitar a oxidação dos metais ou até mesmo contaminações indesejadas. O processo de aquecimento deve ser muito bem planejado, com rampas e patamares conhecidos, permitindo que a coalescência entre as partículas ocorra de forma gradual e homogênea, seguindo as recomendações do fabricante do sistema. Um aquecimento muito rápido pode causar tensões internas ou até deformações. A duração do ciclo térmico, e os tempos de permanência nas temperaturas mais altas, também influenciam na densidade e na estabilidade final do componente sinterizado (TANG *et al.*, 2023; FORWARDAM, 2024; RAISE3D, 2023).

Após a sinterização, as partículas metálicas da peça marrom são consolidadas a altas temperaturas. A Figura 4 ilustra esse estágio: no lado esquerdo, a peça ainda no interior do forno durante o processo de sinterização, e no direito, o resultado final após a sinterização, com a estrutura metálica estável. Vale ressaltar que, assim como mostrado na Figura, abaixo, a peça sofre uma retração dimensional.

Figura 4 – Peça durante a Sinterização (a esquerda) e Peça após Sinterização (a direita)



Fonte: Adaptado de (RAISE3D, 2023)

2.3 Aço Inox 316L

O aço inoxidável AISI 316L é amplamente estudado e aplicado em processos de Manufatura Aditiva na literatura técnica e científica, especialmente na tecnologia *Metal Fused Filament Fabrication* (MFFF), devido à sua combinação de propriedades mecânicas, resistência à corrosão e a versatilidade de aplicação. Trata-se de uma liga do tipo austenítica, composta majoritariamente por ferro, cromo (16–18%), níquel (10–14%) e molibdênio (2–3%), elementos que contribuem para sua resistência química e boa ductilidade, características importantes para aplicações industriais, médicas e domésticas. Sua densidade é da ordem de 8 g/cm³ e ponto de fusão entre 1370 e 1400 °C (MatWeb, LLC, 2024).

Entre as principais razões para a sua escolha, destaca-se a compatibilidade do material com sistemas comerciais acessíveis, além disso, o MFFF apresenta custos

moderados quando comparados a outras tecnologias de Manufatura Aditiva metálica baseadas em feixes energéticos, como a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), a Fusão Seletiva a Laser (SLM) e a Fusão por Feixe de Elétrons (EBM), tornando-se uma alternativa viável para prototipagem e produção em pequena escala. Como desafio, a tecnologia ainda apresenta limitações em relação à rugosidade superficial, fator que pode influenciar o desempenho funcional das peças em determinadas aplicações (BOSCHETTO *et al.*, 2022). Vale ressaltar que, a etapa de *debinding* e sinterização requer equipamentos específicos que representam parte grande do investimento.

Ademais, o aço inoxidável 316L pode ser utilizado por diferentes técnicas de Manufatura Aditiva, sendo a SLM e a MFFF duas abordagens com objetivos diferentes. No processo de SLM, a fusão seletiva do pó metálico com laser possibilita a obtenção de peças com alta densidade (acima de 99%) e propriedades mecânicas boas, além de boa precisão dimensional. No entanto, esse método exige equipamentos de alto custo, atmosfera controlada e operação especializada. Por outro lado, no processo de MFFF, mesmo que a densidade final seja um pouco inferior, na casa dos 94–98%, o processo apresenta menor complexidade operacional e custo reduzido. As peças feitas por MFFF tendem a apresentar maior rugosidade superficial e possuir retração, mas são adequadas para aplicações funcionais de médio esforço, prototipagem e produção de pequenas séries (COSTA; SEQUEIROS; VIEIRA, 2023; JACOB *et al.*, 2024).

2.3.1 Filamento Aço Inox 316L

O Ultrafuse 316L é um filamento metálico compósito usado na Manufatura Aditiva por extrusão. O diâmetro nominal do filamento é de 1,75 mm, com tolerância de $\pm 0,05$ mm. A temperatura de extrusão recomendada pelo fabricante varia entre 230°C e 250°C, com a mesa aquecida entre 90°C e 120°C. O filamento apresenta boa estabilidade dimensional e aderência à base quando os parâmetros são respeitados (FORWARDAM, 2024).

A distribuição do pó metálico que ocorre ao longo do filamento, 90% pó metálico e 10% ligante polimérico, busca garantir uma boa impressão e minimizar defeitos como entupimentos ou variações dimensionais. A densidade da peça verde varia em torno de 3,5 a 4,0 g/cm³, enquanto a densidade final da peça sinterizada pode atingir valores iguais ou superiores a 7,5 g/cm³, dependendo das etapas térmicas após a impressão (FORWARDAM, 2024).

A Figura 5 ilustra o filamento Ultrafuse 316L utilizado neste trabalho.

Figura 5 – Filamento Ultrafuse 316L

Fonte: Adaptado de (FORWARDAM, 2024)

Este filamento possui o material ligante à base de POM (polioximetileno) que também influencia nas etapas de *debinding* e sinterização. Por esses motivos, o filamento torna-se uma boa escolha para a produção de peças metálicas com geometrias complexas utilizando da técnica MFFF, com custo reduzido e menor risco operacional quando comparado a métodos baseados em pó metálico livre (FORWARDAM, 2024).

Por fim, ele é utilizado em fabricação de peças funcionais e em aplicações industriais e acadêmicas, com foco em aplicações que exigem uma resistência moderada e geometrias fora do comum. Por exemplo, é comumente utilizado para a produção de ferramentas, gabaritos, fixações, peças funcionais e protótipos. Além disso, o material também se mostra eficiente na fabricação de pequenas séries, oferecendo uma alternativa viável e econômica para a produção de componentes metálicos personalizados sem a necessidade de moldes ou usinagem convencional (FORWARDAM, 2024).

2.4 Avaliação Dimensional na Impressão 3D

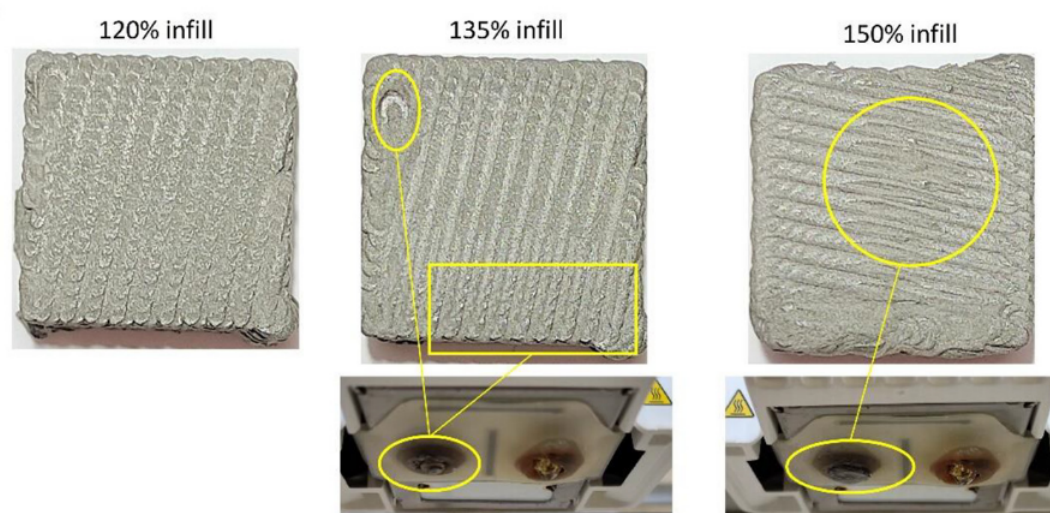
A avaliação dimensional é uma etapa para assegurar que as peças tenham as dimensões especificadas em projeto. No processo MFFF (*Metal Fused Filament Fabrication*), essa verificação torna-se ainda mais importante devido à ocorrência de variações dimensionais, principalmente após as etapas de *debinding* e sinterização, que resultam em retrações volumétricas e possíveis deformações.

Segundo BOSCHETTO *et al.* (2022), 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. Por isso, essa avaliação se torna importante, para poder prever essas variações e ter um controle melhor na fabricação.

Além disso, MARTIGNONI *et al.* (2024) observaram que a estratégia e a

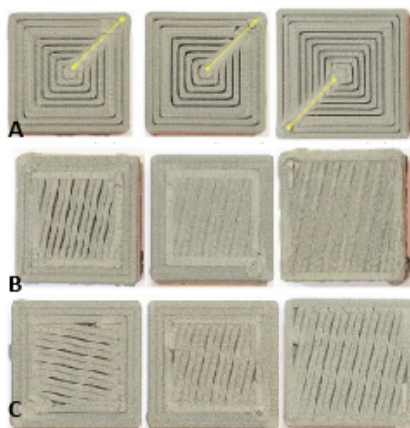
densidade de preenchimento influenciam a precisão dimensional das peças na fase verde. Eles observaram que 120% de preenchimento garantiu quase cobertura total das camadas e com densidade próxima de 99%. No entanto, valores acima desse limite, como 135% e 150%, levaram à sobre-extrusão, causando acúmulo de material no bico extrusor e peças mais largas no plano XY e mais baixas, no plano Z, que o nominal. Conforme apresentado na Figura 6, é possível observar os desvios dimensionais ocorridos nas peças verdes com diferentes estratégias de preenchimento.

Figura 6 – Influência da densidade do preenchimento



Fonte: Adaptado de (MARTIGNONI *et al.*, 2024)

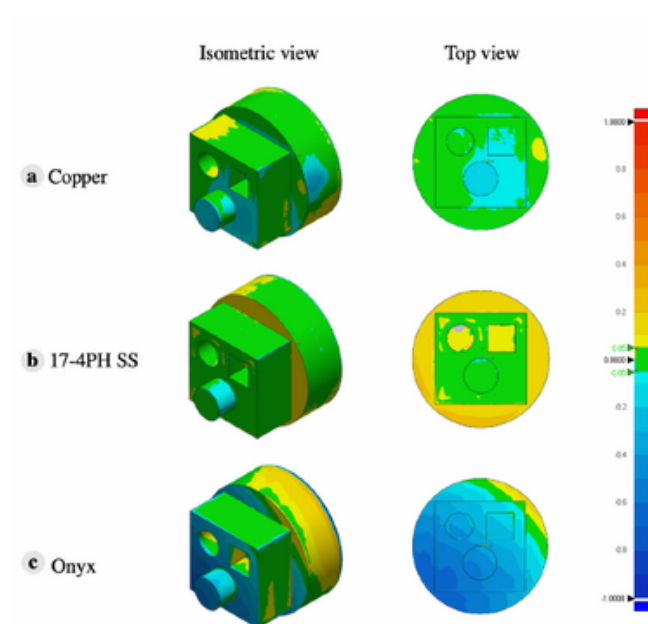
Ademais, também foram considerados diferentes tipos de estrutura interna, estratégia de concêntrico (A), de linhas (B) e a de zig-zag (C), além disso, diferentes quantidades de paredes externas, com valores de 0, 1 e 3, possibilitando uma análise sobre a influência dessas variáveis na estabilidade dimensional. Conforme apresentado na Figura 7, é possível observar as diferentes estratégias de preenchimento adotadas no estudo dos autores.

Figura 7 – Tipos de preenchimento interno utilizados no estudo

Fonte: (MARTIGNONI *et al.*, 2024), adaptado pelo Autor (2025)

Por fim, ALYAMMAHI *et al.* (2021), investigaram a precisão dimensional de peças metálicas produzidas pelo processo MFFF, entretando, utilizando o sistema da fabricante Markforged e materiais diferentes dos adotados neste trabalho. Os autores, projetaram uma peça de teste com geometrias simples, a qual foi inspirada para realização deste trabalho, e compararam os resultados obtidos com diferentes materiais metálicos e polimérico. Apesar do processo de fabricação ser mais complexo, devido as etapas de fabricação, é possível alcançar bons resultados, desde que, o sistema esteja bem calibrado e projetado para isso.

A Figura 8 apresenta as imagens das três peças escaneadas no estudo deles, evidenciando as diferenças dimensionais observadas entre os materiais metálicos e o polimérico utilizado no experimento.

Figura 8 – Imagens escaneadas das peças fabricadas com diferentes materiais

Fonte: Adaptado de (ALYAMMAHI *et al.*, 2021)

2.5 Análise de Variância

A análise de variância de um fator (ANOVA *one-way*) é um método estatístico utilizado para verificar se há diferenças significativas entre as médias de três ou mais grupos independentes. Essa análise inicia-se a partir da hipótese nula, de que todas as médias são iguais, ao rejeitá-la com base em um valor de p inferior a geralmente 0,05, pode-se concluir que pelo menos um desses grupos apresenta uma média estatisticamente diferente. A ANOVA é utilizada em estudos experimentais para avaliar o impacto de variáveis independentes sobre uma variável dependente contínua (TRIOLA, 2018).

Na análise de variância *one-way*, formulam-se duas hipóteses principais (TRIOLA, 2018):

- Hipótese nula (H_0): todas as médias dos grupos são iguais, ou seja, se possui uma diferença é associada a variação aleatória.
- Hipótese alternativa (H_1): pelo menos uma das médias é diferente das demais.

Para testar essas hipóteses, é realizado o teste F, esse teste compara a variabilidade entre os grupos com a variabilidade dentro dos grupos. Se o valor de F calculado for mais alto e o valor de p for menor que o nível adotado, rejeita-se a hipótese nula, indicando que há pelo menos uma média significativamente diferente (TRIOLA, 2018).

Por fim, essa análise busca compreender o que ocorre com as dimensões das amostras durante o processo MFFF. Os resultados da ANOVA também auxiliam na identificação de quais dimensões são mais suscetíveis às variações do processo e podem orientar ações corretivas no projeto da peça ou nos fatores de impressão. Neste trabalho, a ANOVA *one-way* foi utilizada para analisar se houve variação estatisticamente significativa nas medidas das peças impressas e sinterizadas, considerando os diferentes grupos avaliados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão apresentados os procedimentos adotados ao longo do trabalho. Inicialmente, são apresentados o sistema *MetalFuse* utilizado no trabalho e o filamento utilizado na fabricação das amostras. Na sequência, abordam-se as etapas de concepção do corpo de prova, o processo de modelagem, o fatiamento das amostras e as condições de impressão. Também são descritos os testes preliminares de calibração, as etapas do processo MFFF (impressão, *debinding* e sinterização), os métodos de medição dimensional e pesagem das amostras, finalizando com a realização do ensaio de dureza.

3.1 Sistema *MetalFuse* da Raise3D

O sistema *MetalFuse*, desenvolvido pela Raise3D, é uma solução para manufatura aditiva de metais baseada na tecnologia MFFF (*Metal Fused Filament Fabrication*). Ele combina as três etapas para a fabricação, a impressão, remoção de ligante (*debinding*) e a sinterização, distribuídas entre os equipamentos Forge1, D200-E e S200-C, respectivamente. O diferencial desse sistema está na compatibilidade entre as máquinas e o material. A Figura 9 ilustra o conjunto dos equipamentos que compõem o sistema MetalFuse.

Figura 9 – Máquinas do sistema MetalFuse

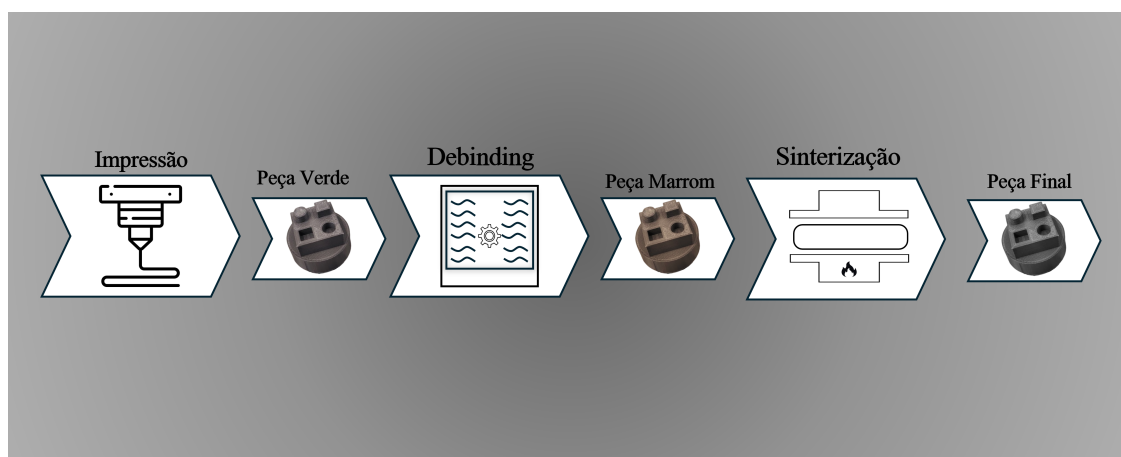


Adaptado de (RAISE3D, 2025)

O processo de Fabricação por Filamento Fundido com Metal é composto por três etapas principais: a impressão da peça verde, ainda composta por uma matriz polimérica e pó metálico; a remoção do material ligante, que resulta na chamada peça marrom, porosa e frágil; e, por fim, a sinterização, que consolida o material

metálico, deixando-o estruturado. A Figura 10 exemplifica visualmente essas três etapas, destacando as etapas pelas quais a peça passa ao longo do processo.

Figura 10 – Etapas do Processo de MFFF



Fonte: do Autor (2025)

A impressora Raise3D Forge1 foi utilizada na fabricação das peças verdes, etapa inicial do processo. Trata-se de uma impressora do tipo FFF modificada para trabalhar com filamentos metálicos como o Ultrafuse 316L, os quais combinam pó metálico com ligantes poliméricos. Seu sistema de extrusão é composto por cabeçotes duplos independentes. A mesa aquecida e o nivelamento automático contribuem para a melhor adesão da primeira camada e reduzem o risco de deformações durante a impressão. Além disso, a Forge1 possui volume de construção de 300×300×300mm e conectividade com o *software IdeaMaker for Metal*.

Após a impressão da peça verde, inicia-se a etapa de *debinding*, que tem como objetivo remover o material ligante presente no filamento. Nela, o ligante polimérico presente na peça verde é gradualmente removido por meio de banho em solução de ácido oxálico e álcool isopropílico com aquecimento controlado.

Esse ligante é responsável por manter as partículas metálicas unidas durante a impressão, mas precisa ser removido antes da sinterização para garantir a integridade e densidade da peça metálica final. Este processo foi realizado por meio de um método químico, utilizando uma solução de ácido oxálico ($H_2C_2O_4$) e álcool isopropílico (C_3H_8O). Esse procedimento consiste na inserção da peça verde no forno sob atmosfera de nitrogênio impregnada com uma solução ácida, promovendo assim a dissolução da matriz polimérica que compõe o ligante. A Figura 11 ilustra o posicionamento das amostras dentro da câmara e como é realizado o procedimento de imersão.

Figura 11 – Vista por dentro do Forno de *Debinding*

Adaptado de (RAISE3D, 2025)

Segundo COSTA; SEQUEIROS; VIEIRA (2023), o *debinding* químico utilizando ácido oxálico demonstrou ser eficiente na remoção progressiva do ligante sem comprometer a integridade da peça, especialmente em geometrias mais delicadas, favorecendo uma estrutura mais estável para a posterior sinterização

Após o *debinding*, a peça passa a ser chamada de peça marrom (*brown part*). Nesse momento, o material ligante foi removido, restando a estrutura metálica porosa formada pelo pó metálico. Ao fim desta etapa, a peça ainda não possui a resistência mecânica final e este é o momento em que o material está mais frágil (COSTA; SEQUEIROS; VIEIRA, 2023). Na Figura 12, é apresentado o equipamento utilizado para a etapa de *debinding*, a estação D200-E.

Figura 12 – Forno de *Debinding*

Adaptado de (RAISE3D, 2025)

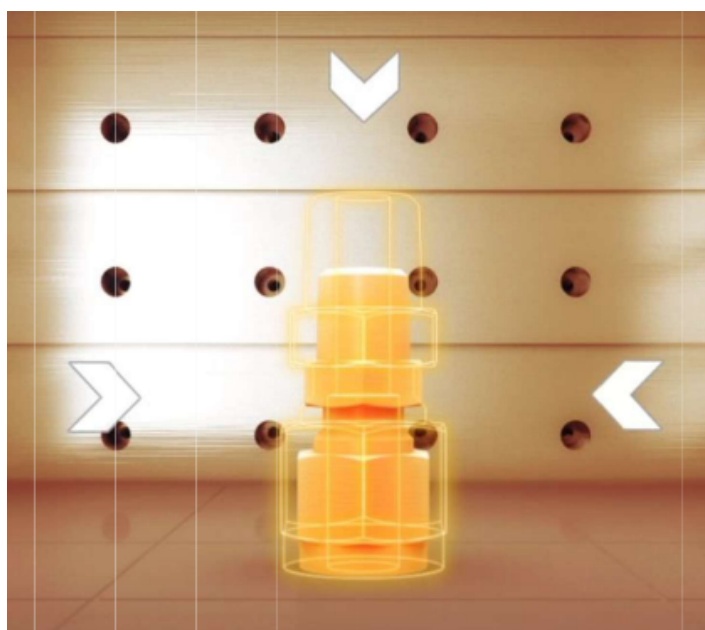
Finalizado esta etapa, a peça marrom segue para a etapa de sinterização, onde ocorre a consolidação do material metálico. Nesse processo, a peça é aquecida em altas temperaturas, abaixo do ponto de fusão do metal, promovendo a coalescência das partículas metálicas e o aumento da densidade da peça.

Durante a primeira etapa da sinterização, as peças são submetidas a um aquecimento inicial superior à temperatura de decomposição do material polimérico, permanecendo por um tempo controlado para garantir a remoção de possíveis resíduos remanescentes da etapa anterior. Em seguida, inicia-se o tratamento térmico, no qual as partículas metálicas se aproximam e se fundem parcialmente, reduzindo a porosidade e conferindo à peça resistência mecânica e estabilidade. Esse aquecimento é realizado de forma gradual, em atmosfera controlada, para evitar oxidações indesejadas e permitir que a estrutura final seja mais homogênea (BOSCHETTO *et al.*, 2022). As amostras, são todas colocadas em uma espécie de prateleira feita de grafite, a Figura 13 evidencia como é o espaço disponível dentro do forno e como elas podem ficar.

Figura 13 – Disposição dentro do forno de Sinterização

Adaptado de (RAISE3D, 2025)

Durante esta etapa é comum ocorrer retração dimensional, variando geralmente entre 13% a 23%, dependendo da orientação geométrica, a densidade inicial da peça verde e como ocorreu a sinterização (ALYAMMAHI *et al.*, 2021). Essa retração resulta da coalescência do material, que leva à diminuição da porosidade e à compactação estrutural sem fusão completa (COSTA; SEQUEIROS; VIEIRA, 2023). A Figura 14 evidencia o processo que ocorre dentro do forno de sinterização.

Figura 14 – Fenômeno de retração dentro do forno

Adaptado de (RAISE3D, 2025)

Para mitigar o impacto desse efeito, essa retração precisa ser considerada já na fase de projeto da peça, para que as dimensões finais estejam dentro da faixa aceitável de variação. O recomendado é superdimensionar a peça verde com base em fatores de escala conhecidos para que não haja desperdício de material. A Figura 15 apresenta o forno de sinterização utilizado no trabalho.

Figura 15 – Forno de Sinterização



Adaptado de (RAISE3D, 2025)

3.2 Filamento BASF 316L

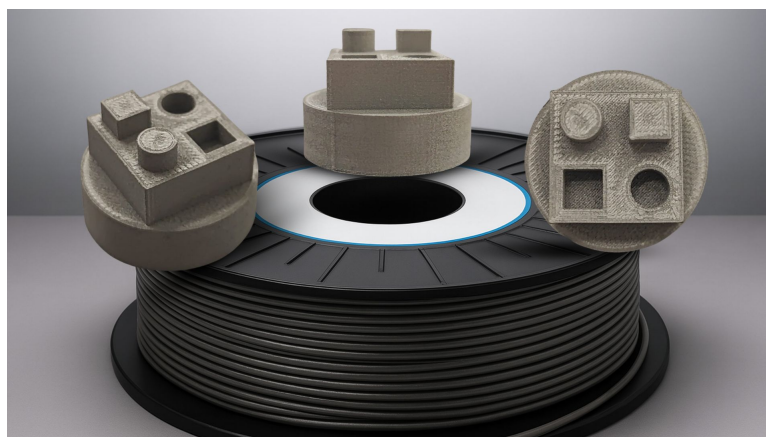
Para este estudo, utilizou-se o filamento Ultrafuse 316L, desenvolvido pela BASF 3D *Printing Solutions*. Trata-se de um material projetado para processos de manufatura aditiva por extrusão, o material é um composto de metal-polímero, contendo aproximadamente 90% de partículas metálicas refinadas, dispersas em uma matriz de ligantes termoplásticos (FORWARDAM, 2024).

A escolha desse filamento deve-se, principalmente, à sua compatibilidade com o sistema Raise3D *MetalFuse* e à disponibilidade de documentação técnica, a qual serviu como base para a definição dos parâmetros utilizados neste trabalho (FORWARDAM, 2024).

Segundo o fabricante, suas aplicações incluem a produção de ferramentas, gabaritos, fixações, peças funcionais, protótipos e pequenas séries. Além disso, o fato de estar disponível no formato de filamento compósito facilita tanto o manuseio quanto

a operação em impressoras FFF adaptadas, sendo uma escolha apropriada para uso industrial e também em contextos acadêmicos. A Figura 16 apresenta o carretel do material Ultrafuse 316L utilizado no experimento, acompanhado da peça impressa para o estudo.

Figura 16 – Filamento Ultrafuse 316L com peça de teste



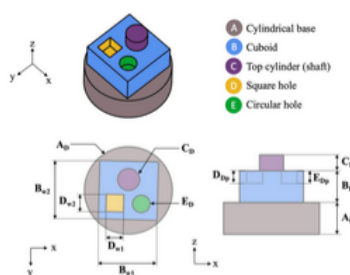
Fonte: do Autor (2025)

3.3 Concepção da Geometria do Estudo

A geometria do corpo de prova foi definida com base no estudo de ALYAMMAHI *et al.* (2021), que propuseram um modelo priorizando formas geométricas simples, que dispensassem o uso de estruturas de suporte e não exigissem usinagem após a impressão. Essa abordagem visa minimizar interferências no processo e garantir que a análise dimensional reflita diretamente o desempenho do método MFFF utilizado (SCARAVETTI; DUBOIS; DUCHAMP, 2008).

A Figura 17 apresenta o corpo de prova utilizado por ALYAMMAHI *et al.* (2021), que serviu como base para o desenvolvimento do modelo adotado neste estudo.

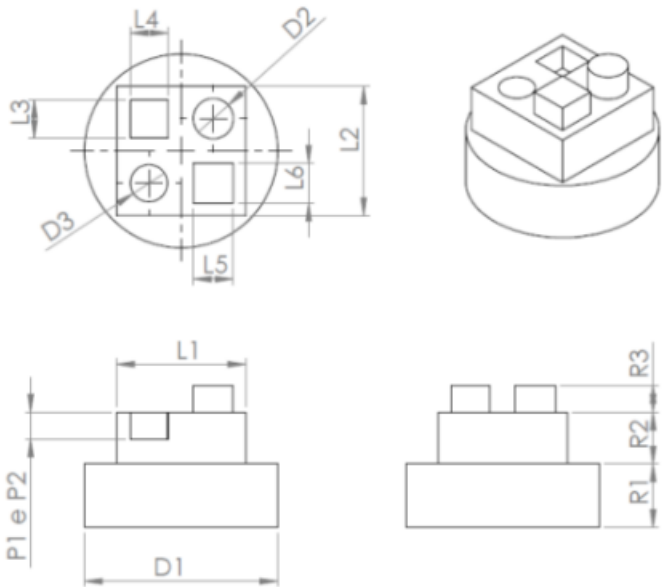
Figura 17 – Corpo de Prova utilizado como referência



Adaptado de (ALYAMMAHI *et al.*, 2021)

Ademais, a geometria foi elaborada com base em recomendações da literatura, utilizando formas simples e simétricas que dispensam o uso de suportes e usinagem pós-processo. A peça contém elementos básicos como furos e ressaltos circulares e quadrados. A Figura 18 evidencia as vistas do corpo de prova, com seus parâmetros, e a Tabela 3 suas dimensões, concebidas no CAD.

Figura 18 – Corpo de Prova



Fonte: do Autor (2025)

Tabela 3 – Tabela das dimensões e dimensões nominais do modelo

Parâmetro	Dimensão (mm)
D1	30,00
R1	10,00
R2	10,00
L1	20,00
L2	20,00
R3C	5,00
D2	6,00
P1	5,00
L4	6,00
L3	6,00
P2	5,00
D3	6,00
R3Q	5,00
L5	6,00
L6	6,00

3.4 Condições de Impressão

Para a realização dos testes, adotou-se um planejamento fatorial completo 2^3 , considerando três fatores com dois níveis cada, totalizando oito combinações experimentais distintas. Esse tipo de planejamento permite avaliar os efeitos principais de cada fator e também as interações entre eles, o que o torna adequado para estudos exploratórios e de controle de processo. Essas combinações estão organizadas na Tabela 4, que apresenta a estrutura do planejamento fatorial.

Tabela 4 – Fatores e níveis adotados

Fator	Nível Inferior	Nível Superior
Preenchimento (%)	50	100
Altura de camada (mm)	0,24	0,12
Número de perímetros	2 voltas	3 voltas

Com o objetivo de garantir a repetibilidade dos resultados, foram produzidas três réplicas idênticas para cada condição experimental, totalizando 24 amostras, distribuídas em oito rodadas de impressão. As combinações do planejamento fatorial, juntamente com os respectivos valores de obtidos para cada condição, estão organizadas na Tabela 5, que resume as oito corridas de impressão. Vale apontar que, os valores de massa apresentados correspondem às estimativas fornecidas pelo *software* de fatiamento e não às massas reais medidas após a impressão.

Tabela 5 – Corridas de impressão

Corrida	Altura de camada (mm)	Perímetro	Preenchimento Interno (%)	Massa (g)
1	0,12	2	100	85,2
2	0,24	2	100	85,2
3	0,24	3	50	53,3
4	0,24	3	100	84,9
5	0,24	2	50	51,2
6	0,12	3	50	53,6
7	0,12	3	100	84,9
8	0,12	2	50	51,5

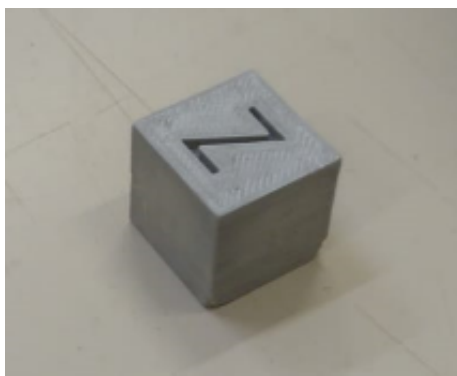
Todas as peças foram dimensionadas com um fator de escala de 120%, como forma de compensar a retração dimensional esperada durante as etapas subsequentes de *debinding* e sinterização.

3.5 Primeiros testes de Impressão

Inicialmente, após a instalação do sistema, foram realizados alguns testes de impressão com o objetivo de compreender melhor o funcionamento da máquina,

incluindo a calibração, tempo de operação e ajustes dos parâmetros básicos. Como se tratava de um equipamento recentemente adquirido, seguiu-se as orientações do fabricante para a execução dos primeiros ensaios, utilizando modelos simples, como cubos de calibração, como mostrado pela Figura 19.

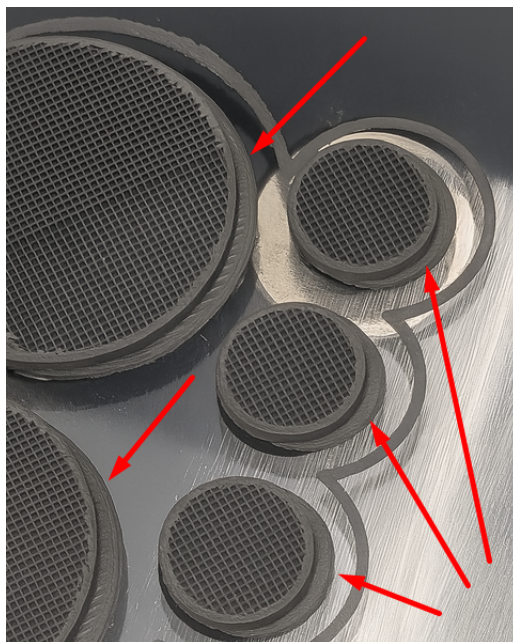
Figura 19 – Primeiro cubo de calibração impresso



Fonte: do Autor (2025)

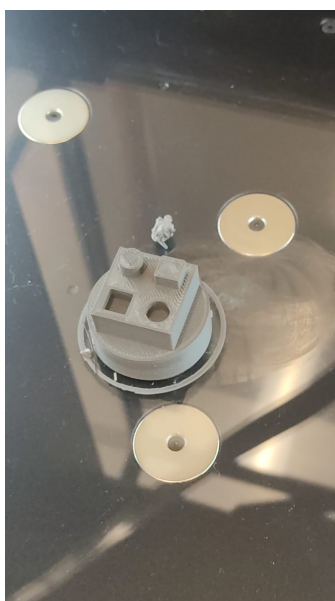
Durante esses testes iniciais, observou-se uma dificuldade na remoção das peças da superfície da mesa de impressão. A primeira abordagem consistiu no uso de espátulas metálicas, no entanto, esse método se mostrou ineficiente e, em alguns casos, provocou pequenos danos nos cantos das peças, especialmente na região da base. A solução adotada foi mergulhar a mesa em água quente ao final da impressão, o que facilitou a soltura das peças ao aquecer a base e romper a adesão existente. Além disso, passou-se a aplicar uma camada de cola adesiva sobre a mesa antes da impressão, com o objetivo de melhorar a fixação da primeira camada e evitar deslocamentos durante a construção da peça.

Após a realização dos testes iniciais, deu-se início à impressão das peças do experimento utilizando os parâmetros previamente definidos no *software* fatiador da Raise3D, o *ideaMaker for Metal*. Contudo, como ilustrado na Figura 20, algumas falhas foram observadas nas primeiras baterias de impressão, sendo a mais evidente o deslocamento entre camadas. Esse defeito está relacionado ao acúmulo de filamento no bico, oriundo de extrusão excessiva de material, que ao se soltar e solidificar-se forma um obstáculo ao deslocamento do bico que, ao se chocar contra esse, acaba por sofrer uma alteração na posição.

Figura 20 – Problemas de deslocamento entre camadas nas primeiras impressões

Fonte: do Autor (2025)

Contudo, após a diminuição do percentual de extrusão, foi possível realizar com sucesso a impressão da primeira peça do trabalho. Para evitar o desperdício de filamento, optou-se por imprimir apenas uma unidade nesta etapa inicial, de modo a validar os ajustes antes de prosseguir com as demais impressões. A Figura 21 evidencia a conclusão da primeira peça impressa.

Figura 21 – Primeira peça do estudo impressa

Fonte: do Autor (2025)

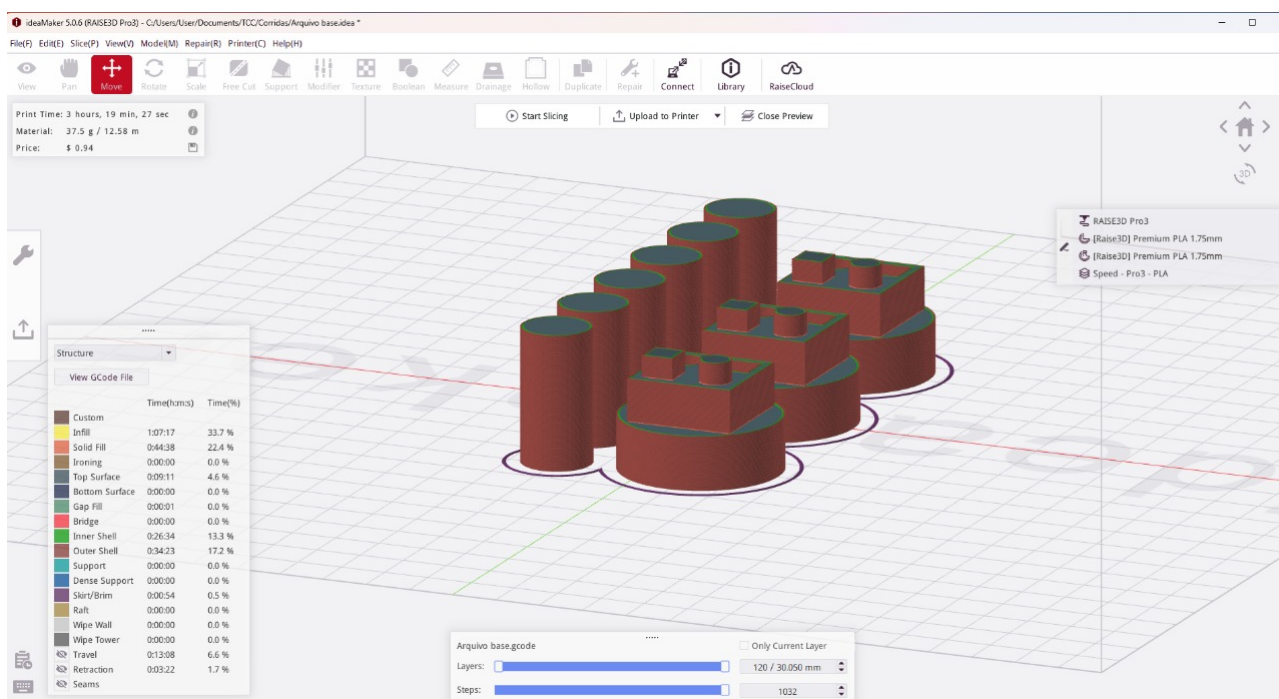
3.6 Preparação do Modelo e Fatiamento

A etapa inicial para a fabricação da peça verde consistiu na modelagem tridimensional no *software* CAD, onde foi concebida a geometria da amostra. Após a finalização da modelagem, o arquivo foi exportado no formato .stl, compatível com *software* de fatiamento utilizado nas impressoras 3D.

Para o presente trabalho, foi utilizado o *software* IdeaMaker for Metal, desenvolvido pela Raise3D. Durante a preparação do modelo para impressão, foi aplicado um fator de escala de 120% nos eixos X, Y e Z, com o objetivo de compensar a retração esperada durante as etapas de *debinding* e sinterização.

A maioria dos parâmetros do fatiador foi mantida conforme os valores padrão do perfil de material Ultrafuse 316L, recomendados pelo fabricante. No entanto, foram personalizados os seguintes parâmetros para o trabalho: altura de camada, densidade de preenchimento interno e número de perímetros (*shells*). Esses ajustes foram realizados com o objetivo de atender a avaliação dimensional das peças impressas ao longo do processo. A Figura 22 ilustra a interface do *software* IdeaMaker for Metal utilizada na preparação do modelo para impressão.

Figura 22 – Interface do *software* IdeaMaker for Metal



Fonte: do Autor (2025)

3.7 Impressão

A fabricação das peças verdes foi realizada na impressora Raise3D Forge1, ilustrada na Figura 23, utilizando o filamento Ultrafuse 316L da BASF. Esse material compósito, compatível com o sistema MetalFuse, é formado por uma matriz polimérica carregada com partículas metálicas refinadas, sendo desenvolvido para processos de extrusão em manufatura aditiva metálica.

Figura 23 – Impressora Forge 1



Fonte: do Autor (2025)

Para compensar a retração dimensional que ocorre nas etapas térmicas subsequentes, todas as peças foram dimensionadas com fator de escala de 120% aplicado nos três eixos. Ademais, para ajudar a fixação das amostras, foi usada a cola Magigoo Pro Metal, uma cola desenvolvida especificamente para o processo de MFFF e para trabalhar junto com o filamento da BASF.

3.8 Debinding

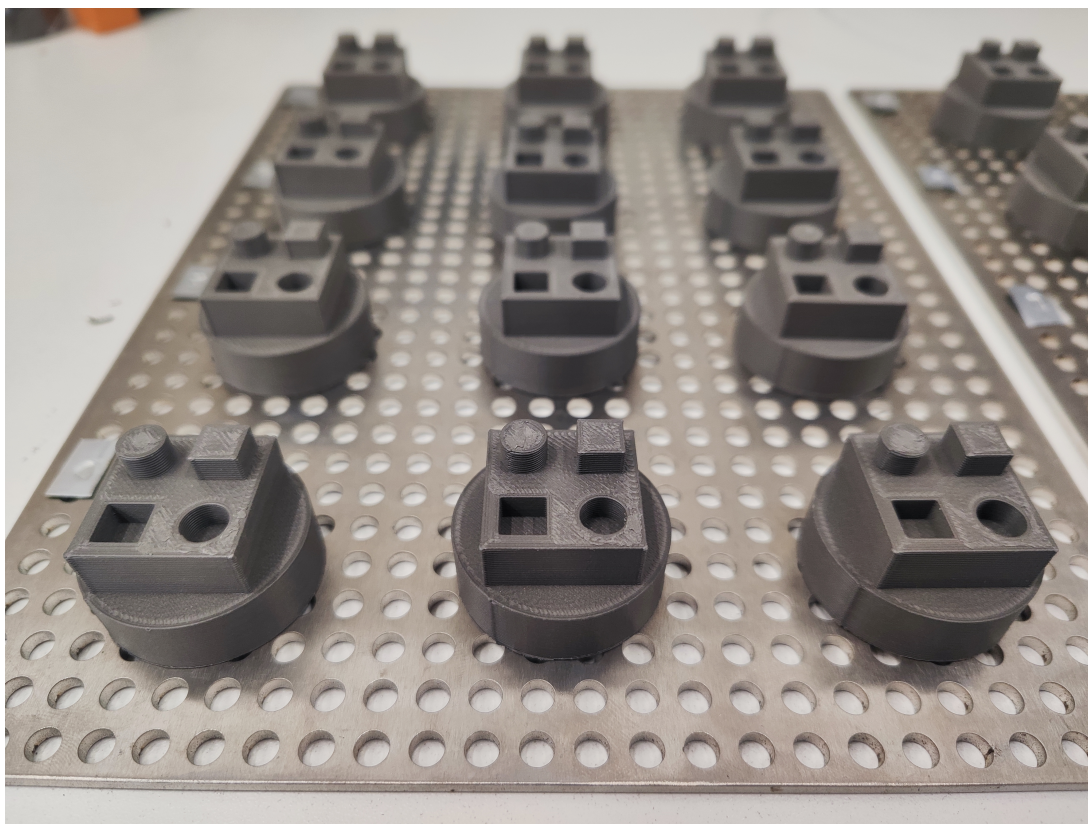
O processo de *debinding* foi conduzido no forno D200-E da fabricante Raise3D, o qual utiliza ácido oxálico como agente químico para a remoção do ligante

das peças verdes. Durante o procedimento, o sistema segue um fluxo de processo, composto por etapas de aquecimento, preservação, infiltração e lavagem.

O processo inicia com o aquecimento da câmara até a estabilização da temperatura interna, criando as condições para o *debinding* químico. Em seguida, a solução de ácido oxálico é introduzida, envolvendo completamente as peças e promovendo a remoção do ligante polimérico. Durante essa fase, o sistema realiza a exaustão dos vapores gerados. Ao término do ciclo, uma etapa de lavagem é executada com o objetivo de eliminar qualquer resíduo de ácido remanescente nas amostras. Todos esses parâmetros são registrados pelo *software* do forno durante o processo, sendo possível extrair para um arquivo no final.

Antes do início do processo de *debinding*, as peças verdes foram posicionadas sobre as bandejas, de forma a garantir um espaçamento entre elas. Esse espaçamento visa permitir a circulação mais homogênea da solução de ácido oxálico em torno de cada amostra, facilitando a remoção do ligante polimérico. A Figura 24 ilustra a estratégia adotada.

Figura 24 – Estratégia de espaçamento entre as amostras

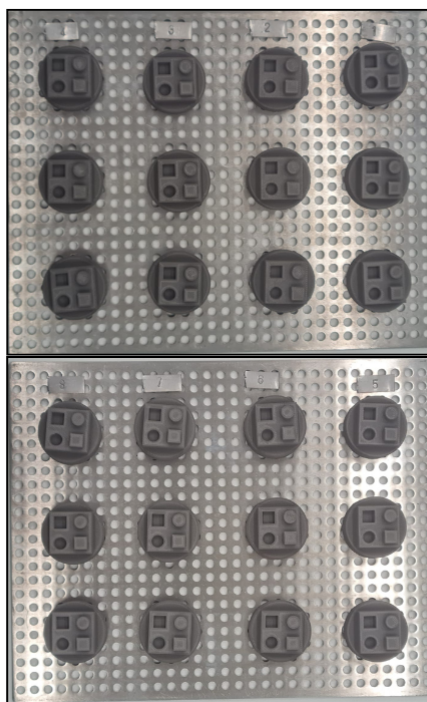


Fonte: do Autor (2025)

A Figura 25 apresenta a disposição das peças verdes organizadas nas bandejas antes de ir para o forno. Devido à quantidade de amostras e à necessidade de

manter espaçamento entre elas, foi necessário utilizar duas bandejas. Essa separação teve como objetivo favorecer a circulação do ácido em torno de cada peça, garantindo uma remoção mais homogênea durante a etapa química.

Figura 25 – Disposição das peças verdes em cima da bandeja



Fonte: do Autor (2025)

Já a Figura 26 mostra as amostras posicionadas nas bandejas dentro da câmara do forno D200-E, momentos antes do início do processo de *debinding*.

Figura 26 – Organização dentro do forno

Fonte: do Autor (2025)

Por fim, a Figura 27 apresenta o forno D200-E, utilizado no processo de *debinding* químico das peças verdes.

Figura 27 – Forno de *Debinding*

Fonte: do Autor (2025)

A Tabela 6 apresenta o perfil de operação configurado para o forno durante o processo de *debinding*. Este processo foi dividido em sete etapas sequenciais,

compostas por ciclos de aquecimento, pausas térmicas, injeção de ácido e no fim uma etapa de lavagem.

Durante as fases de aquecimento, o sistema eleva gradualmente a temperatura da câmara e do ácido, preparando as condições para a reação de remoção do material ligante. As pausas servem para estabilização térmica e para distribuir uniformemente a temperatura. Nas etapas de *debinding*, ocorre a injeção do ácido, com temperatura e vazão ajustadas a fim de remover o ligante. Ao final do ciclo, realiza-se uma lavagem com ácido a 160 °C, visando eliminar resíduos restantes.

Todos os parâmetros, como temperatura da câmara, temperatura do ácido, fluxo de entrada, velocidade da ventoinha, fluxo de ácido e tempo de duração, foram monitorados automaticamente pelo equipamento e seguidos conforme o protocolo recomendado pelo fabricante.

Tabela 6 – Etapa de *Debinding*

	Aquecimento	Pausa	Debinding	Aquecimento	Pausa	Debinding	Lavagem
Temp. da câmara (°C)	105	105	105	105	105	105	120
Temp. do ácido (°C)	150	150	150	150	150	150	160
Aquecedor de entrada (°C)	145	145	145	145	145	145	145
Fluxo de entrada (sccm)	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Velocidade da ventoinha (rpm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Fluxo de ácido (ml/min)	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0
Tempo (min)	60	30	1200	600	600	1080	90

Vale ressaltar que, todas as amostras foram pesadas antes e após o processo de *debinding*, essa medição permite verificar a perda de massa do processo de remoção do ligante, e também serve como um resultado para a efetividade dele. Ao comparar os valores obtidos, é possível verificar se o percentual de remoção do ligante está dentro da faixa esperada, garantindo que o *debinding* ocorreu da forma correta, sem haver necessidade de realizar a etapa novamente, antes do início da sinterização.

3.8.1 Preparação do Ácido

O ácido oxálico utilizado no processo de *debinding* foi adquirido em forma de cristais sólidos. A fim de garantir uma mistura homogênea, o material foi triturado em um triturador para produtos químicos. Então, foi misturado com álcool isopropílico (99,9%) na proporção de 1 parte de massa de ácido para 2,35 partes de álcool, conforme recomendação do fabricante. A preparação da solução foi realizada com o auxílio de um agitador magnético. Após esse preparo, a solução foi colocada dentro do forno.

Figura 28 ilustra o estado original do ácido e o estado que precisa ficar antes de realizar a mistura com o álcool.

Figura 28 – Estado inicial do ácido e o estado final preparada para a mistura com o álcool

Fonte: RAISE3D (2023), adaptado pelo Autor (2025).

3.9 Sinterização

A etapa de sinterização foi iniciada logo após a pesagem das peças marrons. As amostras foram dispostas sobre bandejas de grafite, material escolhido devido à sua resistência a altas temperaturas e estabilidade química. Assim como no *debinding*, o posicionamento das peças dentro da câmara do forno buscou assegurar uma distribuição uniforme, a fim de garantir condições mais homogêneas para todas as amostras.

O processo foi conduzido em atmosfera controlada, abaixo do ponto de fusão do aço inoxidável, promovendo a coalescência entre as partículas metálicas e resultando no aumento da densidade das amostras.

O ciclo térmico completo teve duração aproximada de 24 horas, incluindo fases de aquecimento, patamares de permanência e resfriamento natural ao final. A Figura 29 apresenta o forno Raise3D S200-C utilizado para a execução desta etapa.

Figura 29 – Forno de Sinterização

Fonte: do Autor (2025)

A Tabela 7 apresenta o ciclo completo realizado no forno durante a etapa de sinterização. O processo foi dividido em sete etapas, com modo de aquecimento, temperatura, tempo, fluxo de gás e tipo de atmosfera.

O processo tem início com uma rampa de aquecimento até 600 °C (etapa 1), conduzida em atmosfera de argônio com pressão reduzida, visando eliminar os resíduos remanescentes nas peças. Posteriormente, ocorre um patamar de estabilização nesta mesma temperatura (etapa 2), a fim de garantir a remoção do material orgânico sem prejudicar a estabilidade dimensional das amostras.

As etapas 3 e 4 marcam o início efetivo da sinterização, caracterizadas pela elevação térmica até 1100 °C sob vácuo completo. Nesta condição, as partículas metálicas começam o processo de coalescência, sendo seguida por uma estabilização que favorece a uniformização de temperatura e prepara o material para a começar a se densificar.

Durante a etapa 5, a temperatura atinge 1380 °C com a reintrodução de argônio em fluxo regulado e pressão parcial, promovendo a sinterização definitiva através do fechamento de poros e o aumento da densidade. Esta fase é complementada por nova estabilização térmica (etapa 6), que consolida a microestrutura e desenvolve

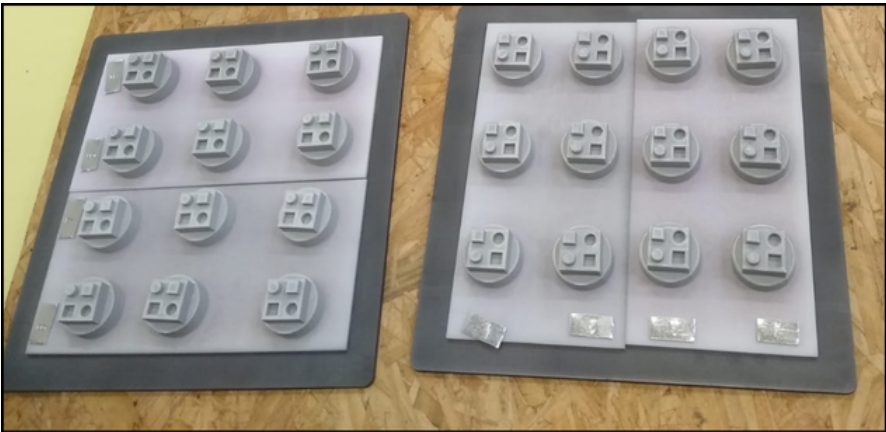
as propriedades mecânicas. O ciclo se encerra com o resfriamento natural da câmara até 80 °C (etapa 7), realizado sob suave fluxo de gás inerte para prevenir tensões térmicas e manter a integridade das peças processadas.

Tabela 7 – Tabela da Etapa de Sinterização

Etapa	Modo de Aquecimento	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Tipo do Processo	Fluxo de Gás (sccm)	Tipo do Gás
1	Modo Temporizado	600	300	Debinding sob pressão negativa	2000	AR
2	Estabilização térmica	600	90	Debinding sob pressão negativa	2000	AR
3	Modo Temporizado	1100	150	Sinterização interna a vácuo	0	AR
4	Estabilização térmica	1100	30	Sinterização interna a vácuo	0	AR
5	Modo Temporizado	1380	120	Sinterização com pressão	2500	AR
6	Estabilização térmica	1380	180	Sinterização com pressão	2500	AR
7	Fim	80	500	Resfriamento natural	500	AR

Por fim, a Figura 30 ilustra a aparência final da peça após o processo de sinterização.

Figura 30 – Peças pós Sinterização



Fonte: do Autor (2025)

3.10 Análise de Variância

Para entender melhor como os parâmetros de impressão poderiam influenciar nas dimensões finais das peças, após a impressão e a sinterização, foi aplicada uma análise de variância do tipo *One-Way* (ANOVA de um fator). Esse método estatístico é utilizado quando se pretende comparar uma determinada variável entre dois ou mais grupos diferentes.

No contexto deste trabalho, a ANOVA foi utilizada para avaliar se alterações em parâmetros específicos da impressão, como a espessura de camada, a densidade de preenchimento e a quantidade de perímetros, provocavam variações nas medidas dimensionais das peças já impressas e sinterizadas.

Os cálculos e testes estatísticos foram realizados utilizando a ferramenta de análise de dados do Microsoft Excel, que possibilitou a execução da ANOVA com

praticidade, além da obtenção dos valores de p e da estatística F necessários para a interpretação dos resultados.

Com base nos dados obtidos, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA). Em todos os casos, as análises de variância foram conduzidas fixando-se um dos parâmetros de comparação. Assim, foram criadas seis condições de análise, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo das nomenclaturas das condições de análise

Análise de Condição	Descrição
AC_A12	ANOVA realizada com todas as amostras com altura de camada de 0,120 mm
AC_A24	ANOVA realizada com todas as amostras com altura de camada de 0,240 mm
AC_P100	ANOVA realizada com todas as amostras com preenchimento interno de 100%
AC_P50	ANOVA realizada com todas as amostras com preenchimento interno de 50%
AC_2V	ANOVA realizada com todas as amostras com 2 contornos
AC_3V	ANOVA realizada com todas as amostras com 3 contornos

3.11 Medição Dimensional

Após a conclusão das oito rodadas de impressão, todas as peças verdes foram separadas, identificadas e marcadas individualmente, a fim de evitar confusões entre as amostras durante as etapas seguintes. A coleta dos parâmetros ocorreu no laboratório de metrologia do IFSC, utilizando instrumentos de medição.

Para essa etapa, empregaram-se os seguintes equipamentos:

- Relógio comparador da Insize, empregado para a verificação da altura dos ressal-tos, cilíndrico e quadrado, das amostras. O instrumento possui resolução de 0,01 mm, valor que também foi considerado como estimativa de incerteza de medição para as leituras realizadas.
- Máquina de Medição por Coordenadas (CMM) da fabricante LK, modelo G80-C, equipada com o *software* Modus. Este equipamento possui erro máximo volumétrico conforme a norma ISO 10360-2, de $\pm(3 + \frac{L}{300}) \mu\text{m}$, sendo L a dimensão medida em milímetros.

Com a medição da peça verde, foi possível registrar dados dimensionais iniciais, que servem como base para análises após as etapas térmicas.

3.11.1 Medição das peças verdes

Para a medição das peças verdes, foi utilizada uma máquina de medição por coordenadas (CMM), equipada com uma ponteira de apalpador da marca Renishaw. O equipamento permitiu a coleta das medidas das amostras, com confiabilidade.

As Figuras 31 e 32 apresentam o instrumento e a máquina utilizados para a medição das peças verdes neste estudo. A Figura 31 demonstra a aplicação do relógio comparador, utilizado para medir altura, por fim, a Figura 32 demonstra a aplicação da máquina de medição por coordenadas, utilizado para medir o restante das dimensões.

Figura 31 – Medição com relógio comparador



Fonte: do Autor (2025)

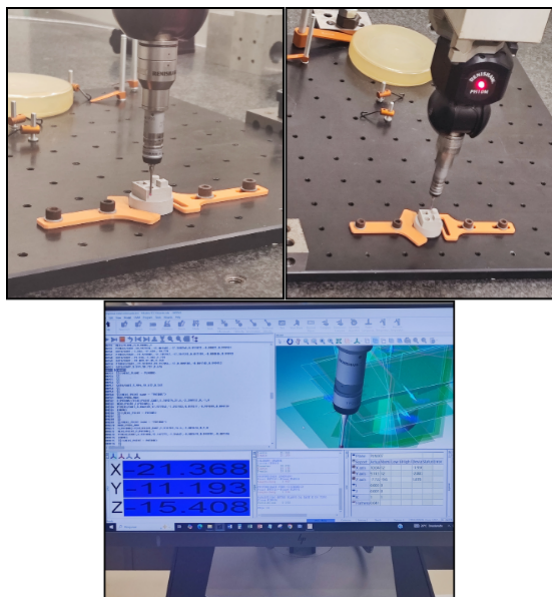
Figura 32 – Coleta das dimensões com a CMM das peças verdes

Fonte: do Autor (2025)

3.11.2 Medição das peças brancas

Após a conclusão do processo de sinterização, foram realizadas as medições dimensionais finais das amostras no laboratório de Metrologia. Para essa etapa, utilizou-se a mesma máquina de medição por coordenadas (CMM), que foi usada para coletar as dimensões das amostras da peça verde, a qual permitiu a obtenção das dimensões das peças. Para a medição da altura, devido à praticidade, foi mantido o uso do relógio comparador, garantindo confiabilidade nos resultados com menor tempo de operação.

A Figura 33 apresenta a máquina de medição por coordenadas (CMM) utilizada nesta etapa, com as peças sinterizadas posicionadas para a execução das medições dimensionais finais e o *software* executando o programa feito.

Figura 33 – Coleta das dimensões com a CMM das peças brancas

Fonte: do Autor (2025)

3.12 Pesagem das Amostras

3.12.1 Pesagem das peças verdes

Logo após a medição das dimensões de cada uma das peças, foi realizado a pesagem de todas as amostras. Esse procedimento tem como objetivo registrar a massa de cada uma das peças nessa etapa, a fim de, avaliar as variações ao longo das próximas etapas do processo.

Para a pesagem foi utilizada uma balança digital de precisão, modelo KN 2200/2 da marca KN Waagen com precisão de 0,01g, realizadas no laboratório de manufatura aditiva do IFSC. A Figura 34 apresenta a balança de precisão utilizada para a pesagem das amostras nas diferentes etapas do processo.

Figura 34 – Balança de precisão digital KN Waagen

Fonte: do Autor (2025)

Conforme a orientação do fabricante, há a possibilidade de fazer um cálculo estimativo do tempo que o processo de remoção do ligante levará. A partir da espessura da massa da amostra, é possível estimar o tempo com base em uma equação fornecida por ele, apresentada na Equação 1:

$$y = 0,0282x^2 + 0,1342x \quad (1)$$

em que y é o tempo estimado de *debinding* (em horas) e x é a espessura máxima da peça (em milímetros).

3.12.2 Pesagem das peças marrom

Tendo em vista que, após o *debinding*, as peças se encontram sem o material ligante e compostas apenas pela matriz metálica de aço, sua estrutura torna-se frágil e suscetível a danos por manuseio inadequado. Por esse motivo, foi realizado apenas a pesagem das amostras após o processo, utilizando novamente a mesma balança de precisão mencionada no capítulo anterior.

Com o peso medido antes e depois da etapa de *debinding*, foi possível calcular a taxa de remoção do ligante (*debinding rate*), que representa a porcentagem de massa perdida durante o processo. De acordo com a (RAISE3D, 2023), para o filamento Ultrafuse 316L, uma taxa igual ou superior a 10,1% é considerada satisfatória, dispensando a necessidade de uma nova etapa de *debinding* e permitindo o prosseguimento direto para a sinterização.

A Equação 2 possibilita determinar o percentual de remoção do ligante. A massa removida é calculada pela diferença entre o peso da peça verde (inicial) e da peça marrom (final), sendo o resultado final expresso em percentual através da multiplicação por 100.

$$\text{Debinding rate} = \left(\frac{\text{Peso da peça antes do debinding} - \text{Peso da peça após o debinding}}{\text{Peso da peça antes do debinding}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

3.12.3 Pesagem das peças brancas

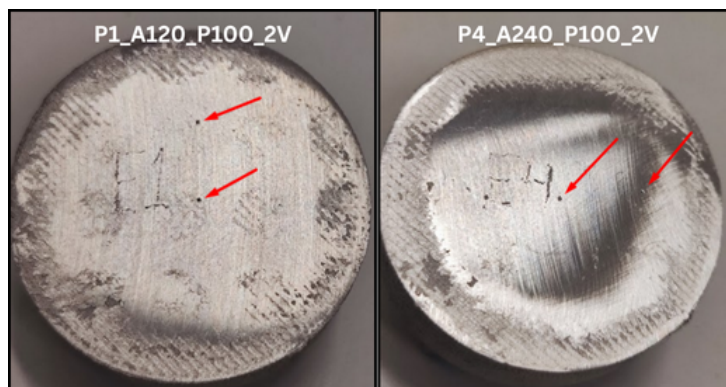
Após a sinterização, as peças foram pesadas novamente para registrar a massa final, agora na condição sinterizada, também, conhecida como peça branca. A pesagem foi realizada seguindo o mesmo procedimento adotado nas etapas anteriores, utilizando a balança de precisão previamente mencionada. Essa etapa teve como objetivo comparar a variação de massa ao longo do processo.

3.13 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza foi executado no Laboratório de Materiais do IFSC com objetivo de avaliar a resistência das peças sinterizadas. Duas amostras com alturas de camada diferentes foram selecionadas, preservando-se constantes os demais parâmetros de impressão (preenchimento interno e perímetros), de modo a avaliar especificamente o impacto da variação da espessura de camada.

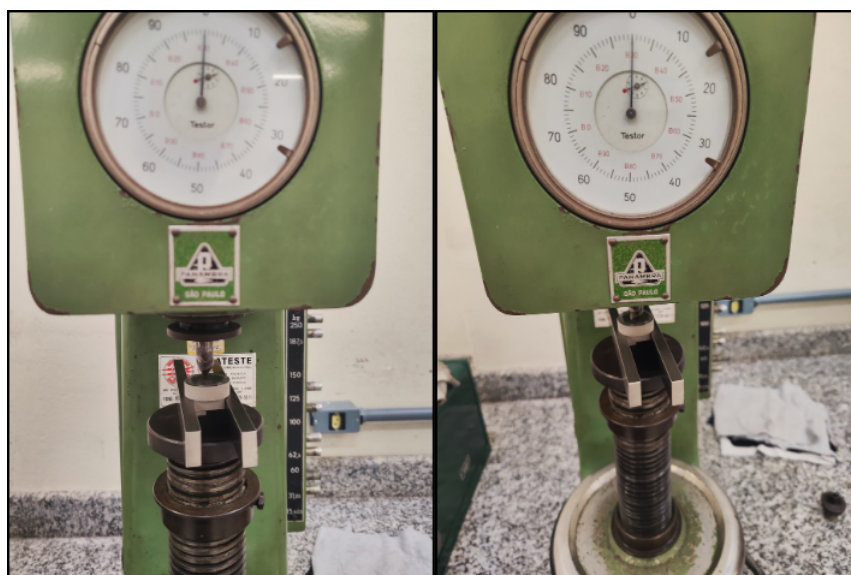
O preparo das amostras incluiu o lixamento da superfície de base utilizando uma lixadeira metalográfica, modelo DP9a da marca Struers. Para esta etapa, foi utilizada lixa d'água P320, suficiente para nivelar a base e deixar amostra a superfície sem comprometer a estrutura da peça.

A Figura 35 mostra duas amostras utilizadas no ensaio: no lado esquerdo, a peça P1_A120_P100_2V, da corrida 1, e no direito, a P4_A240_P100_2V, da corrida 2. As setas em vermelho indicam o local onde foi aplicada a pré-carga de 10kgf durante 10 segundos. Ambas pertencem a grupos com 100% de preenchimento interno e 2 voltas de perímetro, sendo que a única diferença entre elas é a altura de camada: 0,12mm para a peça da esquerda e 0,24mm para a peça da direita.

Figura 35 – Amostras polidas utilizadas no ensaio de dureza Vickers

Fonte: do Autor (2025)

O ensaio de dureza foi realizado em um durômetro Rockwell, adaptado para o método Vickers, da marca Wolpert, modelo Testor HT 1a, baseado na avaliação da impressão gerada por um indentador piramidal para cálculo do valor de dureza. A Figura 36 exibe o aparelho utilizado no procedimento.

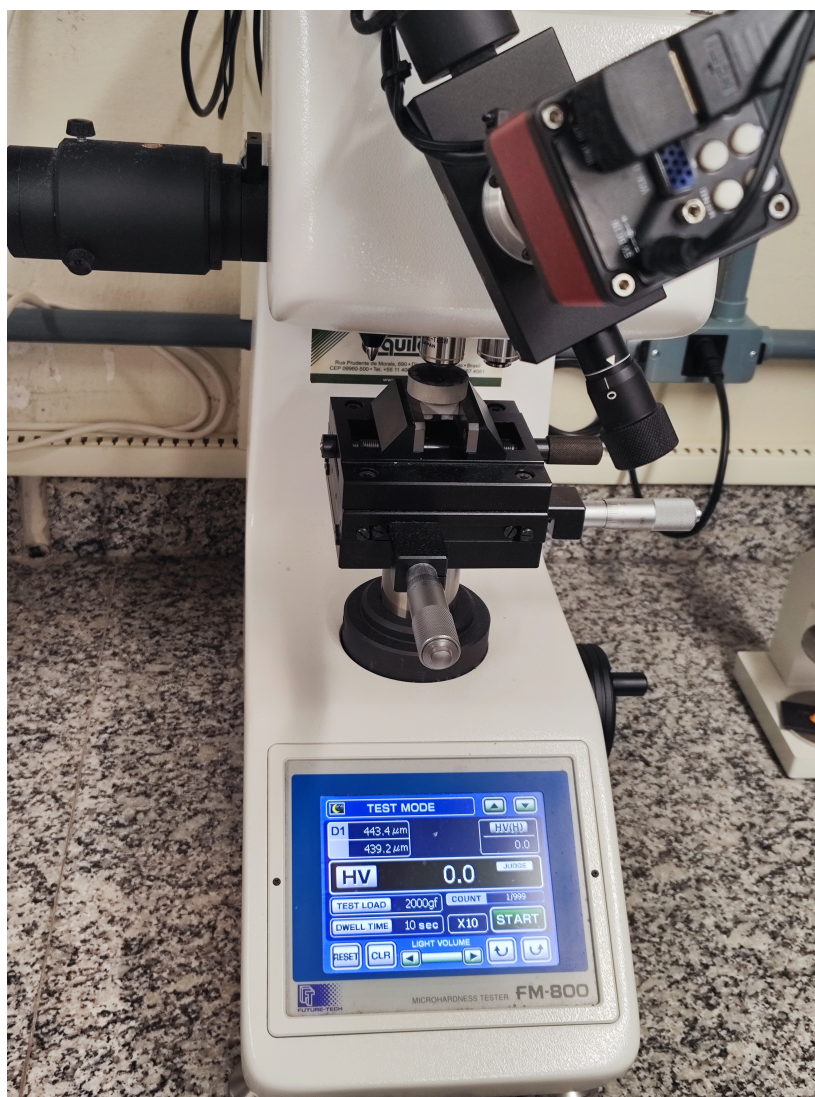
Figura 36 – Durômetro Rockwell adaptado para Vickers e a peça no posicionada no local

Fonte: do Autor (2025)

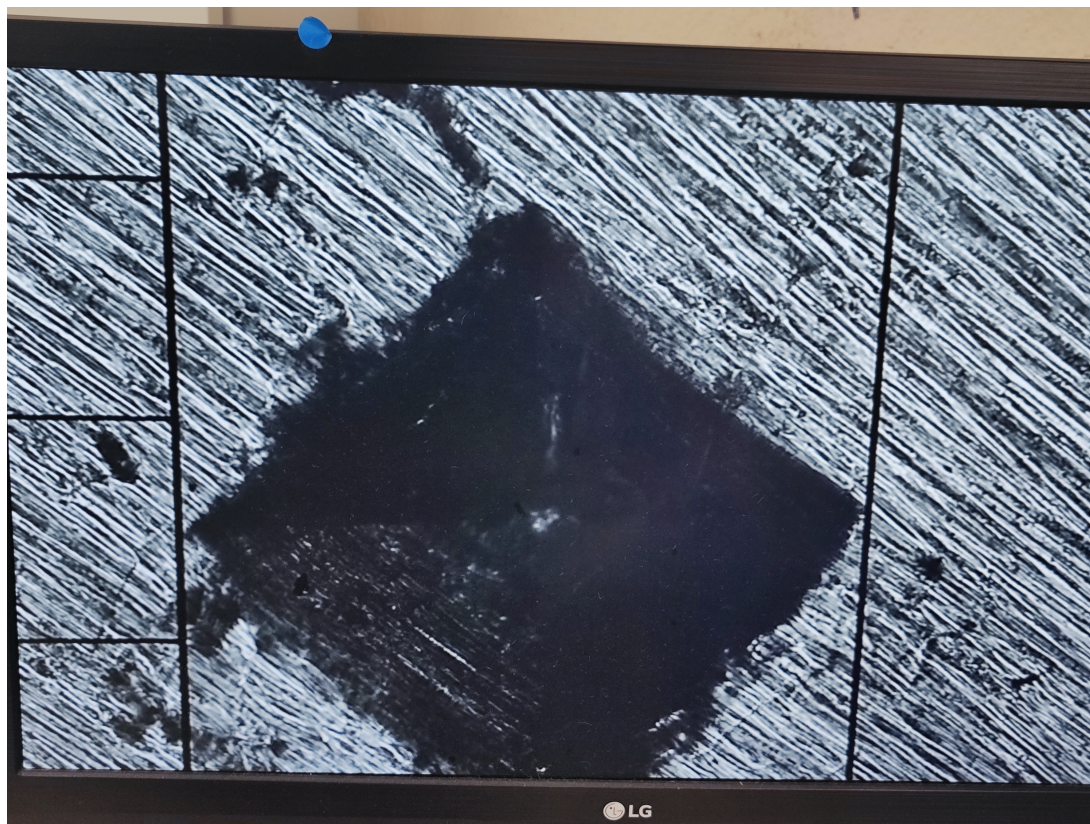
Após a marcação, executou-se a medição das diagonais para fazer o cálculo e obter o valor da dureza. O procedimento foi conduzido no microdurômetro Future Tech FM-800, projetado para análises de microdureza. Através do sistema óptico, foram mensuradas as duas diagonais da marca (D_1 e D_2), permitindo o cálculo do índice de dureza Vickers baseado na média das medidas registradas.

As Figuras 37 e 38 apresentam, respectivamente, o equipamento utilizado e a projeção da marca de indentação exibida no monitor durante a medição.

Figura 37 – Microdurômetro utilizado



Fonte: do Autor (2025)

Figura 38 – Formato de pirâmide feita pelo durômetro

Fonte: do Autor (2025)

Para o cálculo da dureza Vickers, inicialmente foram medidas as duas diagonais da impressão deixada pelo durômetro, identificadas como D_1 e D_2 , utilizando o sistema óptico do microdurômetro. A seguir, é obtida a média aritmética dessas diagonais, por meio da equação 3.

$$d = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (3)$$

Com esse valor, aplica-se a fórmula padrão da dureza Vickers, que relaciona a carga aplicada (F , em kgf) com a área da impressão projetada, por meio da equação 4.

$$HV = \frac{1,854 \cdot F}{d^2} \quad (4)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos ao longo do processo de fabricação. Serão analisadas as dimensões das peças nas três etapas principais: após a impressão (peças verdes), após o *debinding* (peças marrons) e após a sinterização (peças brancas), com foco na avaliação dimensional e na variação entre os estágios.

4.1 Obtenção das peças

4.1.1 Avaliação da Impressão

Para facilitar a identificação e permitir a correlação entre cada grupo e os fatores de impressão, foi adotada uma nomenclatura padronizada. Cada grupo recebeu um código indicando os fatores de impressão: altura de camada, porcentagem de preenchimento e número de perímetros. Por exemplo, o grupo A12_P100_2V refere-se às peças produzidas com altura de camada de 0,12 mm, preenchimento de 100% e dois perímetros. Com base nisso, as peças dentro de cada grupo foram nomeadas de forma sequencial (P1, P2, P3). Assim, um identificador como P1_A12_P100_2V já informa de maneira direta as condições de impressão daquela peça, facilitando a leitura e a interpretação dos resultados.

As medições das peças verdes foram realizadas utilizando uma máquina de medição por coordenadas (CMM) e o relógio comparador, garantindo confiabilidade na coleta dos dados. Foram avaliadas todas as dimensões da geometria da peça, incluindo diâmetros, comprimentos, alturas e profundidades. Os resultados obtidos estão organizados na Tabela 9, agrupados conforme os oito grupos experimentais, e também apresentam os valores médios e a amplitude para cada dimensão analisada.

Tabela 9 – Medidas das Peças Verdes

Peça	Grupo	D1	R1	R2	L1	L2	R3C	D2	P1	L4	L3	P2	D3	R3Q	L6	L5
P1	G_A12_P100_2V	36,007	11,793	9,578	24,103	24,071	4,830	7,481	4,801	6,984	6,969	4,797	6,874	4,780	7,377	7,382
P2		36,013	11,785	9,575	24,070	24,069	4,820	7,426	4,816	6,960	6,984	4,813	6,847	4,780	7,353	7,355
P3		36,028	11,844	9,571	24,101	24,073	4,800	7,440	4,808	6,943	6,964	4,802	6,857	4,790	7,329	7,345
		Média	36,016	11,807	9,575	24,091	24,071	4,817	7,449	4,808	6,962	6,972	4,804	6,859	4,783	7,353
	Amplitude	0,021	0,059	0,007	0,033	0,004	0,030	0,055	0,015	0,041	0,020	0,016	0,027	0,010	0,048	0,037
P4	G_A24_P100_2V	36,012	11,816	9,670	24,087	24,091	4,730	7,490	4,799	6,967	6,987	4,843	6,927	4,780	7,411	7,411
P5		36,060	11,456	9,637	24,071	24,088	4,760	7,492	4,923	7,004	6,995	4,923	6,926	4,850	7,377	7,398
P6		36,021	11,842	9,677	24,083	24,071	4,860	7,474	4,801	6,997	7,019	4,831	6,913	4,840	7,424	7,403
		Média	36,031	11,705	9,661	24,080	24,083	4,783	7,485	4,841	6,989	7,000	4,866	6,922	4,823	7,404
	Amplitude	0,048	0,386	0,040	0,016	0,020	0,130	0,018	0,124	0,037	0,032	0,092	0,014	0,070	0,047	0,012
P7	G_A24_P50_3V	35,952	11,773	9,606	24,004	23,979	4,830	7,356	4,781	7,065	7,081	4,815	6,941	4,810	7,325	7,281
P8		35,932	11,871	9,596	24,026	23,974	4,850	7,317	4,780	7,060	7,099	4,829	6,934	4,840	7,316	7,277
P9		35,925	11,790	9,599	24,011	23,976	4,850	7,292	4,810	7,060	7,089	4,839	6,945	4,860	7,267	7,287
		Média	35,936	11,811	9,600	24,014	23,976	4,843	7,322	4,790	7,062	7,090	4,828	6,940	4,837	7,303
	Amplitude	0,027	0,098	0,010	0,022	0,005	0,020	0,064	0,030	0,005	0,018	0,024	0,011	0,050	0,058	0,010
P10	G_A24_P100_3V	35,971	11,780	9,627	24,036	24,058	4,840	7,443	4,783	7,034	7,074	4,798	6,919	4,950	7,350	7,353
P11		35,962	11,884	9,619	24,025	24,060	4,790	7,461	4,752	7,031	7,088	4,801	6,878	4,880	7,359	7,369
P12		35,992	11,786	9,623	24,038	24,052	4,850	7,451	4,794	7,057	7,098	4,843	6,935	4,940	7,375	7,352
		Média	35,975	11,817	9,623	24,033	24,057	4,827	7,452	4,776	7,041	7,087	4,814	4,923	7,361	7,358
	Amplitude	0,030	0,104	0,008	0,013	0,008	0,060	0,018	0,042	0,026	0,024	0,045	0,057	0,070	0,025	0,017
P13	G_A24_P50_2V	35,961	11,841	9,629	24,043	24,006	4,820	7,333	4,795	7,069	7,075	4,804	6,977	4,840	7,290	7,290
P14		35,951	11,888	9,625	24,048	23,988	4,790	7,361	4,788	7,065	7,096	4,826	6,970	4,810	7,333	7,272
P15		35,956	11,862	9,625	24,029	23,994	4,790	7,410	4,783	7,071	7,087	4,793	6,979	4,840	7,373	7,286
		Média	35,956	11,864	9,626	24,040	23,996	4,800	7,368	4,789	7,068	7,086	4,808	6,975	4,830	7,332
	Amplitude	0,010	0,047	0,004	0,019	0,018	0,030	0,077	0,012	0,006	0,021	0,033	0,009	0,030	0,083	0,018
P16	G_A12_P50_3V	35,964	11,830	9,610	24,045	23,988	4,840	7,316	4,800	7,038	7,064	4,828	6,898	4,810	7,278	7,270
P17		35,958	11,759	9,606	24,039	23,991	4,840	7,323	4,833	7,047	7,060	4,855	6,907	4,910	7,266	7,275
P18		35,960	11,798	9,611	24,032	23,976	4,810	7,302	4,787	7,023	7,078	4,810	6,941	4,820	7,276	7,284
		Média	35,961	11,796	9,609	24,039	23,985	4,830	7,314	4,807	7,036	7,067	4,831	6,915	4,847	7,273
	Amplitude	0,006	0,071	0,005	0,013	0,015	0,030	0,021	0,046	0,024	0,018	0,045	0,043	0,100	0,012	0,014
P19	G_A12_P100_3V	36,001	11,883	9,579	24,058	24,054	4,720	7,401	4,737	7,004	7,072	4,731	6,932	4,750	7,301	7,328
P20		36,014	11,795	9,580	24,067	24,077	4,840	7,438	4,789	6,999	7,066	4,793	6,935	4,840	7,325	7,365
P21		36,014	11,732	9,587	24,050	24,051	4,810	7,390	4,799	7,024	7,046	4,807	6,914	4,760	7,314	7,334
		Média	36,010	11,803	9,582	24,058	24,061	4,790	7,410	4,775	7,009	7,061	4,777	6,927	4,783	7,313
	Amplitude	0,013	0,151	0,008	0,017	0,026	0,120	0,048	0,062	0,025	0,026	0,076	0,021	0,090	0,024	0,037
P22	G_A12_P50_2V	35,957	11,941	9,587	24,048	23,989	4,770	7,331	4,714	7,045	7,067	4,734	6,943	4,810	7,312	7,274
P23		35,982	11,863	9,595	24,047	23,988	4,790	7,321	4,784	7,041	7,065	4,773	6,954	4,840	7,276	7,282
P24		35,992	11,972	9,597	24,054	23,972	4,730	7,325	4,721	7,051	7,063	4,726	6,940	4,770	7,296	7,293
		Média	35,977	11,925	9,593	24,050	23,983	4,763	7,326	4,740	7,046	7,065	4,744	6,946	4,807	7,295
	Amplitude	0,035	0,109	0,010	0,007	0,017	0,060	0,010	0,070	0,010	0,004	0,047	0,014	0,070	0,036	0,019

O cálculo da porcentagem de desvio (DP%) foi realizado com base na diferença entre o valor da média medida e o valor de referência, conforme mostrado na equação 5, e seguindo a mesma abordagem realizada por ALYAMMAHI *et al.* (2021).

$$DP(\%) = \left(\frac{|Média medida - Valor de referência|}{Valor de referência} \right) \times 100 \quad (5)$$

A Tabela 10 apresenta os resultados das medições dimensionais das peças verdes, divididas por grupo. Para cada dimensão analisada, foram registrados os valores de média, desvio padrão em milímetros (DP) e a porcentagem de desvio (DP%), permitindo avaliar o processo de impressão em diferentes condições. Vale apontar que, foi utilizado um fator de escala menor que o fabricante recomenda, que é na ordem de 122% para o eixo Z e de 119% para o plano XY, no presente estudo foi utilizado um fator de 120% no plano XY e no plano Z para todos os parâmetros.

Tabela 10 – Tabela da Média, Desvio Padrão e Porcentagem de Desvio de cada Grupo das amostras Impressas

Grupo	Parâmetro	D1	R1	R2	L1	L2	R3C	D2	P1	L4	L3	P2	D3	R3Q	L6	L5
G_A12_P100_2V	Média (mm)	36,020	11,810	9,570	24,090	24,070	4,820	7,450	4,810	6,960	6,970	4,800	6,860	4,780	7,350	7,360
	DP (mm)	0,011	0,032	0,004	0,019	0,002	0,015	0,029	0,008	0,021	0,010	0,008	0,014	0,006	0,024	0,019
	PD (%)	0,044	1,606	0,264	0,381	0,296	0,347	3,458	0,174	3,301	3,162	0,083	4,731	0,347	2,125	2,231
G_A24_P100_2V	Média (mm)	36,030	11,700	9,660	24,080	24,080	4,780	7,490	4,840	6,990	7,000	4,870	6,920	4,820	7,400	7,400
	DP (mm)	0,026	0,216	0,021	0,008	0,011	0,068	0,010	0,071	0,020	0,017	0,050	0,008	0,038	0,024	0,006
	PD (%)	0,086	2,461	0,639	0,335	0,347	3,963	0,854	2,926	2,773	1,368	3,861	0,486	2,833	2,829	
G_A24_P50_3V	Média (mm)	35,940	11,810	9,600	24,010	23,980	4,840	7,320	4,790	7,060	7,090	4,830	6,940	4,840	7,300	7,280
	DP (mm)	0,014	0,052	0,005	0,011	0,003	0,012	0,032	0,017	0,003	0,009	0,012	0,006	0,025	0,031	0,005
	PD (%)	0,177	1,572	0,003	0,057	0,099	0,903	1,690	0,201	1,921	1,532	0,576	3,611	0,764	1,426	1,134
G_A24_P100_3V	Média (mm)	35,980	11,820	9,620	24,030	24,060	4,830	7,450	4,780	7,040	7,090	4,810	6,910	4,920	7,360	7,360
	DP (mm)	0,015	0,058	0,004	0,007	0,004	0,032	0,009	0,022	0,014	0,012	0,025	0,029	0,038	0,013	0,010
	PD (%)	0,069	1,528	0,240	0,138	0,236	0,556	3,495	0,493	2,213	1,574	0,292	4,019	2,569	2,241	2,194
G_A24_P50_2V	Média (mm)	35,960	11,860	9,630	24,040	24,000	4,800	7,370	4,790	7,070	7,090	4,810	6,980	4,830	7,330	7,280
	DP (mm)	0,005	0,024	0,002	0,010	0,009	0,017	0,039	0,006	0,003	0,011	0,017	0,005	0,017	0,042	0,009
	PD (%)	0,122	1,136	0,274	0,167	0,017	0,000	2,333	0,236	1,829	1,583	0,160	3,120	0,625	1,833	1,148
G_A12_P50_3V	Média (mm)	35,960	11,860	9,620	24,040	23,990	4,810	7,360	4,790	7,060	7,080	4,820	6,950	4,820	7,330	7,280
	DP (mm)	0,007	0,029	0,009	0,010	0,003	0,029	0,047	0,009	0,018	0,017	0,020	0,044	0,017	0,048	0,009
	PD (%)	0,119	1,167	0,208	0,169	0,042	0,139	2,255	0,201	1,972	1,634	0,326	3,486	0,417	1,778	1,056
G_A12_P100_3V	Média (mm)	35,960	11,820	9,610	24,040	23,990	4,820	7,350	4,810	7,050	7,070	4,830	6,930	4,850	7,310	7,280
	DP (mm)	0,004	0,053	0,010	0,008	0,003	0,029	0,052	0,025	0,017	0,015	0,031	0,044	0,051	0,059	0,008
	PD (%)	0,113	1,525	0,142	0,157	0,038	0,486	2,079	0,111	2,056	1,801	0,528	3,778	1,111	1,468	1,069
G_A12_P50_2V	Média (mm)	35,960	11,800	9,610	24,040	23,990	4,830	7,310	4,810	7,040	7,070	4,830	6,920	4,850	7,270	7,280
	DP (mm)	0,003	0,036	0,003	0,007	0,008	0,017	0,011	0,024	0,012	0,009	0,023	0,023	0,055	0,006	0,007
	PD (%)	0,109	1,703	0,094	0,161	0,063	0,625	1,579	0,139	2,278	1,843	0,646	3,954	0,972	1,019	1,060

Com base na tabela apresentada, é possível observar que os parâmetros que se encontram no plano XY, como D1, L1 e L2, demonstraram de forma geral valores reduzidos de porcentagem de desvio (PD%), variando entre aproximadamente 0,10% e 0,30%. No entanto, as dimensões que deixam de ter a mesa como referência e passam a ser depositadas sobre camadas previamente extrudadas, como D2, L4, L3, D3, L6 e L5, atingiram valores mais alto, variando entre 1,01% e 4,73% para a maioria dos grupos. Esse comportamento está associado ao acúmulo de pequenas variações durante a deposição sucessiva de camadas, o que influencia diretamente na precisão dimensional dessas regiões.

Por outro lado, os parâmetros associados ao eixo Z apresentaram um comportamento mais estável. Elementos como R2, R3C, R3Q, P1 e P2 registraram valores de PD% reduzidos, em alguns casos até inferiores aos observados nas dimensões do plano XY. Esse resultado indica que, mesmo sendo formados a partir de camadas previamente depositadas, esses parâmetros não sofreram variações significativas, demonstrando boa repetibilidade no processo de deposição ao longo do eixo Z. Isso mostra que o controle da dimensão nessas regiões ocorrem de uma melhor forma, no entanto, para o plano XY não ocorreu da mesma forma, principalmente levando em conta os ressaltos que não tiveram sua referência a base da mesa.

Além disso, comparando os grupos G_A12_P100_2V e G_A12_P100_3V, que diferem apenas pelo número de perímetros, nota-se que o grupo G_A12_P100_3V apresentou valores menores de PD% na maioria dos parâmetros. Isso sugere que o aumento no número de perímetros contribuiu para maior estabilidade dimensional, especialmente em regiões que não possui a mesa de impressão como referência.

A Tabela 11 apresenta os valores médios obtidos para cada parâmetro dimensional dos grupos analisados, comparados com os valores de referência definidos

no *software* de fatiamento ideaMaker for Metal, do fabricante.

Tabela 11 – Comparação dos valores médios medidos com as dimensões de referência do ideaMaker

Grupo	D1 (mm)	R1 (mm)	R2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	R3C (mm)	D2 (mm)	P1 (mm)	L4 (mm)	L3 (mm)	P2 (mm)	D3 (mm)	R3Q (mm)	L6 (mm)	L5 (mm)
ideaMaker	36,000	12,000	9,600	24,000	24,000	4,800	7,200	4,800	7,200	7,200	4,800	7,200	4,800	7,200	7,200
G_A12_P100_2V	36,016	11,807	9,575	24,091	24,071	4,817	7,449	4,808	6,962	6,972	4,804	6,859	4,783	7,353	7,361
G_A24_P100_2V	36,031	11,705	9,661	24,080	24,083	4,783	7,485	4,841	6,989	7,000	4,866	6,922	4,823	7,404	7,404
G_A24_P50_3V	35,936	11,811	9,600	24,014	23,976	4,843	7,322	4,790	7,062	7,090	4,828	6,940	4,837	7,303	7,282
G_A24_P100_3V	35,975	11,817	9,623	24,033	24,057	4,827	7,452	4,776	7,041	7,087	4,814	6,911	4,923	7,361	7,358
G_A24_P50_2V	35,956	11,864	9,626	24,040	23,996	4,800	7,368	4,789	7,068	7,086	4,808	6,975	4,830	7,332	7,283
G_A12_P50_3V	35,961	11,796	9,609	24,039	23,985	4,830	7,314	4,807	7,036	7,067	4,831	6,915	4,847	7,273	7,276
G_A12_P100_3V	36,010	11,803	9,582	24,058	24,061	4,790	7,410	4,775	7,009	7,061	4,777	6,927	4,783	7,313	7,342
G_A12_P50_2V	35,977	11,925	9,593	24,050	23,983	4,763	7,326	4,740	7,046	7,065	4,744	6,946	4,807	7,295	7,283

De uma forma geral, os valores das médias de parâmetros como D1, L1 e L2 ficaram próximas da referência, indicando boa precisão para grupos com altura de camada 0,12mm e 100% de preenchimento interno. Por outro lado, as médias de dimensões como D2 e D3, apresentaram maiores diferenças em relação aos valores do ideaMaker, o que pode estar relacionado à construção dessas regiões sobre camadas já depositadas, resultando em pequenas variações acumuladas ao longo do processo de impressão.

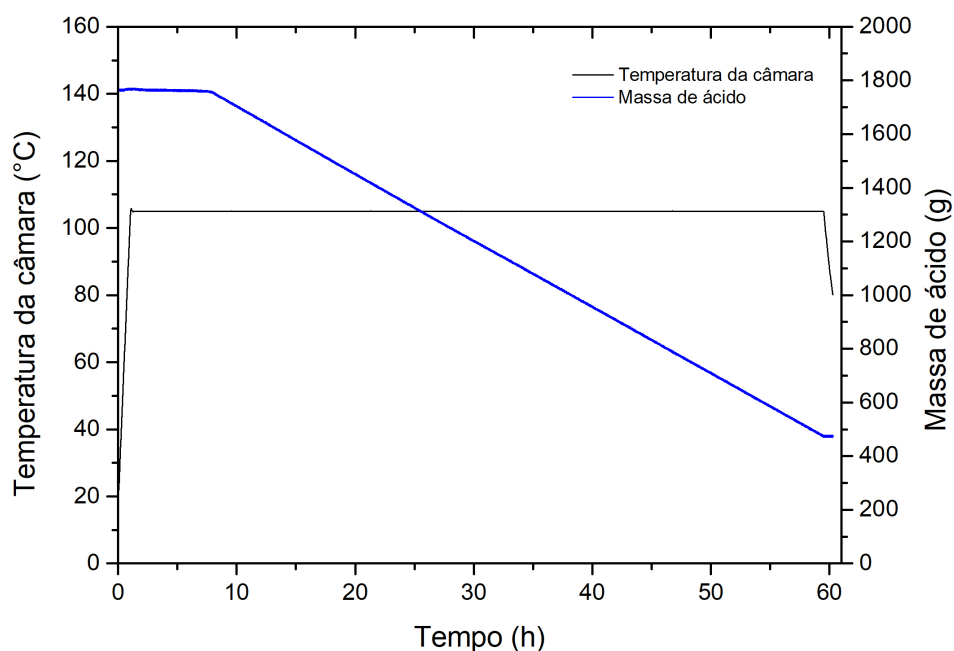
Por fim, foram registradas as massas individuais das 24 amostras verdes impressas, antes das etapas de *debinding*. As peças foram pesadas na balança de precisão, logo após a impressão, com o objetivo de acompanhar eventuais variações de massa entre os diferentes grupos. Cabe destacar que, em função dos valores adotados para os parâmetros de impressão, o tempo de fabricação das amostras variou, indo de aproximadamente 9 horas até cerca de 23 horas. Os dados obtidos estão organizados na Tabela 12, identificados por número de amostra.

Tabela 12 – Massa das peças antes do *debinding*

Amostra	Grupo	Massa (g)
P1_A12_P100_2V	G_A12_P100_2V	81,58
P2_A12_P100_2V		81,50
P3_A12_P100_2V		81,53
P4_A24_P100_2V	G_A24_P100_2V	82,24
P5_A24_P100_2V		81,72
P6_A24_P100_2V		82,18
P7_A24_P50_3V	G_A24_P50_3V	52,93
P8_A24_P50_3V		52,93
P9_A24_P50_3V		52,94
P10_A24_P100_3V	G_A24_P100_3V	82,16
P11_A24_P100_3V		82,22
P12_A24_P100_3V		82,19
P13_A24_P50_2V	G_A24_P50_2V	50,85
P14_A24_P50_2V		50,88
P15_A24_P50_2V		50,89
P16_A12_P50_3V	G_A12_P50_3V	53,20
P17_A12_P50_3V		53,22
P18_A12_P50_3V		53,17
P19_A12_P100_3V	G_A12_P100_3V	82,66
P20_A12_P100_3V		82,79
P21_A12_P100_3V		82,63
P22_A12_P50_2V	G_A12_P50_2V	51,22
P23_A12_P50_2V		51,26
P24_A12_P50_2V		51,31

4.1.2 Avaliação do *Debinding*

A Figura 39 apresenta o comportamento da temperatura da câmara e da massa de ácido ao longo da etapa de *debinding* das peças. Observa-se que a temperatura atinge rapidamente cerca de 105 °C, sendo mantida constante durante praticamente todo o processo. Essa estabilidade térmica é para garantir a remoção do material ligante. Ao mesmo tempo, a curva da massa de ácido mostra uma redução gradual e contínua durante aproximadamente 60 horas, o que remete a ação do ácido oxálico na extração do ligante das peças.

Figura 39 – Gráfico da etapa de *Debinding* das peças impressas

Fonte: do Autor (2025)

Para estipular o tempo necessário da etapa de *debinding*, utilizou-se uma equação fornecida pelo fabricante (Equação 1), baseada na espessura máxima da peça. Considerando uma espessura de 36mm (o diâmetro maior da base do cilindro), o cálculo resultou em um tempo aproximado de 42 horas. No entanto, optou-se por estender o ciclo para 60 horas, com o objetivo de processar todas as peças em uma única rodada, garantindo que a remoção do ligante ocorresse por completo, mesmo nas peças com geometrias mais densas ou regiões de difícil acesso. Esse processo foi adotado para evitar a necessidade retrabalho.

Por fim, após a realização do *debinding*, cada amostra foi novamente pesada a fim de calcular a perda de massa causada pela remoção do ligante. A diferença entre as massas antes e depois do processo foi utilizada para calcular a taxa de *debinding* (*debinding rate*), expresso em porcentagem. Esses valores estão organizados na Tabela 13, que apresenta os pesos das peças antes e depois do *debinding*, bem como a respectiva taxa de remoção de ligante de cada amostra.

Tabela 13 – Massa das peças antes e depois do *debinding* e taxa de remoção de ligante

Amostra	Grupo	Peso pré debinding (g)	Peso pós debinding (g)	Debinding Rate (%)
P1_A12_P100_2V	G_A12_P100_2V	81,58	72,72	10,86
P2_A12_P100_2V		81,50	72,63	10,88
P3_A12_P100_2V		81,53	72,67	10,87
P4_A24_P100_2V	G_A24_P100_2V	82,24	73,30	10,87
P5_A24_P100_2V		81,72	72,86	10,84
P6_A24_P100_2V		82,18	73,25	10,87
P7_A24_P50_3V	G_A24_P50_3V	52,93	47,18	10,86
P8_A24_P50_3V		52,93	47,18	10,86
P9_A24_P50_3V		52,94	47,20	10,84
P10_A24_P100_3V	G_A24_P100_3V	82,16	73,22	10,88
P11_A24_P100_3V		82,22	73,31	10,84
P12_A24_P100_3V		82,19	73,26	10,87
P13_A24_P50_2V	G_A24_P50_2V	50,85	45,33	10,86
P14_A24_P50_2V		50,88	45,36	10,85
P15_A24_P50_2V		50,89	45,35	10,89
P16_A12_P50_3V	G_A12_P50_3V	53,20	47,45	10,81
P17_A12_P50_3V		53,22	47,42	10,90
P18_A12_P50_3V		53,17	47,46	10,74
P19_A12_P100_3V	G_A12_P100_3V	82,66	74,15	10,30
P20_A12_P100_3V		82,79	74,29	10,27
P21_A12_P100_3V		82,63	74,14	10,27
P22_A12_P50_2V	G_A12_P50_2V	51,22	45,69	10,80
P23_A12_P50_2V		51,26	45,72	10,81
P24_A12_P50_2V		51,31	45,77	10,80

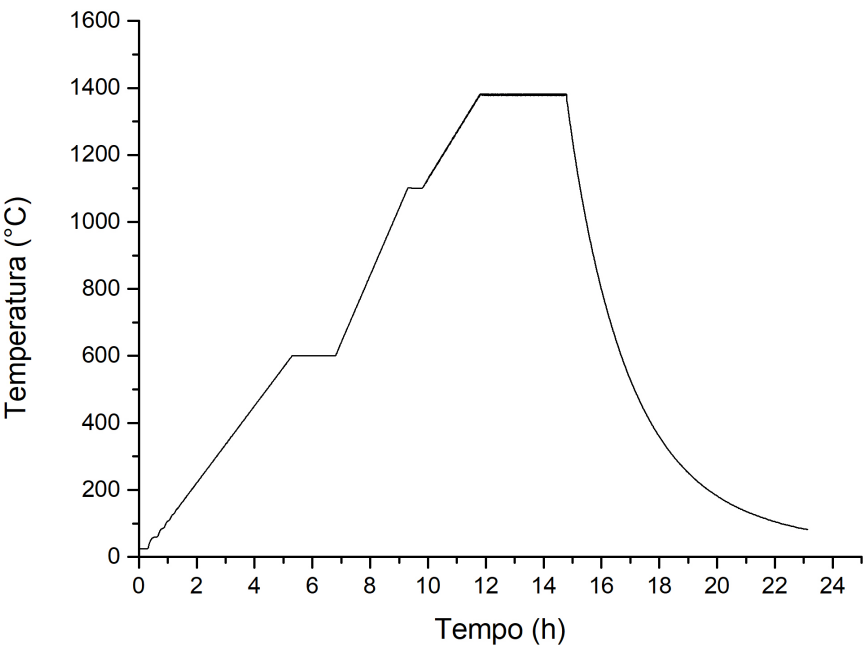
4.1.3 Avaliação da Sinterização

Como pode ser observado na Figura 40, o ciclo de sinterização das peças marrons inicia com uma elevação gradual da temperatura até aproximadamente 600 °C, onde é mantida por cerca de duas horas. Esse patamar é importante para a remoção de qualquer resíduo de material ligante que tenha remanescido da etapa anterior.

Com o material livre de polímeros, inicia-se a etapa de sinterização. A temperatura é elevada até 1380 °C e mantida por cerca de quatro horas. Durante esse período, as partículas metálicas passam por difusão atômica, promovendo a união entre elas e reduzindo significativamente a porosidade interna do componente.

Por fim, a curva apresenta uma fase de resfriamento natural, para evitar o surgimento de trincas ou tensões internas na peça.

Figura 40 – Gráfico da etapa de Sinterização das peças marroms



Fonte: do Autor (2025)

Na Tabela 14 foram registrados os valores de média e desvio padrão em milímetros (DP) e a porcentagem de desvio (DP%), permitindo avaliar o processo de sinterização das amostras, organizadas por grupo. As medições foram realizadas utilizando a máquina de medição por coordenadas (CMM), responsável pela coleta das dimensões principais das peças, com o apoio de um relógio comparador para a verificação de alturas de ressaltos, cilíndrico e quadrado.

Tabela 14 – Tabela da Média, Desvio Padrão e Porcentagem de Desvio de cada Grupo das amostras Sinterizadas

Grupo	Parâmetro	D1	R1	R2	L1	L2	R3C	D2	P1	L4	L3	P2	D3	R3Q	L6	L5
G_A12_P100_2V	Média (mm)	30,130	9,560	7,720	20,130	20,100	3,880	6,270	3,870	5,800	5,770	3,850	5,720	3,890	6,110	6,160
	DP (mm)	0,046	0,004	0,004	0,010	0,009	0,006	0,048	0,043	0,010	0,037	0,031	0,011	0,006	0,054	0,017
	PD (%)	0,420	4,360	3,510	0,670	0,500	3,000	4,430	3,250	3,400	3,890	3,640	4,710	2,750	1,750	2,730
G_A24_P100_2V	Média (mm)	30,350	9,580	7,840	20,370	20,370	3,930	6,450	3,570	5,800	5,760	3,830	5,700	3,880	6,280	6,300
	DP (mm)	0,111	0,242	0,146	0,015	0,041	0,030	0,020	0,128	0,014	0,018	0,171	0,018	0,015	0,025	0,042
	PD (%)	1,150	4,220	2,060	1,850	1,870	1,750	7,430	10,830	3,330	3,950	4,200	5,030	3,000	4,630	5,000
G_A24_P50_3V	Média (mm)	30,380	9,880	7,920	20,360	20,360	3,860	6,280	3,590	5,830	5,860	3,570	5,760	3,920	6,130	6,220
	DP (mm)	0,010	0,057	0,055	0,035	0,043	0,025	0,067	0,033	0,019	0,017	0,033	0,030	0,044	0,065	0,028
	PD (%)	1,280	1,180	1,060	1,810	1,800	3,500	4,600	10,250	2,830	2,400	10,780	4,050	2,000	2,200	3,730
G_A24_P100_3V	Média (mm)	30,450	10,120	7,940	20,390	20,410	3,920	6,440	3,560	5,790	5,810	3,510	5,700	3,920	6,340	6,330
	DP (mm)	0,024	0,069	0,037	0,027	0,024	0,015	0,047	0,012	0,021	0,023	0,034	0,051	0,021	0,013	0,030
	PD (%)	1,490	1,170	0,760	1,960	2,060	2,000	7,330	11,000	3,500	3,180	12,350	4,950	2,000	5,720	5,470
G_A24_P50_2V	Média (mm)	30,260	10,090	7,950	20,210	20,210	3,830	6,280	3,520	5,810	5,850	3,510	5,740	3,990	6,090	6,210
	DP (mm)	0,029	0,075	0,043	0,061	0,027	0,047	0,028	0,054	0,016	0,013	0,016	0,029	0,021	0,020	0,028
	PD (%)	0,860	0,910	0,610	1,040	1,050	4,250	4,580	12,000	3,100	2,530	12,200	4,420	0,250	1,570	3,500
G_A12_P50_3V	Média (mm)	30,180	9,700	7,840	20,100	20,110	3,870	6,170	3,750	5,910	5,930	3,700	5,800	3,910	6,010	6,060
	DP (mm)	0,039	0,019	0,006	0,016	0,038	0,083	0,028	0,008	0,006	0,025	0,045	0,007	0,027	0,008	0,028
	PD (%)	0,610	3,030	2,050	0,500	0,560	3,250	2,820	6,350	1,480	1,100	7,430	3,280	2,250	0,130	0,950
G_A12_P100_3V	Média (mm)	30,060	9,470	7,720	20,040	20,030	3,940	6,220	4,000	5,870	5,890	3,980	5,820	3,900	6,100	6,140
	DP (mm)	0,032	0,032	0,015	0,021	0,021	0,006	0,052	0,041	0,012	0,035	0,024	0,012	0,012	0,018	0,035
	PD (%)	0,190	5,300	3,500	0,200	0,120	1,500	3,730	0,000	2,250	1,920	0,520	3,050	2,500	1,600	2,300
G_A12_P50_2V	Média (mm)	30,240	9,850	7,880	20,070	20,110	3,900	6,200	3,940	5,970	5,980	3,970	5,840	3,980	6,050	6,100
	DP (mm)	0,030	0,062	0,009	0,045	0,023	0,017	0,015	0,029	0,036	0,027	0,043	0,002	0,044	0,016	0,017
	PD (%)	0,780	1,460	1,490	0,360	0,530	2,500	3,270	1,400	0,530	0,330	0,750	2,630	0,500	0,880	1,650

Ao comparar os resultados obtidos no trabalho com os valores apresentados por ALYAMMAHI *et al.* (2021) para peças sinterizadas em aço 17-4 PH SS, é possível notar algumas diferenças na precisão dimensional. Os valores de desvio padrão e porcentagem de desvio, na maioria dos casos, foram mais baixos ou até mesmo equivalentes ao valor calculado pelos autores (levando em conta o plano XY). Um exemplo disso é o parâmetro D1 deste estudo, que corresponde ao mesmo tipo de geometria avaliado no parâmetro AD do referido trabalho (um diâmetro externo). Nos grupos analisados aqui, o D1 apresentou DP% entre 0,19% e 1,49%, enquanto o AD no estudo comparativo apresentou DP% de 0,58% indicando que, em alguns grupos, as amostras de 316L tiveram comportamento dimensional semelhante ou até mais uniforme. (conforme Tabela apresentada no Anexo A).

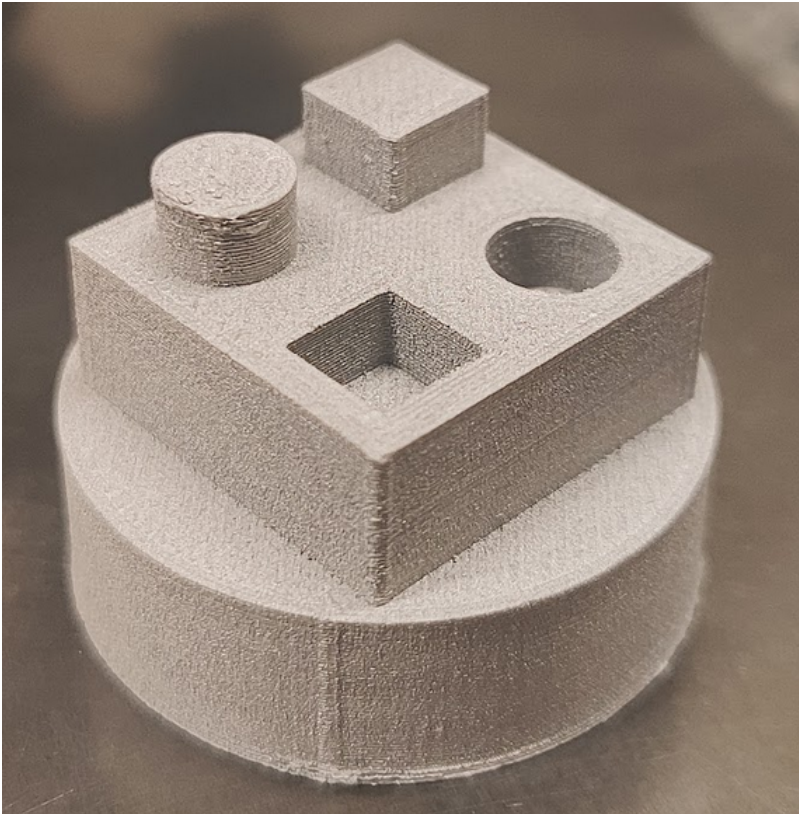
Analisando o parâmetro D2, que se trata do diâmetro do cilindro, no topo do ressalto do prisma de base quadrada, que também se encontra no plano XY, os valores obtidos de porcentagem de desvio com o filamento de aço inox 316L ficaram entre 2,82% (menor deles) e 7,43% (maior deles). Já os valores encontrados pelos autores obtiveram um valor de desvio de 0,36%, ficando bem abaixo dos calculados no estudo.

Por outro lado, ao comparar os resultados obtidos no eixo Z as diferenças ficam mais evidentes. O R2, por exemplo, que se trata da altura do prisma de base quadrada, chegou a uma média de 1,18% de desvio em relação ao valor nominal, com um desvio padrão de 1,13%, um pouco mais alto que os 0,97% encontrados do trabalho citado. Por outro lado, o valor de P1, que é um furo na parte superior, com um DP% variando de 1,40% a 12,00% aqui, contra apenas 0,66% no estudo realizado pelos autores.

Esses valores mais altos podem ter relação com o fato de que a essas partes não foram impressas direto sobre a mesa, mas sim sobre outras camadas. Isso pode fazer com que, pequenos desvios, que ocorream na confecção do ressalto que está sobre a mesa, somam-se com os desvios que ocorreram nesse novo ressalto, fazendo com que ocorra uma maior dispersão de erro e uma variância maior.

A Figura 41 apresenta uma das peças fabricadas após a etapa de sinterização, evidenciando o resultado final obtido com o processo MFFF. É possível observar que a peça ainda não possui um acabamento final, não passou por lixamento ou polimento.

Figura 41 – Peça metálica final sem acabamento superficial



Fonte: do Autor (2025)

A Tabela 15 apresenta os valores médios obtidos para cada parâmetro dimensional dos grupos analisados, comparados com os valores de referência do CAD.

Tabela 15 – Comparação entre as médias das dimensões das peças sinterizadas e os valores de referência do CAD

Grupo	D1 (mm)	R1 (mm)	R2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	R3C (mm)	D2 (mm)	P1 (mm)	L4 (mm)	L3 (mm)	P2 (mm)	D3 (mm)	R3Q (mm)	L6 (mm)	L5 (mm)
CAD	30,00	10,00	8,00	20,00	20,00	4,00	6,00	4,00	6,00	6,00	4,00	6,00	4,00	6,00	6,00
G_A12_P100_2V	30,13	9,56	7,72	20,13	20,10	3,88	6,27	3,87	5,80	5,77	3,85	5,72	3,89	6,11	6,16
G_A24_P100_2V	30,35	9,58	7,84	20,37	20,37	3,93	6,45	3,57	5,80	5,76	3,83	5,70	3,88	6,28	6,30
G_A24_P50_3V	30,38	9,88	7,92	20,36	20,36	3,86	6,28	3,59	5,83	5,86	3,57	5,76	3,92	6,13	6,22
G_A24_P100_3V	30,45	10,12	7,94	20,39	20,41	3,92	6,44	3,56	5,79	5,81	3,51	5,70	3,92	6,34	6,33
G_A24_P50_2V	30,26	10,09	7,95	20,21	20,21	3,83	6,28	3,52	5,81	5,85	3,51	5,74	3,99	6,09	6,21
G_A12_P50_3V	30,18	9,70	7,84	20,10	20,11	3,87	6,17	3,75	5,91	5,93	3,70	5,80	3,91	6,01	6,06
G_A12_P100_3V	30,06	9,47	7,72	20,04	20,03	3,94	6,22	4,00	5,87	5,89	3,98	5,82	3,90	6,10	6,14
G_A12_P50_2V	30,24	9,85	7,88	20,07	20,11	3,90	6,20	3,94	5,97	5,98	3,97	5,84	3,98	6,05	6,10

De uma forma geral, observa-se que as dimensões no plano XY, como D1, L1 e L2, mantiveram valores próximos aos do modelo CAD, indicando boa estabilidade dimensional após a sinterização, para os grupos que possuem preenchimento interno de 100% altura de camada de 0,12mm e 2 ou 3 perímetros. No entanto, parâmetros

como P1, P2 e R3Q apresentaram maiores diferenças em relação ao valor nominal, o que pode estar relacionado à retração acumulada durante o processo, especialmente em regiões de ressaltos e furos. Esses resultados reforçam a necessidade de ajustes de compensação para essas geometrias a fim de melhorar a precisão dimensional final.

A Tabela 16 evidencia a perda de massa das amostras ao longo das etapas do processo de MFFF. Pode-se perceber que as amostras P1 a P3, com 100% de preenchimento, apresentaram perda absoluta de massa na casa dos 11,78%, enquanto as amostras P22 a P24, com 50% de preenchimento, tiveram perda percentual semelhante, em torno de 11,73%. Esses resultados indicam que a variação no preenchimento interno não teve impacto na perda percentual de massa, portanto, isso indica que essa redução está associada à remoção do ligante durante as etapas de *debinding* e sinterização.

No entanto, ao observar os valores de massa, nota-se que as peças com preenchimento de 100% apresentaram perdas na casa de 9,6g, enquanto as peças com 50% de preenchimento obtiveram perdas próximas de 6,0g. Essa diferença está relacionada ao volume de material presente nas amostras: quanto maior a quantidade de material, ou seja, quanto maior a porcentagem de preenchimento interno, maior será a massa removida.

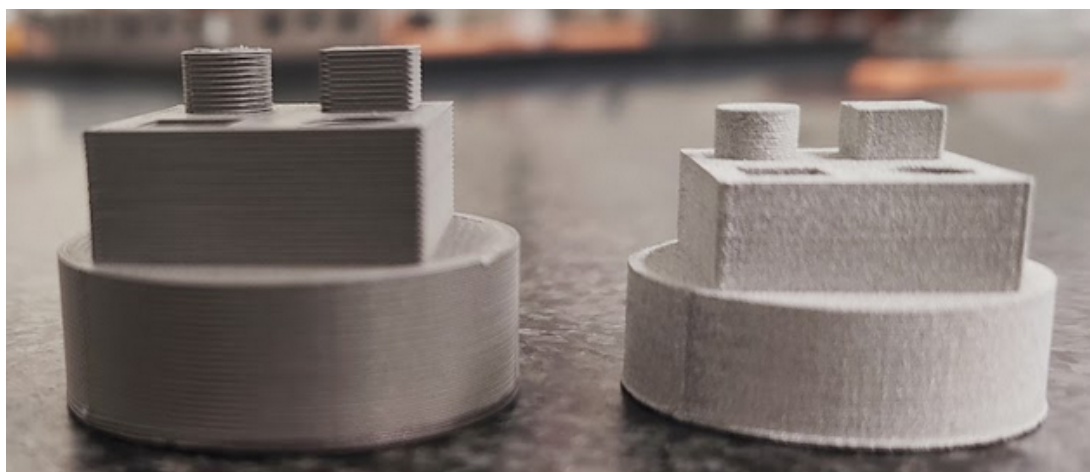
Tabela 16 – Perda de massa ao longo das etapas do MFF

Amostra	Grupo	Massa pré debinding (g)	Massa pós debinding (g)	Massa pós sinterização (g)	Perda de massa (g)	Perda Absoluta (%)
P1_A12_P100_2V	G_A12_P100_2V	81,58	72,72	71,97	9,61	11,78
P2_A12_P100_2V		81,50	72,63	71,87	9,63	11,82
P3_A12_P100_2V		81,53	72,67	71,90	9,63	11,81
P4_A24_P100_2V	G_A24_P100_2V	82,24	73,30	72,52	9,72	11,82
P5_A24_P100_2V		81,72	72,86	72,10	9,62	11,77
P6_A24_P100_2V		82,18	73,25	72,49	9,69	11,79
P7_A24_P50_3V	G_A24_P50_3V	52,93	47,18	46,68	6,25	11,81
P8_A24_P50_3V		52,93	47,18	46,68	6,25	11,81
P9_A24_P50_3V		52,94	47,20	46,69	6,25	11,81
P10_A24_P100_3V	G_A24_P100_3V	82,16	73,22	72,47	9,69	11,79
P11_A24_P100_3V		82,22	73,31	72,55	9,67	11,76
P12_A24_P100_3V		82,19	73,26	72,49	9,70	11,80
P13_A24_P50_2V	G_A24_P50_2V	50,85	45,33	44,84	6,01	11,82
P14_A24_P50_2V		50,88	45,36	44,84	6,04	11,87
P15_A24_P50_2V		50,89	45,35	44,84	6,05	11,89
P16_A12_P50_3V	G_A12_P50_3V	53,20	47,45	46,93	6,27	11,79
P17_A12_P50_3V		53,22	47,42	46,91	6,31	11,86
P18_A12_P50_3V		53,17	47,46	46,95	6,22	11,70
P19_A12_P100_3V	G_A12_P100_3V	82,66	74,15	73,37	9,29	11,24
P20_A12_P100_3V		82,79	74,29	73,51	9,28	11,21
P21_A12_P100_3V		82,63	74,14	73,34	9,29	11,24
P22_A12_P50_2V	G_A12_P50_2V	51,22	45,69	45,18	6,04	11,79
P23_A12_P50_2V		51,26	45,72	45,22	6,04	11,78
P24_A12_P50_2V		51,31	45,77	45,29	6,02	11,73

Na Figura 42 é possível observar, de uma forma mais qualitativa, a compa-

ração entre uma peça no estado verde (à esquerda), recém impressa, com camadas visíveis e maior volume, e a mesma peça após o processo de sinterização (à direita), apresentando retração dimensional e uma superfície visualmente mais uniforme e sem acabamento.

Figura 42 – Comparação visual entre peça verde e peça branca



Fonte: do Autor (2025)

4.2 Análise de Variância

4.2.1 ANOVA Peças Impressas

As Tabelas 17 e 18 mostram os resultados obtidos por meio da análise de variância *One-Way* (ANOVA) aplicada às peças impressas. Os valores estão organizados conforme as análises de condição, definidos anteriormente no Capítulo 3.10, de acordo com as diferentes combinações de parâmetros de impressão utilizadas. Cada uma das colunas representa uma dimensão medida nas amostras, como diâmetros, larguras e raios.

A Tabela 17 traz os valores de F calculados, os dados foram classificados da seguinte forma: valores abaixo do valor crítico de F foram destacados em verde, indicando que não houve influência estatisticamente dos parâmetros naquela dimensão, os valores maiores que F_{crit} e menores que 10, foram destacados em amarelo, indicando influência moderada, e por fim, os valores maiores, que 10, foram destacados em vermelho, apontando forte influência dos parâmetros de sobre aquela dimensão.

Tabela 17 – Valores de F da ANOVA para dimensões das peças verdes

AC	D1	D2	D3	L1	L2	L3	L4	L5	L6	R1	R2	P1	P2	P//
AC_A12	16,463	32,404	18,748	13,116	74,954	66,119	21,662	23,726	12,628	4,094	40,322	3,912	5,797	1,952
AC_A24	17,998	24,739	11,719	27,594	135,303	37,066	25,331	178,154	6,509	1,017	15,112	1,683	0,887	12,943
AC_P100	6,350	7,062	9,319	14,970	5,015	46,896	11,000	9,330	11,287	0,583	38,409	1,757	3,418	1,454
AC_P50	6,051	2,636	11,719	10,110	3,276	6,706	13,747	0,453	2,309	5,343	37,087	4,231	12,347	7,131
AC_2V	12,816	26,089	89,880	13,677	106,266	68,414	34,114	74,042	7,773	2,056	34,905	3,258	8,462	4,095
AC_3V	22,592	29,295	1,340	13,981	84,838	4,712	10,564	37,088	12,167	0,077	51,673	1,077	2,507	2,866
Fcrit	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066

Para a Tabela 18 que mostra os valores de p , a lógica foi inversa, ou seja, valores abaixo do valor de α , que vale 0,05, foram destacados em vermelho, mostrando que possui significância estatística, valores entre 0,05 e 0,15 foram apontados em amarelo, indicando significância moderada; e valores acima de 0,15 foram indicados em verde, indicando que não houve influência estatisticamente dos parâmetros naquela dimensão.

Tabela 18 – Valores de p da ANOVA para dimensões das peças verdes

AC	D1	D2	D3	L1	L2	L3	L4	L5	L6	R1	R2	P1	P2	P//
AC_A12	8,76E-04	7,97E-05	5,61E-04	1,87E-03	3,38E-06	5,47E-06	3,39E-04	2,46E-04	2,11E-03	4,92E-02	3,55E-05	5,46E-02	2,10E-02	2,00E-01
AC_A24	6,46E-04	2,12E-04	2,68E-03	1,43E-04	3,41E-07	4,86E-05	1,95E-04	1,16E-07	1,54E-02	4,34E-01	1,17E-03	2,47E-01	4,60E-01	6,66E-03
AC_P100	1,64E-02	1,23E-02	5,47E-03	1,21E-03	3,03E-02	2,02E-05	3,28E-03	5,45E-03	3,02E-03	6,42E-01	4,26E-05	2,33E-01	7,31E-02	2,98E-01
AC_P50	1,87E-02	1,21E-01	2,68E-03	4,26E-03	7,98E-02	1,42E-02	1,60E-03	7,23E-01	1,53E-01	2,59E-02	4,85E-05	4,56E-02	2,27E-03	1,19E-02
AC_2V	2,01E-03	1,75E-04	1,68E-06	1,63E-03	8,75E-07	4,80E-06	6,60E-05	3,54E-06	9,34E-03	1,85E-01	6,07E-05	8,07E-02	7,29E-03	4,92E-02
AC_3V	2,93E-04	1,15E-04	3,28E-01	1,51E-03	2,10E-06	3,54E-02	3,72E-03	4,85E-05	2,38E-03	9,71E-01	1,40E-05	4,12E-01	1,33E-01	1,04E-01
Fcrit	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Com base nas ANOVAs realizadas, pode-se observar que as dimensões dependentes do eixo Z, cuja referência é a mesa de impressão, apresentam menor interferência dos parâmetros de impressão estabelecidos. Isso provavelmente se deve a uma boa calibração da mesa, bem como a uma deposição uniforme de material pela impressora.

Outro ponto observado foi que muitas das dimensões medidas com o mesmo percentual de preenchimento interno apresentaram baixa variação em comparação a outros parâmetros, como o número de contornos ou a altura das camadas. Isso pode indicar que um dos principais parâmetros que regulam a uniformidade dimensional das peças impressas é o preenchimento interno.

Também é notável que ocorreram disparidades mais significativas em dimensões de mesma magnitude medidas ao longo de diferentes eixos. O quadrado com as dimensões L1 e L2 é um exemplo disso. Essa diferença pode estar relacionada a possíveis variações de calibração da impressora em cada eixo de movimento.

Além disso, a saliência R2, embora relacionada ao eixo Z, apresentou variação dimensional significativa. Acredita-se que isso se deve principalmente à propagação de erros oriundos da construção da saliência R1, combinada com erros na própria construção da saliência R2.

4.2.2 ANOVA Peças Sinterizadas

As Tabelas 19 e 20 mostram os resultados obtidos por meio da análise de variância *One-Way* (ANOVA) aplicada às peças sinterizadas. Os valores estão organizados conforme as análises de condições, definidos anteriormente no Capítulo 3.10, de acordo com as diferentes combinações de parâmetros de impressão utilizadas. Cada uma das colunas representa uma dimensão medida nas amostras.

A Tabela 19, apresenta os valores de F, os dados foram classificados da seguinte forma: valores abaixo do valor crítico de F ($F_{crit}=4,066$) foram destacados em verde, indicando que não houve influência estatisticamente dos parâmetros naquela dimensão; os valores superiores ao Fcrítico, em torno de 2 a 3 vezes o valor crítico, foram destacados em amarelo, indicando uma certa influência; por fim, os valores maiores, que 2 a 3 vezes o valor crítico, foram destacados em vermelho, apontando forte influência dos parâmetros de sobre aquela dimensão.

Tabela 19 – Valores de F da ANOVA para dimensões das peças brancas

AC	D1	R1	R2	L1	L2	R3C	D2	P1	L4	L3	P2	D3	R3Q	L5	L6
AC_A12	69,286	13,560	225,139	5,819	8,960	0,944	5,119	34,196	35,829	20,320	33,756	104,133	4,032	8,291	9,983
AC_A24	6,867	5,582	0,407	16,404	18,424	8,564	12,691	1,180	1,180	21,444	5,266	2,618	8,430	16,033	29,438
AC_P100	15,293	27,072	6,683	231,166	152,168	5,630	19,132	25,278	17,051	12,893	15,511	11,811	6,440	30,549	43,137
AC_P50	24,491	26,697	8,000	30,790	34,599	1,702	7,263	88,340	31,051	24,046	91,202	14,238	4,385	21,450	9,803
AC_2V	9,666	6,852	5,998	31,203	52,495	8,138	36,023	22,405	40,678	45,403	13,506	38,387	12,188	31,691	28,826
AC_3V	97,649	129,500	21,875	146,037	96,139	1,498	16,285	162,080	29,735	13,574	111,828	9,392	0,604	33,205	51,321
Fcrit	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066

Já na Tabela 20, que mostra os valores de p , a lógica foi inversa, ou seja, valores abaixo de 0,05 foram destacados em vermelho, mostrando que possui significância estatística; valores entre 0,05 e 0,15 foram apontados em amarelo, indicando significância moderada; e valores acima de 0,15 foram indicados em verde, evidenciando ausência de significância.

Tabela 20 – Valores de p da ANOVA para dimensões das peças brancas

AC	D1	R1	R2	L1	L2	R3C	D2	P1	L4	L3	P2	D3	R3Q	L5	L6
AC_A12	4,57E-06	1,67E-03	4,60E-08	2,08E-02	6,15E-03	4,64E-01	2,88E-02	6,54E-05	5,51E-05	4,25E-04	6,86E-05	9,47E-07	5,10E-02	7,74E-03	4,43E-03
AC_A24	1,33E-02	2,31E-02	7,52E-01	8,87E-04	5,96E-04	7,04E-03	2,08E-03	3,77E-01	3,77E-01	3,52E-04	2,69E-02	1,23E-01	7,38E-03	9,58E-04	1,13E-04
AC_P100	1,12E-03	1,53E-04	1,43E-02	4,14E-08	2,15E-07	2,26E-02	5,23E-04	1,96E-04	7,77E-04	1,97E-03	1,07E-03	2,61E-03	1,58E-02	9,89E-05	2,76E-05
AC_P50	2,20E-04	1,61E-04	8,59E-03	9,61E-05	6,27E-05	2,43E-01	1,13E-02	1,79E-06	9,32E-05	2,34E-04	1,58E-06	1,42E-03	4,20E-02	3,51E-04	4,69E-03
AC_2V	4,89E-03	1,33E-02	1,92E-02	9,15E-05	1,32E-05	8,18E-03	5,40E-05	3,01E-04	3,44E-05	2,28E-05	1,69E-03	4,27E-05	2,36E-03	8,65E-05	1,22E-04
AC_3V	1,22E-06	4,05E-07	3,28E-04	2,53E-07	1,29E-06	2,87E-01	9,09E-04	1,68E-07	1,09E-04	1,67E-03	7,17E-07	5,34E-03	6,31E-01	7,29E-05	1,44E-05
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

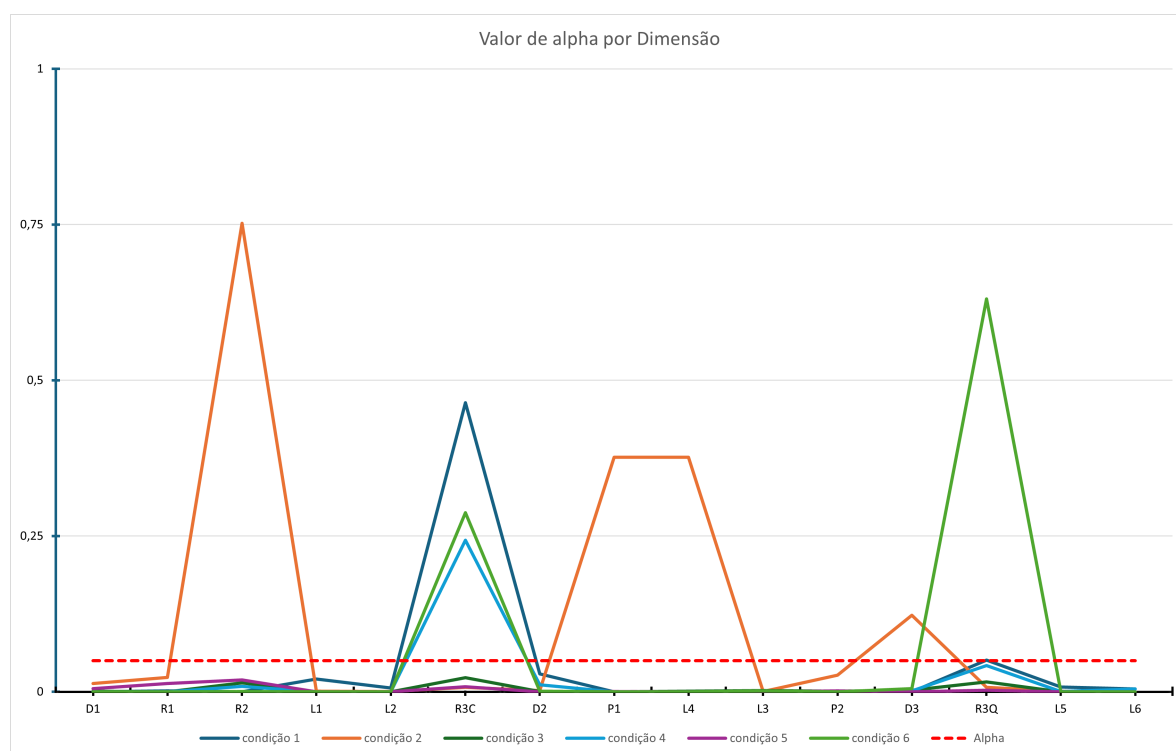
As dimensões associadas ao plano Z, como R1, R2, P1 e P2, apresentaram maior variações nos parâmetros de impressão. Os valores de F para essas dimensões ultrapassaram o Fcrítico em diversos grupos, evidenciando variância acentuada após a sinterização. Tais resultados indicam que com geometrias projetadas verticalmente e furos são mais suscetíveis à retração e deformações térmicas, principalmente quando combinadas com altura de camada fina e/ou maior número de perímetros.

Já no plano XY, dimensões como L1, L2, L3, L4, L5, L6, D1, D2 e D3 também foram afetadas, com destaque para L1 e L2, que registraram os maiores valores de F

entre todos os parâmetros. Essas regiões, embora apoiadas na base da impressão, sofrem influência direta de fatores como porcentagem de preenchimento e número de perímetros, que afetam a forma como o calor se dissipa durante a sinterização.

A Figura 43 apresenta os resultados da análise de variância *one-way*, em forma de gráfico, aplicado nas 6 condições de análises das dimensões da peça sinterizada. Analisando o gráfico, cada linha representa os valores de p calculados para todas as dimensões avaliadas, e a linha tracejada vermelha indica o valor de alpha ($\alpha = 0,05$). Portanto, os valores que estão abaixo da linha tracejada indicam diferenças estatisticamente significativas entre os grupos para a respectiva dimensão, ou seja, rejeição da hipótese nula.

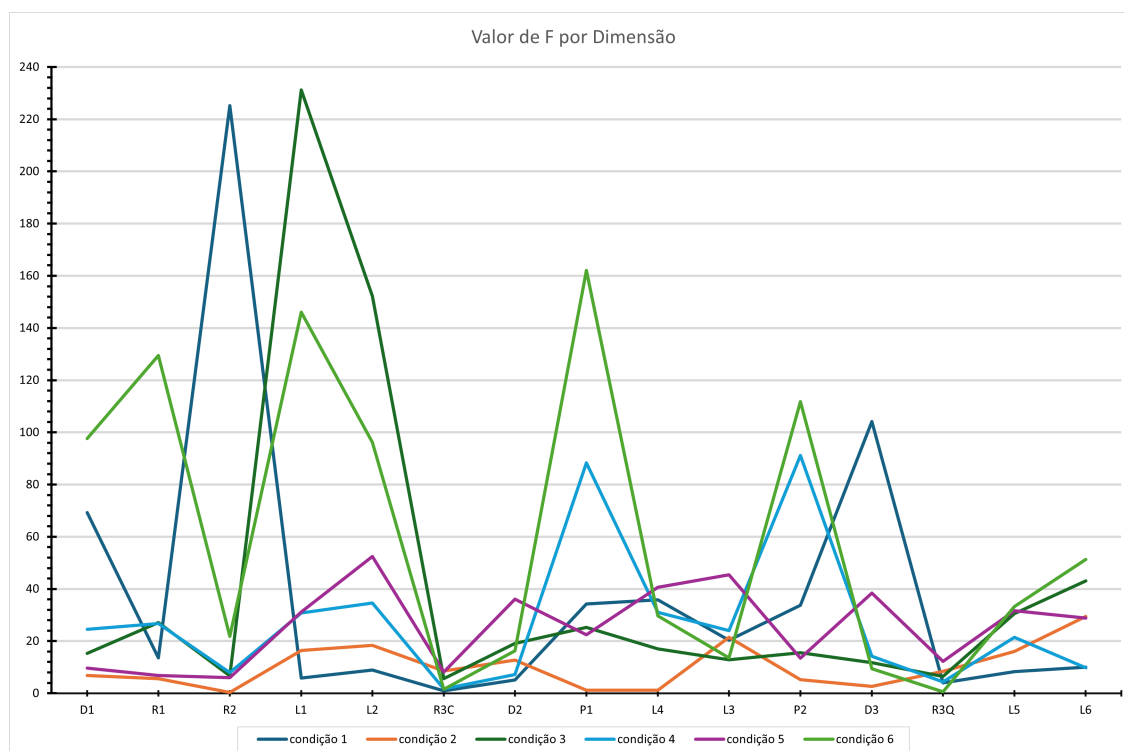
Figura 43 – Valores de p obtidos nas análises ANOVA *one-way* para as dimensões das peças sinterizadas.



Fonte: do Autor (2025)

Já na Figura 44 apresenta os valores do teste F obtidos nas análises de variância *one-way*, em forma de gráfico, aplicado às dimensões das peças sinterizadas nas 6 condições de análise. O valor de F indica a razão entre a variância entre grupos e a variância dentro dos grupos. Quanto maior for o valor de F, maior é a evidência que esse fator está realmente influenciando nos resultados finais das peças sinterizadas.

Figura 44 – Valores de F obtidos nas análises ANOVA one-way para as dimensões das peças sinterizadas.



Fonte: do Autor (2025)

Analisando o gráfico, valores como R2, L1, P1 e D3, apresentaram valores de F bastante elevados em determinadas condições, indicando que possui uma forte influência do grupo sobre a média dessas medidas. Por outro lado, dimensões como R3C, R3Q e L6 mostraram valores de F baixos de na maioria dos casos, indicando que possui ausência de variação significativa entre os grupos nessas regiões da peça.

4.2.3 Análise de Variância dos Fatores Variados

4.2.3.1 Análise da Altura de Camada

A Tabela 21 foi elaborada a partir dos resultados da análise de variância aplicada às peças já sinterizadas, com o objetivo de avaliar a influência da altura de camada sobre diferentes dimensões geométricas da peça. Para isso, foram considerados dois grupos experimentais: AC_A12, que inclui as amostras com altura de camada de 0,12 mm, e AC_A24, com altura de 0,24 mm. A partir desses grupos, foram organizados os valores de F calculado, F crítico, a razão F/Fcrítico e o respectivo valor de p para cada dimensão analisada.

As dimensões selecionadas para essa análise foram escolhidas com base na sua distribuição na peça. Especificamente, os parâmetros R1, R2, R3C e P1 representam dimensões posicionadas ao longo do plano Z (altura), enquanto os demais

parâmetros, D1, L1, L2, D2, L3 e L4, estão distribuídos no plano XY. Essa separação permite avaliar como a altura de camada afeta o comportamento dimensional de diferentes regiões da peça durante o processo de sinterização.

Tabela 21 – Altura de Camada

AC	Parâmetro	R1	D1	R2	L1	L2	R3C	D2	P1	L4	L3
AC_A12	F	69,286	13,56	225,139	5,819	8,96	0,944	5,119	34,196	35,829	20,32
	F crítico	4,066	4,066	4,066	4,066	0,006	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066
	F/Fcrítico	17,040	3,335	55,369	1,431	1456,102	0,232	1,259	8,410	8,812	4,997
	valor-P	4,57E-06	1,67E-03	4,60E-08	2,08E-02	4,07E+00	4,64E-01	2,88E-02	6,54E-05	5,51E-05	4,25E-04
AC_A24	F	6,867	5,582	0,407	16,404	18,424	8,564	12,691	1,18	1,18	21,444
	F crítico	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066
	F/Fcrítico	1,689	1,373	0,100	4,034	4,531	2,106	3,121	0,290	0,290	5,274
	valor-P	1,33E-02	2,31E-02	7,52E-01	8,87E-04	5,96E-04	7,04E-03	2,08E-03	3,77E-01	3,77E-01	3,52E-04

A análise da Tabela 21 mostra que a altura de camada teve influência direta na variação dimensional das peças sinterizadas, especialmente nas regiões do plano Z (como R1, R2, R3C e P1). Na AC_A12, com menor altura de camada (0,12 mm), os valores de F foram muito superiores ao F crítico em grande parte das dimensões, com valores-P muito abaixo de 0,05. Isso indica que quanto menor a altura de camada, mais suscetível a variação a peça estará, devido ao maior número de camadas acumuladas e maior exposição a tensões térmicas durante o processo de sinterização.

Já na AC_A24, condição com maior altura de camada (0,24 mm), a maioria das dimensões apresentou valores de F próximos ou abaixo do F crítico, indicando menor variação e maior estabilidade dimensional. Isso sugere que o uso de camadas mais espessas pode ser uma estratégia eficaz para reduzir distorções e garantir maior previsibilidade nas dimensões finais, especialmente em regiões críticas. No entanto, esse ganho em estabilidade deve ser balanceado com a perda de resolução que camadas grossas podem causar.

Por outro lado, a utilização de camadas maiores também acarreta uma redução no tempo de impressão, o que pode ser vantajoso dependendo das aplicações em que uma altura de camada menor não seja o principal requisito.

4.2.3.2 Análise do Preenchimento Interno

A Tabela 22 apresenta os resultados da ANOVA aplicados às peças sinterizadas, considerando o preenchimento interno como fator de análise. Os dados comparam grupos de amostras com 100% e 50% de preenchimento, destacando como essa variável influenciou as diferentes dimensões da peça.

Tabela 22 – Preenchimento Interno

AC	Parâmetro	R1	D1	R2	L1	L2	R3C	D2	P1	L4	L3
AC_P100	F	15,293	27,072	6,683	231,166	152,168	5,63	19,132	25,278	17,051	12,893
	F crítico	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066
	F/Fcrítico	3,761	6,658	1,644	56,851	37,423	1,385	4,705	6,217	4,193	3,171
	valor-P	1,12E-03	1,53E-04	1,43E-02	4,14E-08	2,15E-07	2,26E-02	5,23E-04	1,96E-04	7,77E-04	1,97E-03
AC_P50	F	24,491	26,697	8	30,79	34,599	1,702	7,263	88,34	31,051	24,046
	F crítico	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066
	F/Fcrítico	6,023	6,566	1,967	7,572	8,509	0,419	1,786	21,725	7,636	5,914
	valor-P	2,20E-04	1,61E-04	8,59E-03	9,61E-05	6,27E-05	2,43E-01	1,13E-02	1,79E-06	9,32E-05	2,34E-04

A Tabela 22 indica que o preenchimento interno das peças também teve impacto sobre essas dimensões após a sinterização, principalmente nas regiões do plano Z (como R1, R2, R3C e P1). A condição AC_P50, com menor porcentagem de preenchimento (50%), apresentaram maior número de dimensões com valores de F acima do F crítico e valores-P inferiores a 0,05, evidenciando que peças menos densas tendem a sofrer maior variação dimensional, especialmente em áreas elevadas ou com elementos projetados. Isso ocorre porque um preenchimento mais leve reduz a rigidez interna da peça durante a sinterização, tornando-a mais suscetível à retração "irregular".

Por outro lado, na condição AC_P100, as amostras com preenchimento interno de 100%, demonstraram melhor estabilidade dimensional, com menor número de variáveis afetadas de forma significativa. Em geral, os valores de F foram mais baixos e muitos ficaram abaixo do F crítico, indicando que peças mais densas tendem a resistir melhor às tensões térmicas e a sinterização. Assim, observa-se que o aumento do preenchimento interno contribui para uma maior uniformidade das dimensões finais.

Entretanto, essa estabilidade dimensional acarreta um maior tempo de impressão e maior consumo de material, fatores que podem ser alterados de acordo com a função da peça. Para aplicações em que a precisão não é crítica, preenchimentos menores podem reduzir bastante o tempo de fabricação e o custo da peça.

4.2.3.3 Análise do Número de Voltas

Na Tabela 23, são apresentados os resultados da ANOVA considerando o número de perímetros como variável de comparação. Os dados permitem observar o impacto entre amostras com 2 e 3 voltas de perímetro sobre a variação dimensional após a sinterização.

Tabela 23 – Linha de Perímetro

AC	Parâmetro	R1	D1	R2	L1	L2	R3C	D2	P1	L4	L3
AC_2V	F	9,666	6,852	5,998	31,203	52,495	8,138	36,023	22,405	40,678	45,403
	F crítico	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066
	F/Fcrítico	2,377	1,685	1,475	7,674	12,910	2,001	8,859	5,510	10,004	11,166
	valor-P	4,89E-03	1,33E-02	1,92E-02	9,15E-05	1,32E-05	8,18E-03	5,40E-05	3,01E-04	3,44E-05	4,066
AC_3V	F	97,649	129,5	21,875	146,037	96,139	1,498	16,285	162,08	29,735	13,574
	F crítico	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066	4,066
	F/Fcrítico	24,015	31,848	5,380	35,915	23,644	0,368	4,005	39,860	7,313	3,338
	valor-P	1,22E-06	4,05E-07	3,28E-04	2,53E-07	1,29E-06	2,87E-01	9,09E-04	1,68E-07	1,09E-04	1,67E-03

A tabela 23 evidencia as amostras do grupo AC_3V, que utilizaram 3 voltas de perímetro, apresentaram maior variação dimensional, com diversos parâmetros, como L1, L2, D2, L4 e L3, exibindo valores de F superiores ao Fcrítico e valores-P abaixo de 0,05. Isso indica que, diferentemente do esperado, o aumento no número de perímetros não resultou em maior estabilidade, e sim em maior suscetibilidade à deformação nas bordas e variações nos contornos da geometria, principalmente nas dimensões no plano XY.

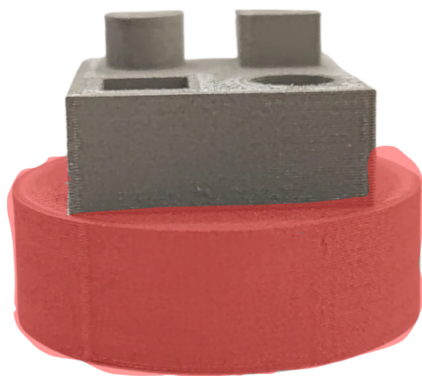
No entanto, as peças do grupo AC_2V, com apenas 2 voltas de perímetro, apresentaram comportamento mais estável do ponto de vista dimensional. Embora algumas variações ainda tenham sido observadas, o número de parâmetros afetados foi menor. A escolha do número de perímetros deve considerar a função final da peça. Para aplicações como gabaritos ou dispositivos de apoio, onde a tolerância dimensional é menor, pode-se optar por menor preenchimento interno e menos perímetros, reduzindo o consumo de filamento e o tempo de impressão. Assim, o uso de dois perímetros mostrou-se mais vantajoso para minimizar perdas dimensionais e aumentar a previsibilidade do processo de fabricação por MFFF.

4.3 Análise dimensional e cálculo da contração

4.3.1 Cilindro

A Figura 45 ilustra a região do cilindro da base, destacada em vermelho, selecionada para a análise dimensional. Essa indicação tem caráter ilustrativo, apenas para facilitar a identificação da região considerada no cálculo da retração.

Figura 45 – Destaque da geometria do cilindro da base analisado



Fonte: do Autor (2025)

De acordo com a Tabela 24 que apresenta os valores de retração linear,

expressos em porcentagem, observados em dois parâmetros das amostras sinterizadas: R1 (altura do ressalto, plano Z) e D1 (diâmetro do cilindro, plano XY). As peças foram agrupadas em oito grupos distintos, com três amostras por grupo.

Tabela 24 – Porcentagem de retração do cilindro

Amostra	Grupo	R1 (%)	D1 (%)
P1	G_A12_P100_2V	18,90	16,44
P2		18,85	16,22
P3		19,19	16,27
P4	G_A24_P100_2V	18,94	15,91
P5		16,85	15,42
P6		15,82	15,76
P7	G_A24_P50_3V	16,22	15,49
P8		16,01	15,42
P9		16,18	15,45
P10	G_A24_P100_3V	14,12	15,42
P11		14,16	15,34
P12		14,60	15,34
P13	G_A24_P50_2V	15,25	15,95
P14		15,12	15,83
P15		14,15	15,78
P16	G_A12_P50_3V	18,03	16,17
P17		17,58	16,06
P18		17,55	15,95
P19	G_A12_P100_3V	20,37	16,65
P20		19,71	16,54
P21		18,85	16,52
P22	G_A12_P50_2V	17,63	15,91
P23		16,94	16,08
P24		16,88	15,94

De modo geral, observam-se variações consideráveis nos valores de retração entre os diferentes grupos e também entre os parâmetros medidos. A retração no eixo Z apresentou uma variação mais ampla, com valores indo de 14,12%, calculado na peça P10, até 20,37%, calculado na peça P19. Já no eixo XY manteve uma taxa de variação menor, entre 15,34%, calculado nas peças P11 e P12, e 16,65%, também calculado na peça P19.

O Grupo G_A12_P100_3V, com altura de camada 0,12mm; 3 perímetros; 100% preenchimento interno, foi o qual apresentou os maiores valores médios de retração em ambos os parâmetros, enquanto o Grupo G_A24_P100_3V, com altura de camada 0,24mm; 3 perímetros; 100% preenchimento interno, apresentou os menores valores de retração no eixo Z.

Por fim, A Tabela 25 apresenta uma comparação entre os valores médios de retração linear obtidos experimentalmente e os valores teóricos calculados com base no fator de escala recomendado pela fabricante Raise3D, de 122% no eixo Z e 119% nos eixos XY.

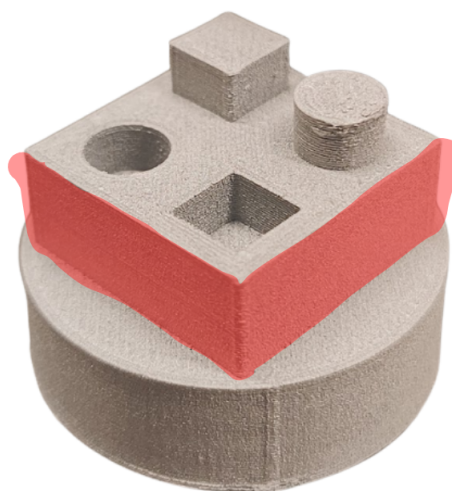
Tabela 25 – Comparação entre a retração média observada e a indicada pelo fabricante

Parâmetro	Eixo	Retração Calculada (%)	Retração Fornecedor (%)
R1	Z	17,10	18,03
D1	XY	15,85	15,97

Com base nesses fatores, a retração estimada seria de aproximadamente 18,03% no eixo Z e 15,97% no plano XY. Os valores médios calculados no trabalho, 17,10% para o eixo Z e 15,85% o plano XY, demonstram uma concordância com as estimativas do fabricante, o que indica que o processo de MFFF se manteve dentro do esperado.

4.3.2 Prisma de base quadrada

A Figura 46 ilustra a região do prisma de base quadrada, destacada em vermelho, selecionada para a análise dimensional. Essa indicação tem caráter ilustrativo, apenas para facilitar a identificação da região considerada no cálculo da retração.

Figura 46 – Destaque da geometria do prisma de base quadrada analisada

Fonte: do Autor (2025)

A Tabela 26 apresenta os valores de retração linear observados nas dimensões do prisma de base quadrada, considerando a retração na altura (R2), associada ao eixo Z, e na base (L1 e L2), referentes ao plano XY.

Tabela 26 – Porcentagem de retração do prisma de base quadrada

Amostra	Grupo	R2 (%)	L1 (%)	L2 (%)
P1	G_A12_P100_2V	19,41	16,46	16,47
P2		19,30	16,28	16,52
P3		19,34	16,47	16,46
P4	G_A24_P100_2V	16,44	15,48	15,72
P5		18,85	15,38	15,40
P6		19,03	15,34	15,36
P7	G_A24_P50_3V	18,25	15,21	15,10
P8		17,52	15,01	14,88
P9		17,05	15,20	15,24
P10	G_A24_P100_3V	18,08	15,16	15,16
P11		17,29	15,01	15,23
P12		17,50	15,28	15,01
P13	G_A24_P50_2V	17,43	15,74	15,90
P14		16,62	16,27	15,62
P15		17,40	15,90	15,77
P16	G_A12_P50_3V	18,49	16,49	16,15
P17		18,34	16,34	15,95
P18		18,47	16,37	16,21
P19	G_A12_P100_3V	19,45	16,71	16,75
P20		19,18	16,59	16,90
P21		19,47	16,67	16,63
P22	G_A12_P50_2V	17,85	16,30	16,04
P23		17,73	16,66	16,18
P24		17,88	16,56	16,16

Os resultados indicam que a retração no eixo Z variou de 16,44% a 19,47%, com maior dispersão entre os grupos. Já os valores de retração no plano XY apresentaram menor variação, oscilando entre 14,88% e 16,90%.

O Grupo G_A12_P100_3V apresentou as maiores retrações médias em todos os eixos, com a peça P21 atingindo o maior valor de R2. Por outro lado, os menores valores de retração no plano XY foram observados no Grupo G3, nas peças P8 e P9.

Como o parâmetro R1 já carrega consigo uma certa variância e erro, é possível que esses efeitos tenham sido somados ou amplificados ao se calcular R2. Isso porque, enquanto o primeiro ressaltado (R1) tem como referência a mesa da impressora, calibrada automaticamente, o segundo ressaltado (R2) é impresso sobre a última camada de R1, que pode carregar pequenas imperfeições acumuladas ao longo da impressão. Assim, qualquer desalinhamento em R1 acaba influenciando a construção de R2.

A Tabela 27 apresenta a comparação entre os valores médios de retração linear calculados do prisma de base quadrada e os valores teóricos estimados pelo fabricante.

Tabela 27 – Comparação da retração calculada e a indicada pelo fabricante para o prisma de base quadrada

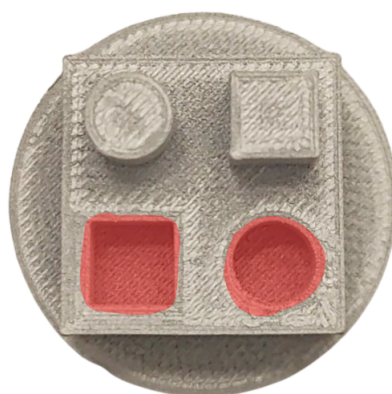
Eixo	Parâmetro	Retração Calculada (%)	Retração Fornecedor (%)
Z	R2	18,14	18,03
XY	L1/L2 (média)	15,87	15,97

No eixo Z, a retração média calculada foi de 18,14%, praticamente igual ao valor esperado de 18,03%. Para o plano XY, a retração obtida foi de 15,87%, também próxima ao valor teórico de 15,97%.

4.3.3 Furos cilíndrico e quadrado

A Figura 47 ilustra a região dos furos, destacados em vermelho, selecionados para a análise dimensional. Essa indicação tem caráter ilustrativo, apenas para facilitar a identificação da região considerada no cálculo da retração.

Figura 47 – Destaque da geometria dos furos analisados



Fonte: do Autor (2025)

A Tabela 28 apresenta os valores de retração linear calculados nos furos cilíndricos e quadrados, considerando tanto o eixo Z (representado pelos parâmetros P1 e P2) quanto o plano XY (representado por L3, L4 e D3).

Tabela 28 – Porcentagem de retração dos furos

Amostra	Grupo	P1 (%)	P2 (%)	L3 (%)	L4 (%)	D3 (%)
P1	G_A12_P100_2V	18,10	18,55	16,34	17,02	16,93
P2		20,12	20,03	17,45	16,71	16,30
P3		19,03	19,62	17,17	16,26	16,51
P4	G_A24_P100_2V	25,67	19,80	17,52	16,91	17,97
P5		23,08	22,16	17,91	16,96	17,73
P6		25,74	26,21	17,69	17,11	17,29
P7	G_A24_P50_3V	24,24	25,32	16,93	17,95	17,40
P8		25,61	26,09	17,58	17,41	16,97
P9		25,36	27,03	17,39	17,42	16,59
P10	G_A24_P100_3V	25,65	26,28	17,88	17,70	18,49
P11		25,08	26,97	18,54	17,15	16,53
P12		25,34	28,35	18,05	17,95	17,76
P13	G_A24_P50_2V	25,07	26,33	17,43	17,80	18,13
P14		26,48	27,23	17,33	17,71	17,72
P15		27,10	26,77	17,48	17,41	17,34
P16	G_A12_P50_3V	21,83	22,18	15,83	15,98	15,82
P17		22,49	24,45	15,95	16,12	16,13
P18		21,93	23,01	16,67	15,96	16,40
P19	G_A12_P100_3V	14,76	15,45	16,04	16,26	16,08
P20		17,37	17,53	16,88	15,92	16,01
P21		16,65	17,22	16,48	16,51	16,08
P22	G_A12_P50_2V	15,29	16,14	15,38	15,87	15,86
P23		17,56	16,20	14,96	15,24	15,99
P24		16,52	17,16	15,70	14,93	15,76

De maneira geral, os resultados mostram que a retração no eixo Z foi muito mais elevada, com valores médios de até 27,1% em alguns grupos. No entanto, os valores associados ao plano XY mantiveram-se mais estáveis, variando em torno de 15% a 18%.

Essa discrepância pode estar relacionada ao acúmulo de imprecisões ao longo da altura da peça, que pode intensificar a variância nos furos posicionados na direção Z.

Além disso, grupos G_A24_P100_3V e G_A24_P50_2V apresentaram as maiores retrações no eixo Z, o que sugere uma possível influência dos parâmetros de processo nestas regiões. Já os grupos G_A12_P100_3V e G_A12_P50_2V demonstraram melhor controle dimensional, com retrações mais esperadas tanto no eixo Z quanto no plano XY.

A Tabela 29 apresenta a comparação entre os valores médios de retração obtidos para os furos cilíndricos e quadrados e os valores recomendados pela fabricante Raise3D.

Tabela 29 – Comparação entre a retração média calculada nos furos e a indicada pelo fabricante

Eixo	Parâmetros	Retração Calculada (%)	Retração Fornecedor (%)
Z	P1 / P2	22,11	18,03
XY	L3 / L4 / D3	16,52	15,97

No eixo Z, a retração média calculada foi de 22,11%, superior à retração estimada de 18,03%. Esse aumento pode ser atribuído à maior dificuldade de manter a

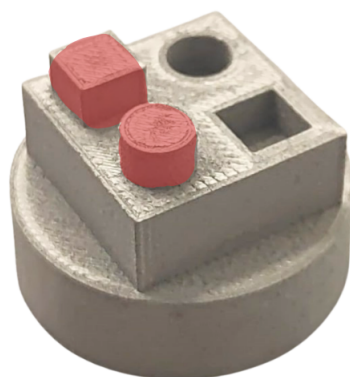
geometria interna de furos, em peças com múltiplas camadas de apoio e variações na deposição de material ao longo da altura.

Já no plano XY, a retração média foi de 16,52%, um valor ligeiramente superior ao recomendado (15,97%), mas ainda dentro de uma faixa aceitável de variação. Esses resultados sugerem que, a retração, no eixo Z, nos furos foi mais pronunciada, indicando a necessidade à compensação geométrica em furos verticais durante o projeto ou durante o fatiamento.

4.3.4 Ressaltos cilíndrico e quadrado

A Figura 48 ilustra a região dos ressaltos, destacados em vermelho, selecionados para a análise dimensional. Essa indicação possui caráter ilustrativo, apenas para facilitar a identificação da região considerada no cálculo da retração.

Figura 48 – Destaque da geometria dos ressaltos analisados



Fonte: do Autor (2025)

A Tabela 30 apresenta os valores da retração calculados para os ressaltos cilíndrico (R3C) e quadrado (R3Q). Assim como nas análises anteriores, os dados foram organizados por grupo (G1 a G8). Os parâmetros R3C e R3Q representam a retração no eixo Z. Já os parâmetros D2, L5 e L6 correspondem ao plano XY, e refletem a retração observada nas larguras e diâmetros das bases dos ressaltos.

Tabela 30 – Porcentagem de retração dos ressaltos cilíndrico e quadrado

Amostra	Grupo	R3C (%)	D2 (%)	R3Q (%)	L5 (%)	L6 (%)
P1	G_A12_P100_2V	19,67	15,13	18,62	16,28	15,98
P2		19,29	15,67	18,62	16,00	16,90
P3		19,17	15,73	18,58	16,28	16,77
P4	G_A24_P100_2V	16,91	13,94	19,25	14,08	14,95
P5		16,81	13,64	19,79	14,96	15,22
P6		19,75	13,97	19,83	14,90	15,44
P7	G_A24_P50_3V	20,50	13,27	19,96	14,34	14,92
P8		20,41	14,23	18,80	14,47	16,18
P9		19,79	14,22	19,34	15,15	15,92
P10	G_A24_P100_3V	19,42	13,48	20,81	13,95	13,70
P11		17,95	12,80	19,06	14,13	13,64
P12		19,18	13,90	20,85	13,23	14,18
P13	G_A24_P50_2V	20,54	14,63	17,36	15,47	16,82
P14		21,50	14,75	17,05	14,59	16,90
P15		19,62	14,78	18,18	14,77	17,23
P16	G_A12_P50_3V	20,87	15,68	19,54	16,02	17,34
P17		17,56	15,13	20,16	16,77	17,31
P18		19,54	15,60	18,88	16,85	17,54
P19	G_A12_P100_3V	16,53	15,90	17,89	16,62	16,93
P20		18,80	15,39	19,01	16,09	16,78
P21		18,09	16,21	18,07	16,31	16,65
P22	G_A12_P50_2V	18,24	15,76	17,05	16,15	17,08
P23		18,58	15,23	17,77	15,93	16,81
P24		18,18	15,41	18,03	16,51	17,34

De modo geral, observa-se que os valores de retração no eixo Z, foram ligeiramente superiores àqueles registrados no plano horizontal. Esse padrão se repete tanto nos ressaltos de geometria cilíndrica quanto nos de base quadrada.

Os grupos G_A24_P50_2V e G_A12_P50_3V apresentaram alguns dos maiores valores de retração em ambos os eixos, enquanto grupos como G_A24_P100_2V e G_A24_P100_3V mostraram retrações mais contidas, especialmente no plano XY. Vale ressaltar que pequenas variações entre peças de um mesmo grupo podem ser resultado de fatores como a orientação de impressão ou até mesmo diferenças pontuais no acabamento das superfícies internas dos ressaltos.

A Tabela 31 apresenta a comparação entre os valores médios de retração nos ressaltos e os valores teóricos estimados indicados pelo fabricante.

Tabela 31 – Comparação entre a retração média calculada nos ressaltos e a indicada pelo fabricante

Eixo	Parâmetros	Retração Calculada (%)	Retração Fornecedor (%)
Z	R3C / R3Q	19,07	18,03
XY	D2 / L5 / L6	15,31	15,97

Para o eixo Z, que corresponde à altura dos ressaltos, a média de retração calculada foi de 19,07%, valor ligeiramente superior ao estimado pela fabricante. Já no plano XY, a retração média encontrada foi de 15,31%, ficando ligeiramente abaixo do valor teórico de 15,97%.

Essas pequenas variações podem estar ligadas ao próprio formato dos ressaltos, já que regiões com curvas, quinas ou transições de seção tendem a sofrer mais com retrações irregulares, já que o material se acomoda de maneira diferente nesses pontos. Mesmo assim, os valores obtidos ficaram próximos ao esperado.

4.4 Análise do Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza Vickers foi realizado na amostra P1_A12_P100_2V produzida com altura de camada de 0,12mm, preenchimento de 100% e duas voltas de perímetro, e na amostra P4_A24_P100_2V mudando apenas altura de camada para 0,24mm. A medição foi realizada com aplicação de uma pré-carga de 10kgf durante 10 segundos. Os valores de dureza Vickers obtidos foram 95 HV para a amostra P1_A12_P100_2V e 78 HV para a amostra P4_A24_P100_2V, com os cálculos detalhados no Apêndice A.

A Tabela 32 apresenta uma comparação entre os valores de dureza Vickers obtidos experimentalmente nas amostras sinterizadas, os valores de referência fornecidos pelo fabricante e pelo banco de dados *MatWeb*. A amostra P1_A12_P100_2V, com altura de camada de 0,12mm, apresentou microdureza de aproximadamente 95 HV, embora sendo menor que o valor informado pelo fabricante, na faixa de 128 HV, ainda se mantém dentro de uma faixa razoável, enquanto a amostra P4_A24_P100_2V, com altura de camada de 0,24mm, obteve um valor mais baixo de 78 HV, que pode indicar maior efeito da altura de camada sobre a densidade final.

Ambos resultados ficaram abaixo do valor típico de 152 HV, informado pela *MatWeb* para o aço inox 316L, dado que essas peças fabricadas por MFFF geralmente apresentam uma maior porosidade e uma microestrutura mais diversificada.

Tabela 32 – Comparação entre valores de dureza Vickers para o aço inoxidável 316L

Fonte	Dureza Vickers (HV)	Observações
P1_A12_P100_2V	95	Amostra sinterizada, 0,12mm camada
P4_A24_P100_2V	78	Amostra sinterizada, 0,24mm camada
Raise3D	128	Peça sinterizada (padrão DIN EN ISO 6507-1)
MatWeb	152	Valor típico do 316L forjado ou laminado a frio

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho de conclusão de curso apresentou um estudo baseado nas etapas do processo de *Metal Fused Filament Fabrication* (MFFF), utilizando o sistema e material de um fabricante diferente daqueles amplamente estudados na literatura. Ao abordar o comportamento dimensional das amostras, produzidas com aço inox 316L, ao longo das fases de impressão, *debinding* e sinterização, este trabalho contribui para uma melhor compreensão sobre as variações dimensionais que ocorrem durante as etapas.

Ao longo do desenvolvimento, foram enfrentados desafios por se tratar da primeira experiência prática com o sistema de manufatura aditiva metálica. As incertezas sobre o funcionamento dos fornos, de *debinding* e sinterização, da impressora 3D demandaram um pouco de tempo para familiarização e ajustes.

Além disso, a elaboração da solução de ácido, utilizada na etapa de *debinding*, exigiu cuidados de preparo e de segurança. Os primeiros testes de impressão apresentaram algumas falhas de adesão e escorrimiento entre camadas, o que exigiu que fosse parado por um tempo para poder entender melhor o que estava acontecendo e também, algumas vindas da equipe da Raise3D para poder fazer manutenções e ajustes na impressora.

Por fim, a máquina de medição por coordenadas, passou por períodos de manutenção, no entanto, não impactou diretamente no cronograma. Apesar dessas dificuldades, a superação de cada uma delas contribuiu para o aprendizado e o amadurecimento técnico e metodológico ao longo do trabalho.

Além das etapas práticas do trabalho, a aplicação da análise estatística ANOVA também representou um desafio ao longo do desenvolvimento. Por se tratar de uma ferramenta ainda pouco familiar, foi necessário um esforço adicional para compreender seu funcionamento e interpretar corretamente os resultados. Apesar das dificuldades iniciais, a experiência contribuiu significativamente para o aprendizado, demonstrando a importância da estatística na avaliação e controle de processos de manufatura.

Em resumo, os resultados obtidos validam a metodologia utilizada e demonstram a viabilidade do uso do processo MFFF, desde que os fatores de impressão sejam bem selecionados. O estudo também evidencia a importância de realizar ajustes geométricos no modelo CAD ou na etapa de fatiamento, prevendo distorções.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do trabalho, sugerem-se as seguintes propostas para trabalhos futuros:

Comparação entre diferentes tipos de filamentos metálicos: Como o fabricante sugere dois tipos de filamento, e recomenda da mesma marca, há a possibilidade de testar o filamento de aço inoxidável 17-4 PH, visando analisar como variações na composição e no comportamento térmico afetam a precisão dimensional e as propriedades finais.

Realizar análise de microestrutura: Utilizar os equipamentos do laboratório de materiais para realizar a análise da microestrutura das peças sinterizadas, a fim de avaliar o tamanho do grão, presença de poros e possíveis falhas internas que influenciam nas propriedades mecânicas e na retração.

Implementação de estratégias de compensação geométrica no modelo CAD: Com base nos dados de retração obtido, verificar e desenvolver um modelo de compensação que seja possível ajustar previamente as dimensões e obter uma maior fidelidade entre o modelo CAD e a peça sinterizada final.

Aplicação em geometrias diferentes: Fazer o teste de impressão com geometrias funcionais, como engrenagens e peças com canais internos, para verificar a precisão do processo de MFFF em situações de aplicação real.

Investigar a influência de diferentes tipos estruturas internas: Com base nos dados de retração obtidos, utilizar diferentes tipos de estrutura para compreender como cada padrão de preenchimento afeta a retração, a distribuição de tensões internas e a estabilidade final da peça.

Aprofundar a análise de variância: Aprofundar a ANOVA utilizando testes de comparação, como o teste de Tukey, a fim de validar as diferenças estatisticamente significativas entre os grupos e ter uma visão mais precisa de quais fatores influenciam diretamente cada dimensão.

REFERÊNCIAS

- ALYAMMAHI, M. S. *et al.* Evaluation of dimensional accuracy of additively manufactured metal parts in fused filament fabrication process. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. [S.l.], 2021. v. 85604, p. V006T06A014. 17, 31, 32, 38, 40, 64, 71, 97
- ANDRADE, L. F. S. de *et al.* Dimensional and geometric evaluation of parts manufactured by metal fused filament fabrication (mfff) in the printing stage. In: ABCM. *Proceedings of the 28th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2025)*. Curitiba, Brazil, 2025. Paper COB-2025-1523. 16, 24
- BOSCHETTO, A. *et al.* Roughness investigation of steel 316L parts fabricated by metal fused filament fabrication. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, v. 81, p. 261–280, 2022. 21, 28, 29, 37
- COSTA, J. M.; SEQUEIROS, E. W.; VIEIRA, M. F. Fused filament fabrication for metallic materials: A brief review. *Materials*, MDPI, v. 16, n. 24, p. 7505, 2023. 16, 22, 24, 26, 28, 36, 38
- FORWARDAM. *Ultrafuse® 316L Process Instructions*. 2024. Disponível em: [https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Metal%20Filaments/ Ultrafuse_metal_User_Guideline.pdf](https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Metal%20Filaments/Ultrafuse_metal_User_Guideline.pdf). 27, 28, 29, 39
- JACOB, J. *et al.* A review of fused filament fabrication of metal parts (metal fff): Current developments and future challenges. *Technologies*, v. 12, n. 267, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/technologies12120267>. 16, 20, 23, 24, 25, 26, 28
- MARTIGNONI, L. *et al.* Prototyping and characterisation of 316L stainless steel parts and lattice structures printed via metal fused filament fabrication. *Rapid Prototyping Journal*, v. 30, n. 11, p. 123–141, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2023-0194>. 25, 29, 30, 31
- MatWeb, LLC. *AISI Type 316L Stainless Steel, annealed bar*. 2024. Accessed: 2025-07-07. Disponível em: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=530144e2752b47709a58ca8fe0849969&ckck=1>. 27
- RAISE3D. *After Sale – Forge1, D200-E, D200-C, S200-C User Manual*. [S.l.], 2023. Acesso em: 29 jun. 2025. Disponível em: <https://www.raise3d.com/>. 24, 25, 26, 27, 51, 58
- RAISE3D. *Raise3D Forge1 3D Printer*. 2025. 34, 36, 37, 38, 39
- SCARAVETTI, D.; DUBOIS, P.; DUCHAMP, R. Qualification of rapid prototyping tools: proposition of a procedure and a test part. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 38, p. 683–690, 2008. 40
- TANG, Z. *et al.* Study on debinding and sintering conditions in extrusion-based additive manufacturing of 316L and 316L-cu. *ResearchGate Preprint*, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/375474819_Study_on_Debinding_and_Sintering_Conditions_in_Extrusion-Based_Additive_Manufacturing_of_316L_and_316L_Cu. 27
- TRIOLA, M. F. *Introdução à Estatística*. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2018. 32

ZANJANIJAM, A. R. *et al.* Fused filament fabrication of peek: A review of process–structure–property relationships. *Polymers*, MDPI, v. 12, n. 8, p. 1666, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym12081666>. 21

APÊNDICES

APÊNDICE A

A seguir são apresentados os cálculos realizados para a determinação da dureza Vickers com base nas medições feitas em duas amostras sinterizadas, referentes aos Grupos 1 e 2.

Amostra P1 – Grupo 1 (altura de camada: 0,12mm):

$$D_1 = 0,443 \text{ mm} \quad (6)$$

$$D_2 = 0,439 \text{ mm}$$

$$d = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{0,443 + 0,439}{2} = 0,441 \text{ mm} \quad (7)$$

$$HV = \frac{1,854 \cdot 10}{(0,441)^2} = \frac{18,54}{0,194481} \quad (8)$$

$$HV \approx 95,3 \quad (9)$$

Amostra P4 – Grupo 2 (altura de camada: 0,24mm):

$$D_1 = 0,487 \text{ mm} \quad (10)$$

$$D_2 = 0,488 \text{ mm}$$

$$d = \frac{0,487 + 0,488}{2} = 0,4875 \text{ mm} \quad (11)$$

$$HV = \frac{1,854 \cdot 10}{(0,4875)^2} = \frac{18,54}{0,23765625} \quad (12)$$

$$HV \approx 78,0 \quad (13)$$

ANEXOS

ANEXO A

Figura 49 – Resultados dimensionais de peças verdes em aço 17-4 PH SS produzidas por MFFF

Parameter	CAD Size (mm)	Average Measurement, Standard Deviation (SD), Deviation Percentage (DP)								
		Copper			17-4 PH SS			Onyx		
		Average (mm)	SD (mm)	DP (%)	Average (mm)	SD (mm)	DP (%)	Average (mm)	SD (mm)	DP (%)
A _H	10.0	10.01	0.09	0.08	10.12	0.10	1.22	9.83	0.24	1.65
A _D	30.0	30.01	0.08	0.03	30.17	0.08	0.58	29.91	0.05	0.29
B _H	10.0	9.97	0.00	0.32	9.86	0.02	1.35	9.93	0.01	0.66
B _{w1}	20.0	20.02	0.04	0.09	20.15	0.05	0.75	20.09	0.07	0.43
B _{w2}	20.0	20.00	0.14	0.00	20.09	0.08	0.45	20.04	0.06	0.22
C _H	5.0	4.87	0.02	2.62	4.96	0.01	0.83	4.98	0.01	0.44
C _D	7.5	7.44	0.09	0.79	7.53	0.07	0.36	7.55	0.05	0.69
D _{DP}	5.0	5.03	0.01	0.54	4.93	0.03	1.31	4.99	0.12	0.15
D _{w1}	6.0	6.04	0.04	0.61	5.92	0.05	1.30	5.79	0.08	3.46
D _{w2}	6.0	6.01	0.12	0.22	5.98	0.03	0.36	5.78	0.08	3.73
E _{DP}	5.0	5.03	0.01	0.67	4.95	0.03	0.95	5.05	0.03	1.06
E _D	6.0	5.97	0.07	0.43	5.87	0.05	2.14	5.66	0.08	5.60

Fonte: Adaptado de (ALYAMMAHI *et al.*, 2021)