

Estudo do processo de *Metal Fused Filament Fabrication* (MFFF) para a fabricação de insertos para moldes com canais conformais

Guilherme Henrique Benck Bandeira | guilherme.hbb@aluno.ifsc.edu.br¹

Guilherme Pimentel Borga | guilherme.b11@aluno.ifsc.edu.br²

Guilherme Silva Carvalho Rocha | guilherme.sc21@aluno.ifsc.edu.br³

Aurélio da Costa Sabino Netto | asabino@ifsc.edu.br⁴

Henrique Cezar Pavanati | pavanati@ifsc.edu.br⁵

Luiz Fernando Segalin Andrade | luizsegalin@ifsc.edu.br⁶

Edital Nº 03/2025/PROPI - PIBITI

Trabalho de Pesquisa

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

Resumo:

Este trabalho investiga a aplicação da manufatura aditiva por *Metal Fused Filament Fabrication* (MFFF) na fabricação de insertos com canais conformais para moldes. O objetivo é explorar a viabilidade técnica do processo quanto à precisão dimensional, integridade estrutural e desempenho das peças. A metodologia utilizou o sistema *MetalFuse* e o filamento *Ultrafuse® 17-4 PH*, com ensaios experimentais envolvendo variação de parâmetros de impressão, análises dimensionais e testes de estanqueidade. Também foram produzidas geometrias com diferentes níveis de complexidade, incluindo um modelo reduzido de inserto. Os resultados indicaram que os parâmetros de impressão influenciam diretamente o desempenho e não conferiram estanqueidade. A compensação dimensional permitiu controlar a contração, com variações médias de 3%. Os canais conformais mantiveram-se íntegros, embora com leve ovalização, além da ocorrência de trincas em regiões não críticas. Conclui-se que o MFFF apresenta potencial para a aplicação proposta, desde que sejam realizados ajustes de projeto e de processo.

Palavras-chave: manufatura aditiva; MFFF; canais conformais; moldes metálicos; *Ultrafuse 17-4 PH*.

Introdução

O avanço da manufatura aditiva tem ampliado a fabricação de componentes com alta complexidade geométrica, reduzindo custos e aumentando a flexibilidade de projeto.

¹ Estudante do curso de Engenharia Mecatrônica - Bacharelado do IFSC - Câmpus Florianópolis - Centro.

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

³ Estudante do curso de Engenharia Mecatrônica - Bacharelado do IFSC - Câmpus Florianópolis - Centro.

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

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

⁶ Servidor do DAMM/Mecânica do IFSC - Câmpus Florianópolis - Centro.

Nesse contexto, destaca-se o MFFF que é uma adaptação do *Fused Filament Fabrication* (FFF) para metais (Costa; Sequeiros; Vieira, 2023).

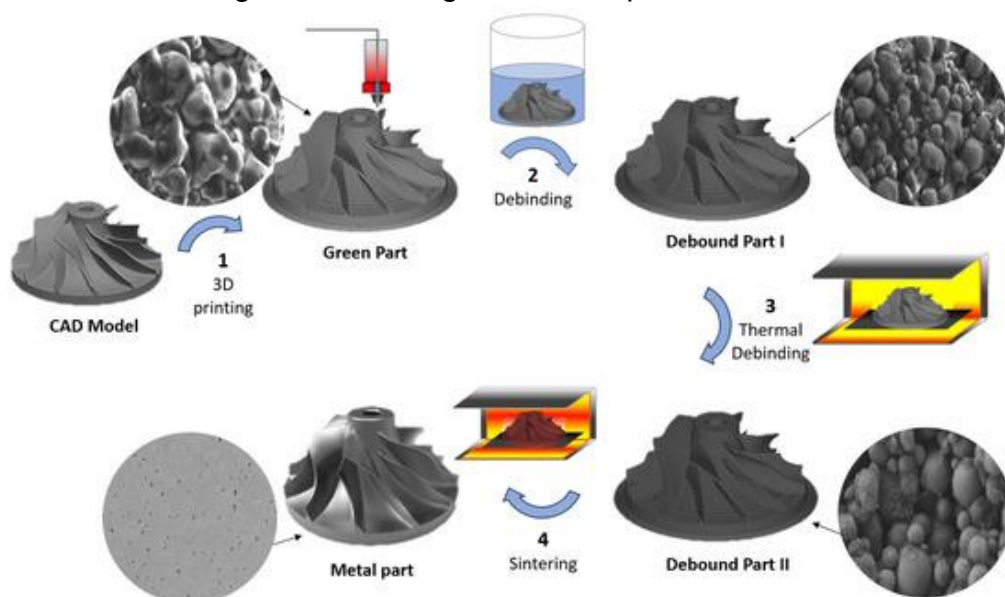
Insertos produzidos por MFFF podem ser uma alternativa viável para moldes de injeção com canais conformais. Parte-se da hipótese de que o processo permite a fabricação de geometrias complexas com menor risco de obstrução de canais internos.

O trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação do MFFF na fabricação de insertos com canais conformais, analisando vantagens, limitações e potencial de aplicação industrial. O projeto também promove a integração entre ensino, pesquisa e extensão, com foco no desenvolvimento técnico dos estudantes e impacto na indústria regional.

Fundamentação teórica

O MFFF baseia-se na extrusão de filamentos com partículas metálicas dispersas em matriz polimérica, seguida do *debinding* e por fim a sinterização (Jacob *et al.*, 2024). A Figura 1 apresenta uma visão geral dessas etapas.

Figura 1 - Visão geral das etapas do MFFF



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

Apesar de apresentar vantagens como menor custo e maior segurança em relação a outros processos de fusão em leito de pó para obtenção de peças de metal, o MFFF

enfrenta desafios como contração dimensional, porosidade e anisotropia (Alyammahi *et al.*, 2021). Essas limitações impactam aplicações que exigem alta precisão, como insertos com canais conformais, sendo necessária a otimização dos parâmetros de impressão e das condições térmicas para alcançar resistência mecânica e estanqueidade (Costa; Sequeiros; Vieira, 2023; Jacob *et al.*, 2024).

No contexto industrial, destaca-se a relevância do setor de plásticos em Santa Catarina (Abiplast, 2025). Na moldagem por injeção, o resfriamento é a etapa mais crítica, podendo ser otimizado por canais conformais, que reduzem significativamente o tempo de ciclo (Kariminejad *et al.*, 2024). Embora amplamente explorados em outras tecnologias, ainda são poucas as pesquisas envolvendo o MFFF para essa finalidade.

Procedimentos metodológicos

Para a realização da pesquisa, foi utilizado o sistema *MetalFuse*, da Raise3D (Figura 2). O material utilizado foi o filamento *Ultrafuse® 17-4 PH*, seguindo parâmetros de *debinding* e sinterização indicados pelo fabricante (BASF, 2025).

Figura 2 - Sistema *MetalFuse*

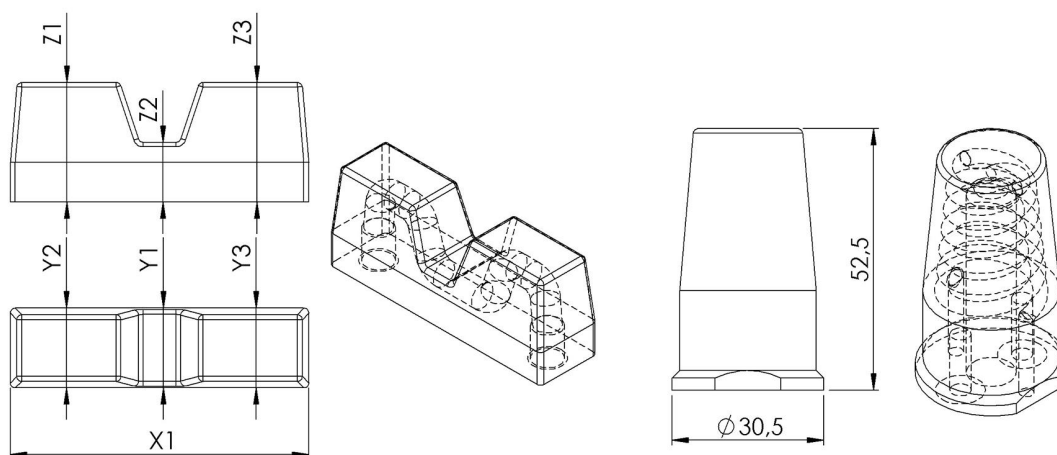


Fonte: Adaptado de (Raise3D, 2023).

Para avaliar a viabilidade do processo MFFF, foi proposto um modelo de inserto com canal conformal incorporado, cuja geometria e dimensões básicas estão apresentadas na Figura 3A. No Estudo 1 foram fabricados 4 corpos de prova (CPs) com preenchimento de 50% e diferentes combinações de diâmetro de bico e altura de camada.

Para sua fabricação, adotou-se uma expansão de 20% em todos os eixos, com o objetivo de avaliar, de forma exploratória, a capacidade de reprodução dos canais conformais e os valores de contração nos eixos XYZ.

Figura 3 - Geometria dos CPs utilizados nos Estudos 1, 2 e 3



A - Estudos 1 e 2

B - Estudo 3

Fonte: elaborado pelos autores.

No Estudo 2 foram fabricados mais 4 CPs variando os mesmos parâmetros, porém com preenchimento de 100%. As combinações dos Estudos 1 e 2 estão listadas na Tabela 1. Os CPs com 100% foram submetidos a ensaios de estanqueidade, com aplicação de ar comprimido a 2 bar, imersos em água. O critério de aceitação para ensaio foi o não vazamento de ar pela superfície do corpo de prova. Realizou-se também a compensação dimensional com base nos valores de contração obtidos no corpo de prova 1a do estudo anterior. Para as medições, foram utilizados micrômetros e paquímetros digitais, com resolução de 0,001mm e 0,01mm, respectivamente.

Tabela 1 - Parâmetros de fabricação dos CPs dos Estudos 1 e 2

Estudo 1			Estudo 2		
Percentual de preenchimento 50%			Percentual de preenchimento 100%		
Código	Diâmetro do bico (mm)	Altura de camada (mm)	Código	Diâmetro do bico (mm)	Altura de camada (mm)
1a	0,4	0,12	2a	0,4	0,12
1b	0,4	0,24	2b	0,4	0,24
1c	0,6	0,18	2c	0,6	0,18
1d	0,6	0,24	2d	0,6	0,24

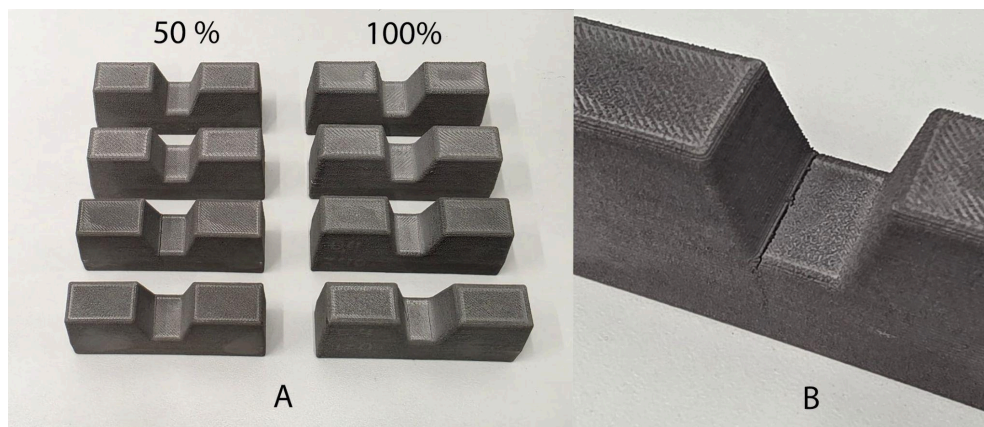
Fonte: elaborado pelos autores.

Para avaliar a aplicabilidade do processo, no Estudo 3 foi proposta uma geometria com canais conformais de maior complexidade, simulando um inserto para molde de copo, apresentado na Figura 3B. A condição de impressão adotada foi a de código 2b, por reduzir o tempo de fabricação mantendo boa resolução. Os valores de compensação de contração foram baseados em Andrade *et al.* (2025).

Resultados e discussões

As geometrias impressas do Estudo 1 (Figura 4A) não apresentaram colapso ou obstrução dos canais conformais. Após a sinterização, observaram-se trincas nos CPs com códigos 1a e 1b, possivelmente relacionadas ao raio adotado nos cantos e à menor largura de parede (Figura 4B). No Estudo 2 o raio foi ligeiramente aumentado para 3mm, porém a condição 2a ainda apresentou fissuras, enquanto as demais permaneceram íntegras.

Figura 4 - CPs dos Estudos 1 e 2 (A) e trinca pós sinterização (B)



Fonte: elaborado pelos autores.

Os ensaios de estanqueidade indicaram vazamentos em todos os CPs com 100% de preenchimento. Ainda assim, a estanqueidade pode ser melhorada por ajustes nos parâmetros de impressão ou através de infiltração por capilaridade com resinas ou ligas de baixo ponto de fusão.

Os resultados dimensionais do Estudo 2 estão apresentados na Tabela 2. Mesmo com compensação baseada em amostras com 50% de preenchimento, obteve-se erro médio de 2% para bico de 0,4mm e 3% para 0,6mm.

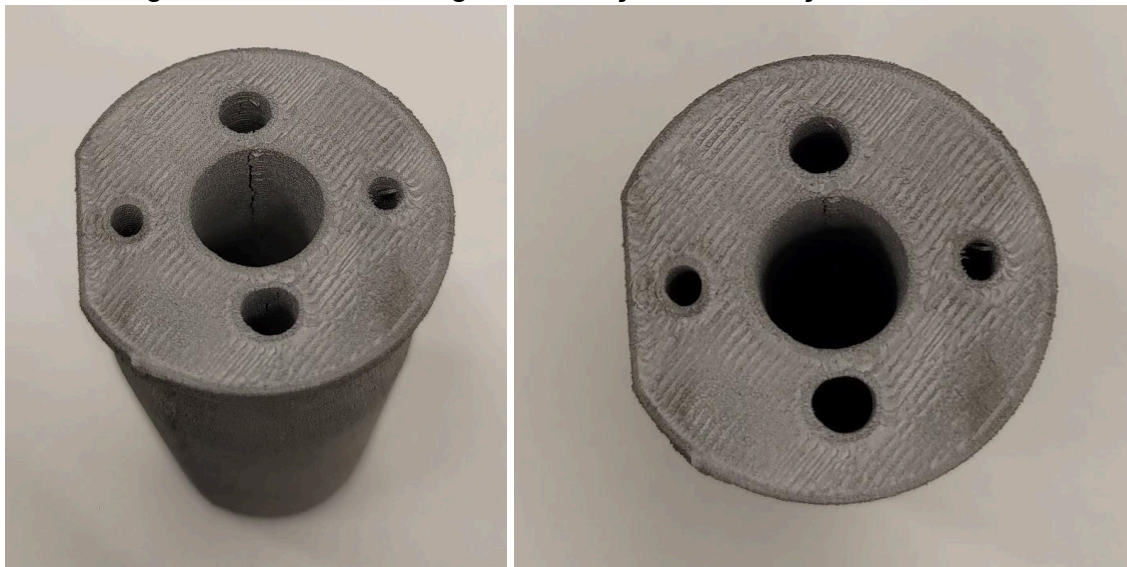
Tabela 2 - Resultados das medições no Estudo 2

Eixo	2a		2b		2c		2d	
	Contração %	Erro médio %	Contração %	Erro médio %	Contração %	Erro médio %	Contração %	Erro médio %
X	15,66%	1,35%	15,35%	1,80%	15,00%	2,23%	14,79%	2,49%
Y	15,93%	1,42%	15,46%	2,69%	14,85%	3,30%	14,19%	3,89%
Z	18,96%	2,58%	18,93%	1,85%	18,84%	2,78%	18,87%	2,47%

Fonte: elaborado pelos autores.

A impressão da geometria com canais conformais mais complexos foi realizada com êxito (Figura 5). Não houve obstrução dos canais, com diâmetro de aproximadamente 3mm. Após a sinterização, observaram-se trincas nas regiões de fixação do inserto ao molde, possivelmente associadas à menor espessura de parede decorrente da escala reduzida. Esse resultado indica a necessidade de maior atenção ao projeto para manufatura destes objetos.

Figura 5 - Trincas na região de fixação e ovalização dos canais



Fonte: elaborado pelos autores.

Os canais conformais mantiveram sua integridade estrutural, embora com leve ovalização, possivelmente associada a fatores geométricos e às condições de sinterização.

Considerações finais

O MFFF demonstrou potencial para a fabricação de insertos com canais conformais, permitindo a obtenção de peças com boa precisão e integridade estrutural. Entretanto, desafios relacionados a trincas, deformações e estanqueidade ainda exigem otimizações no processo e no projeto, bem como, pós-processamentos como a infiltração por capilaridade.

Os parâmetros de compensação dimensional apresentados por Andrade *et al.* (2025) mostraram-se eficazes, permitindo controle da contração após sinterização, com variações inferiores a 3%. O Estudo 3 evidenciou o potencial do MFFF para geometrias complexas, embora a ovalização observada indique a influência de variáveis geométricas e térmicas que ainda demandam investigação. Além dos resultados obtidos, o projeto reforçou a articulação entre ensino, pesquisa e extensão, evidenciando seu potencial impacto na indústria regional.

Como continuidade, pretende-se aprofundar estudos com canais conformais, com mais replicações, e produzir um molde para avaliação em condições reais, visando consolidar o uso do MFFF como alternativa viável na fabricação de insertos.

Referência ao fomento recebido

Os autores agradecem à FAPESC pelo financiamento dos equipamentos e materiais e ao IFSC/CNPq pelo apoio ao projeto por meio de bolsa de iniciação tecnológica e recursos para insumos.

Referências

ABIPLAST. **Perfil 2025: as indústrias de transformação e reciclagem de plástico no Brasil**. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil2025/>. Acesso em: 17 abr. 2026.



ALYAMMAHI, M. S.; ATATREH, S.; SUSANTYOKO, R. A.; ALKINDI, T. Evaluation of dimensional accuracy of additively manufactured metal parts in fused filament fabrication process. In: ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION – IMECE, 2021, Online. **Proceedings of the ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Design, Systems, and Complexity**. New York: ASME, 2021. p. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2021-71184>.

ANDRADE, L. F. S. de; ROCHA, G. S. C.; NETTO, A. da C. S.; SOUSA, A. R. de; SOUSA, G. C. Avaliação geométrica e dimensional de peças metálicas produzidas em aço 17-4 PH por impressão 3D de fabricação por filamento fundido. In: **SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO IFSC (SNCT IFSC)**, 2025. **Anais da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia do IFSC**. Florianópolis: IFSC, 2025. Disponível em: <https://ojs.ifsc.edu.br/index.php/snctifsc/article/view/4355/5329>. Acesso em: 17 abr. 2026.

BASF. **Ultrafuse® 17-4 PH extended TDS version 1.1**. [S.l.]: Forward AM, 2025. Disponível em: <https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/metal-filaments/ultrafuse-17-4-ph/>. Acesso em 17 abr. 2026

COSTA, J. M.; SEQUEIROS, E. W.; VIEIRA, M. F. Fused filament fabrication for metallic materials: a brief review. **Materials**, Basel, v. 16, n. 24, p. 7505, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16247505>.

JACOB, J.; PEJAK SIMUNEC, D.; KANDJANI, A. E. Z.; SOLA, A. A review of fused filament fabrication of metal parts (Metal FFF): current developments and future challenges. **Technologies**, Basel, v. 12, n. 12, p. 267, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies12120267>.

KARIMINEJAD, M. et al. Sensorised metal AM injection mould tools for in-process monitoring of cooling performance with conventional and conformal cooling channel designs. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 116, p. 25–39, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.02.021>.

RAISE3D. **MetalFuse full in-house FFF 3D printing solution**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: https://portalimages.blob.core.windows.net/products/pdfs/rkqxrogc_Raise3DMetalFuseFullIn-HouseFFF3DPrintingSolution.pdf. Acesso em: 17 abr. 2026.