Avaliação geométrica e dimensional de peças metálicas produzidas em aço 17-4 ph por impressão 3d de fabricação por filamento fundido

Luiz Fernando Segalin de Andrade [1] | luizsegalin@ifsc.edu.br
Guilherme Silva Carvalho Rocha [2] | guilherme.sc21@aluno.ifsc.edu.br
Aurelio da Costa Sabino Netto [3] | asabino@ifsc.edu.br
André Roberto de Sousa [4] | asousa@ifsc.edu.br
Gabriel Costa Sousa [5] | gabrielcosta@ifsc.edu.br

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo a avaliação dimensional e geométrica de peças metálicas obtidas a partir do processo de fabricação por filamentos metálicos fundidos (MFFF). Este processo envolve a deposição de um fio compósito de material polimérico com partículas metálicas e demanda uma etapa de pós-processamento que envolve a remoção do polímero e a sinterização das peças para aumento da resistência, etapas provocam reduções volumétricas do material. Além disso, o processo de sinterização, por envolver o aquecimento das peças, pode causar distorções no material por conta de tensões térmicas nos mesmos. Diante disso, procurou-se avaliar as dimensões e geometrias intermediárias e finais em corpos de prova preestabelecidos por meio de equipamentos metrológicos como máquina de medição por coordenadas e micrômetros, onde os dados obtidos das medições foram utilizados para a realização de análise de variância (ANOVA). Dessa forma, foi possível qualificar as peças metálicas produzidas por este processo e definir possíveis estratégias para melhoria dos resultados de sua utilização.

Palavras-chave: avaliação dimensional; anova; impressão 3d; fff; mfff.

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da Indústria 4.0, a Manufatura Aditiva se destaca como um dos campos de fabricação em mais rápida expansão, com aplicações nos setores aeroespacial, automobilístico, médico, entre outros.

O presente trabalho foca no processo de *Metal Fused Filament Fabrication* (MFFF), onde um material compósito de polímero e partículas metálicas é depositado camada a camada. Este polímero serve como meio de deposição, pois seu ponto de fusão é muito inferior ao do metal (SINGH et al., 2020). O processo exige etapas posteriores de remoção do polímero (debinding) e sinterização, que causam considerável redução volumétrica e distorções geométricas, resultando em variações nas peças finais.

A literatura recente tem explorado essas variações dimensionais em diferentes materiais, como os aços inoxidáveis 316L (GONG et al., 2019; AIT-MANSOUR et al., 2020), cobre e aço inoxidável 17-4 PH (ALYAMMAHI et al., 2021). Contudo, esses trabalhos foram realizados com impressoras de outros fabricantes e processos comparativos distintos, evidenciando a necessidade de investigações focadas em novas combinações de equipamentos e materiais.

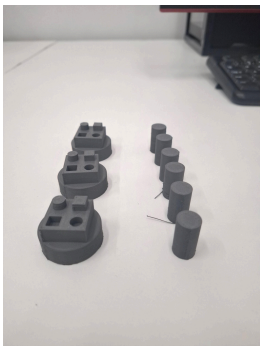
Assim, este estudo buscou avaliar as alterações dimensionais e geométricas em corpos de prova com instrumentos metrológicos, onde os dados obtidos foram analisados via ANOVA para qualificar as peças e propor estratégias que melhorem os resultados do processo.

2 METODOLOGIA

Inicialmente, foram realizadas as impressões dos corpos de prova (cilíndricos e de geometria variada) utilizando o filamento Ultrafuse® 17-4 PH, da marca BASF (Figura 1) em uma impressora Forge1, da marca Raise 3D. Após a impressão, foram testadas diferentes combinações de parâmetros: preenchimento interno (50% ou 100%), altura de camada (0,12 mm ou 0,24 mm) e espessura de parede (2 ou 3 voltas).

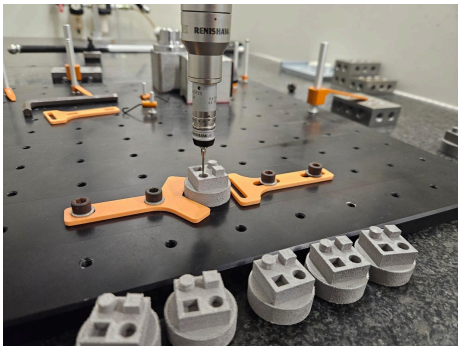
Em seguida, as peças foram medidas em duas etapas: no estado "verde" (logo após a impressão) e novamente após passarem pela sinterização. Para as medições, foram utilizados micrômetros e uma máquina de medição por coordenadas (Figura 2). A influência dos parâmetros de impressão nas variações dimensionais foi quantificada através da análise de variância (ANOVA), e os principais indicadores estatísticos foram organizados em tabelas para facilitar a interpretação (Figura 3).

Figura 1 - Corpos de prova impressos



Fonte: Dos Autores (2025).

Figura 3 - Medição com máquina de coordenadas



Fonte: Dos Autores (2025).

Figura 3 - Resultados da ANOVA

PRÉ-SINTERIZADOS

COMPRIMENTO QUADRADO

	F	valor-P	F crítico
ALTURA_CAMADA = 120	8,223785659	0,007930825554	4,066180551
ALTURA_CAMADA = 240	2,322068345	0,1515868296	4,066180551
PREENCHIMENTO = 50%	15,42256143	0,001091455532	4,066180551
PREENCHIMENTO = 100%	5,481012658	0,02424608556	4,066180551
QTD_PAREDE = 2	5,46328564	0,02444869786	4,066180551
QTD_PAREDE = 3	12,99255194	0,001923258169	4,066180551

LARGURA QUADRADO

	F	valor-P	F crítico
ALTURA_CAMADA = 120	0,7504842901	0,5520743821	4,066180551
ALTURA_CAMADA = 240	1,359472954	0,3227473261	4,066180551
PREENCHIMENTO = 50%	26,03825929	0,000176346119	4,066180551
PREENCHIMENTO = 100%	3,868756066	0,05591962126	4,066180551
QTD_PAREDE = 2	11,96136596	0,002511521786	4,066180551
QTD_PAREDE = 3	3,924110926	0,05417597491	4,066180551

SINTERIZADOS

COMPRIMENTO QUADRADO

	F	valor-P	F crítico
ALTURA_CAMADA = 120	28,00374532	0,0001356530248	4,066180551
ALTURA_CAMADA = 240	12,89645673	0,001970237253	4,066180551
PREENCHIMENTO = 50%	45,90425441	0,00002186311611	4,066180551
PREENCHIMENTO = 100%	20,60160668	0,0004045894071	4,066180551
QTD_PAREDE = 2	31,86249181	0,00008479560067	4,066180551
QTD_PAREDE = 3	63,39316584	0,00000642828106	4,066180551

LARGURA QUADRADO

	F	valor-P	F crítico
ALTURA_CAMADA = 120	0,6771263557	0,590087358	4,066180551
ALTURA_CAMADA = 240	6,618806776	0,01468519241	4,066180551
PREENCHIMENTO = 50%	54,6926251	0,00001128045899	4,066180551
PREENCHIMENTO = 100%	25,47103569	0,0001908467365	4,066180551
QTD_PAREDE = 2	28,16427412	0,0001328756669	4,066180551
QTD_PAREDE = 3	85,80546381	0,00000200654582	4,066180551

Fonte: Dos Autores (2025).

3 RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos pela ANOVA das medições realizadas, foi possível detectar que, para os corpos com geometria variada, a altura de camada e a espessura de parede foram os parâmetros de maior influência na precisão dimensional. Essa variância se mostrou mais acentuada em geometrias internas, como furos e rebaixos, tanto nas peças pré-sinterizadas quanto nas que passaram pelo processo de sinterização. Entretanto, em todos os parâmetros avaliados houve interferência, com exceção da profundidade do rebaixo retangular. Por outro lado, os cilindros de ensaio de compressão se mostraram mais estáveis ao processo de impressão e pós processamento, onde apenas a altura de camada de 0,120mm apresentou variância significativa (valor-p do diâmetro = 0,10; valor-p da altura = 0,46).

Por fim, concluiu-se que peças com geometrias mais simples são menos suscetíveis a deformações pelo processo de impressão e sinterização em comparação a geometrias mais complexas, onde essas devem ser projetadas de modo a possibilitar um processamento final e garantir as tolerâncias dimensionais desejadas.

REFERÊNCIAS

AIT-MANSOUR, I. et al. Design-dependent shrinkage compensation modeling and mechanical property targeting of metal FFF. Progress in Additive Manufacturing, v. 5, n. 1, p. 51–57, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-020-00124-8. Acesso em: 25 set. 2025.

ALYAMMAHI, M. et al. Evaluation of Dimensional Accuracy of Additively Manufactured Metal Parts in Fused Filament Fabrication Process. 2021. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1115/IMECE2021-71184. Acesso em: 25 set. 2025.

GONG, H. et al. Comparison of Stainless Steel 316L Parts Made by FDM- and SLM-Based Additive Manufacturing Processes. JOM, v. 71, n. 3, p. 880–885, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11837-018-3207-3. Acesso em: 25 set. 2025.

SINGH, S. et al. Current status and future directions of fused filament fabrication. Journal of Manufacturing Processes, v. 55, p. 288–306, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.049. Acesso em: 25 set. 2025.