

Estudo dos resultados obtidos pela impressão de peças metálicas produzidas em aço 17-4 PH por fabricação por filamento fundido

Luiz Fernando Segalin de Andrade | luizsegalin@ifsc.edu.br¹
Guilherme Silva Carvalho Rocha | guilherme.sc21@aluno.ifsc.edu.br²
Aurelio da Costa Sabino Netto | asabino@ifsc.edu.br³
André Roberto de Sousa | asousa@ifsc.edu.br⁴
Gabriel Costa Sousa | gabrielcosta@ifsc.edu.br⁵

EDITAL Nº 02/2024/PROPPI/UNIVERSAL

Trabalho de Pesquisa

DT 4 - Inovação Tecnológica, Processos Produtivos e Futuro das Tecnologias

Resumo:

O trabalho tem por objetivo avaliar as dimensões e a geometria de peças metálicas produzidas via fabricação por filamentos fundidos (FFF). Esta técnica consiste na deposição de um fio de material polimérico com partículas metálicas e demanda uma etapa de pós-processamento envolvendo a remoção do polímero e a sinterização das peças para aumento da resistência. Tais 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 nestas. Neste contexto, avaliaram-se as dimensões e geometrias em corpos de prova pré estabelecidos antes e depois da sinterização, sendo verificados em equipamentos metrológicos como máquina de medição por coordenadas e micrômetros. Após a obtenção dos dados, foram realizadas análises de variância, permitindo determinar as condições com maior instabilidade dimensional durante os processos. Dessa forma, foi possível qualificar as peças metálicas produzidas por este processo e definir possíveis estratégias de otimização da precisão e viabilidade do processo em aplicações futuras.

Palavras-chave: avaliação dimensional; ANOVA; impressão 3D; FFF; MFFF.

Introdução

A Manufatura Aditiva (MA) consolidou-se como um pilar da Indústria 4.0, impulsionada pela redução de desperdício de matéria prima, liberdade para fabricação de elementos com geometrias complexas e possibilidade de customização em massa. As principais áreas de aplicação da MA são: aeroespacial, automotivo e biomédico.

¹ Servidor do DAMM/Mecânica do IFSC - Câmpus Florianópolis.

² Estudante de Engenharia Mecatrônica - Bacharelado do IFSC - Câmpus Florianópolis.

³ Servidor do DAMM/Mecatrônica do IFSC - Câmpus Florianópolis.

⁴ Servidor do DAMM/Mecatrônica do IFSC - Câmpus Florianópolis.

⁵ Servidor do DAMM/Mecânica do IFSC - Câmpus Florianópolis.

Dentre os diversos processos presentes na MA, o escolhido para o trabalho foi o *Metal Fused Filament Fabrication* (Fabricação por Filamento Metálico Fundido - MFFF), no qual se utiliza um filamento compósito, constituído por uma matriz polimérica carregada com pó metálico. Após a impressão, a peça ainda contendo a mistura do pó metálico com o polímero, deve ser submetida às etapas de desvinculação (*debinding*), para remoção da matriz polimérica, e sinterização, para a consolidação e densificação do material metálico, conferindo a resistência mecânica final ao componente.

Entretanto, essas etapas de pós-processamento envolvem o emprego de agentes químicos (ácido oxálico e álcool isopropílico) e alta temperatura, gerando assim distorções geométricas e dimensionais, por conta da remoção do material polimérico e da sinterização do pó metálico. Diante disto, o trabalho buscou avaliar as dimensões e geometrias das peças fabricadas em filamento com carga de aço inoxidável 17-4 PH, por meio do processo de MFFF.

Essas distorções ocorrem principalmente por conta das etapas de remoção do material polimérico e da sinterização provocam reduções no volume da peça final. Neste contexto, avaliaram-se as dimensões e geometrias em corpos de prova pré estabelecidos antes e depois da sinterização, sendo verificados em equipamentos metrológicos como máquina de medição por coordenadas e micrômetros. Após a obtenção dos dados, foram realizadas análises de variância (ANOVA), permitindo determinar as condições com maior instabilidade dimensional durante os processos. Dessa forma, foi possível qualificar as peças metálicas produzidas por este processo e definir possíveis estratégias de otimização da precisão e viabilidade do processo em aplicações futuras.

Fundamentação teórica

O processo MFFF é baseado no mesmo princípio da Fabricação por Filamento Fundido (FFF), onde um material é depositado camada por camada para construir um objeto tridimensional. No caso do MFFF o material metálico está misturado a um material polimérico o qual serve de meio para a deposição do material, uma vez que seu ponto de fusão é muito inferior ao do metal (Singh *et al.*, 2020).

Este tipo de processo pode ser utilizado para diferentes tipos de metal. Algumas ligas de aço inoxidável (316L e 17-4 PH) e de cobre são objetos de estudo na literatura. Após a

impressão, a peça passa por um processo de pós-processamento para remover o aglutinante restante e consolidar completamente o metal. No presente estudo esta consolidação será realizada por sinterização térmica.

Foram encontrados alguns trabalhos na literatura onde foram estudados diferentes aços inoxidáveis com outros processos e impressoras de marcas diferente da utilizada neste estudo. Destacam-se alguns trabalhos como o de Gong *et al.* (2019) que apresentam um estudo realizado com o processo MFFF de peças fabricadas em aço inox 316L com um modelo de impressora de outra marca e comparando o processo ao de SLM com o mesmo material. Também utilizando o aço inox 316L, Ait-Mansour *et al.* (2020) apresenta um estudo mostrando as diferentes alterações dimensionais obtidas com um processo MFFF. Alyammahi *et al.* (2021) apresentam, por sua vez, um estudo que envolve diferentes materiais e fazem a avaliação dimensional das peças produzidas pelo processo de MFFF. Dentre os materiais estão o cobre e o aço inox 17-4 PH. Este estudo utiliza um modelo de equipamento *Markforged X7TM*. Os autores definem uma geometria padrão e fazem a análise dimensional das amostras avaliando seu resultado o qual será utilizado como base de comparação de resultados.

No caso do presente estudo será utilizado o material 17-4 PH. Este é um material que, segundo o fabricante “é um aço inoxidável martensítico ligado com cromo e cobre, que se distingue pela sua elevada resistência mecânica. Este aço pode ser endurecido por precipitação para atingir uma força e dureza superiores”.

Procedimentos metodológicos

Inicialmente foram realizadas as impressões dos corpos de prova (Imagem 1) utilizando o filamento *Ultrafuse 17-4 PH*, da marca Basf numa impressora *Forge1*, da marca *Raise3D*. Para a impressão, foram realizadas 8 impressões com 9 peças cada (6 cilindros para ensaio de compressão, e 3 peças com geometrias variadas), variando três parâmetros em dois níveis, sendo: Preenchimento interno (50% ou 100%), altura de camada (0,12 mm ou 0,24 mm) e espessura de parede (2 voltas ou 3 voltas).

Imagem 1 - Corpos de prova impressos



Fonte: elaboração própria.

Com os corpos de prova já impressos, foram realizadas medições utilizando dois micrômetros, da fabricante Mitutoyo, modelos MDC-25MX e MDC-50MX, com precisão de $\pm 1 \mu\text{m}$, para os corpos de prova cilíndricos, e uma máquina de medição por coordenadas (MMC), da fabricante LK, modelo G80-C com software Modus, para os corpos de prova com geometria variada (Imagem 2). Este equipamento possui erro máximo volumétrico (ISO10360-2) de $\pm 3 + L/300 \mu\text{m}$, sendo L a dimensão medida em milímetros, e os dados foram utilizados para o cálculo da análise de variância (ANOVA) entre os diferentes parâmetros.

Imagem 2 - Medição com MMC



Fonte: elaboração própria.

Posteriormente, as peças impressas passaram pelo processo de debinding, para a remoção do material polimérico contido nos corpos de prova impressos, e pela sinterização, e foram medidas novamente com o mesmo procedimento citado anteriormente.

Com os dados obtidos via ANOVA, foram elaboradas tabelas para melhor visualização dos principais dados (Valor P, Fator F e F crítico) (Figura 3).

Figura 3 - Resultados da ANOVA

PRÉ-SINTERIZADOS				SINTERIZADOS			
DIÂMETRO		F crítico = 3,098391212		DIÂMETRO		F crítico = 3,098391212	
	F	valor-P			F	valor-P	
ALTURA_CAMADA = 120	1,41E+01	3,55E-05		ALTURA_CAMADA = 120	2,38E+00	1,00E-01	
ALTURA_CAMADA = 240	1,05E+01	2,34E-04		ALTURA_CAMADA = 240	3,46E+00	3,56E-02	
PREENCHIMENTO = 50%	1,05E+01	2,30E-04		PREENCHIMENTO = 50%	2,32E+01	1,01E-06	
PREENCHIMENTO = 100%	3,51E+00	3,42E-02		PREENCHIMENTO = 100%	1,48E+01	2,56E-05	
QTD_PAREDE = 2	1,30E+01	6,16E-05		QTD_PAREDE = 2	2,80E+01	2,31E-07	
QTD_PAREDE = 3	1,97E+01	3,52E-06		QTD_PAREDE = 3	5,85E+00	4,89E-03	
ALTURA		F crítico = 3,098391212		ALTURA		F crítico = 3,098391212	
	F	valor-P			F	valor-P	
ALTURA_CAMADA = 120	1,80E+01	6,60E-06		ALTURA_CAMADA = 120	9,03E-01	4,57E-01	
ALTURA_CAMADA = 240	3,34E+00	4,00E-02		ALTURA_CAMADA = 240	9,49E+01	5,34E-12	
PREENCHIMENTO = 50%	8,99E+00	5,67E-04		PREENCHIMENTO = 50%	5,55E+01	7,10E-10	
PREENCHIMENTO = 100%	1,01E+01	2,89E-04		PREENCHIMENTO = 100%	4,26E+00	1,76E-02	
QTD_PAREDE = 2	1,19E+01	1,11E-04		QTD_PAREDE = 2	3,65E+01	2,65E-08	
QTD_PAREDE = 3	9,52E+00	4,11E-04		QTD_PAREDE = 3	6,91E+01	9,94E-11	

Legenda

Abaixo de F crítico Acima de F crítico

Fonte: elaboração própria.

Resultados e discussões

Após as medições das peças utilizando a máquina de medição por coordenadas e os micrômetros, e o tratamento dos resultados obtidos, foi possível detectar que, para os corpos com geometria variada, a altura da camada e a quantidade de paredes foram os parâmetros de maior influência na precisão dimensional. Essa variância se mostrou mais acentuada nas geometrias internas, tanto nas peças pré sinterizadas quanto nas sinterizadas. Entretanto, em todos os parâmetros avaliados houve variância, com exceção da profundidade do furo retangular. Por outro lado, os cilindros de ensaio de compressão sofreram variância apenas com as peças pós sinterizadas, onde a altura de camada de 0,120 mm se tornou significativa (valor-p do diâmetro = 0,10; valor-p da altura = 0,46). Com esses dados, conclui-se que peças com geometrias mais simples são menos suscetíveis a deformações pelo processo de impressão e sinterização em comparação com geometrias mais complexas, onde essas devem ser projetadas com tolerâncias maiores a fim de possibilitar um pós-processamento e garantir as tolerâncias dimensionais desejadas.

Considerações finais

Com base nos resultados obtidos, 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. Essa sensibilidade é acentuada em peças com geometrias internas, como furos, canais e rebaixos, que se mostraram significativamente mais afetadas pelas condições de fabricação e pós-processamento. Portanto, tais elementos devem ser projetados de modo a viabilizar o processamento final e garantir as tolerâncias dimensionais desejadas.

Referência ao fomento recebido

Os autores do artigo agradecem à FAPESC pelo financiamento para a aquisição dos equipamentos e materiais de consumo utilizados na pesquisa bem como ao CNPq pelo financiamento do presente trabalho por meio de bolsa do Programa de Iniciação ao Desenvolvimento Tecnológico e Inovação e de apoio a compra de parte dos insumos necessários para a pesquisa.

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: 20 abr. 2026.

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: 20 abr. 2026.

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: 20 abr. 2026.



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: 20 abr. 2026.