

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

CONSTRUÇÃO DE PAREDES FINAS POR IMPRESSÃO 3D

WESLEY B. DA SILVA.¹, KELVIN DOS S. TIENE², CLEITON L. F. DE ASSIS.³, GUILHERME R. MECELIS.⁴

¹ Graduando em Bacharelado em Engenharia Elétrica, IFSP, Campus Votuporanga, w.barbosa@aluno.ifsp.edu.br

² Graduando em Bacharelado em Engenharia Elétrica, IFSP, Campus Votuporanga, kelvin.tiene@aluno.ifsp.edu.br

³ Docente, Área Engenharia Mecânica, IFSP, Campus Votuporanga, fazolocla@ifsp.edu.br.

⁴ Docente, Área Engenharia Mecânica, IFSP, Campus Votuporanga, guilherme.mecelis@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.03.05.04-7 Polímeros, Aplicações.

RESUMO: Este estudo explora a fabricação de paredes finas utilizando a técnica de impressão 3D por Fabricação por Filamento Fundido (FFF). A pesquisa foca na análise dos efeitos de parâmetros críticos como velocidade de impressão, temperatura de impressão e a altura do bico de impressão em relação a mesa de impressão (offset) na qualidade final das peças impressas em PLA-HT. Experimentos foram realizados com uma impressora 3D configurada para testar diferentes combinações desses parâmetros, buscando mitigar problemas como adesão inadequada, formação de fios (stringing), e inconsistências nas camadas. A extensão TabAntiWarping mostrou-se eficaz para retardar a impressão do perfil geométrico principal, mas ajustes adicionais, incluindo a adição de discos e a variação do offset, foram necessários para otimizar a aderência e a deposição de material. A correta parametrização dos fatores experimentais reduziu defeitos e melhorou a construção de paredes finas, destacando a importância de um controle preciso dos parâmetros de impressão para garantir a qualidade das peças. Este estudo contribui para a compreensão das interações entre os parâmetros de impressão e seus impactos na qualidade de componentes com paredes finas.

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura Aditiva; FFF, PLA-HT.

CONSTRUCTION OF THIN WALLS BY 3D PRINTING

ABSTRACT: This study explores the fabrication of thin walls using the 3D printing technique of Fused Filament Fabrication (FFF). The research focuses on analyzing the effects of critical parameters such as printing speed, printing temperature, and nozzle height relative to the print bed (offset) on the final quality of PLA-HT printed parts. Experiments were conducted with a 3D printer configured to test different combinations of these parameters, aiming to mitigate issues such as poor adhesion, stringing, and layer inconsistencies. The TabAntiWarping extension proved effective in delaying the printing of the main geometric profile, but additional adjustments, including the addition of discs and offset variation, were necessary to optimize adhesion and material deposition. Proper parameterization of the experimental factors reduced defects and improved thin wall construction, highlighting the importance of precise control over printing parameters to ensure part quality. This study contributes to the understanding of the interactions between printing parameters and their impacts on the quality of thin-walled components.

KEYWORDS: Additive Manufacturing; FFF; PLA-HT.

INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva é a produção de objetos por sobreposição de materiais a partir de modelos tridimensionais (Aniket e Vijay, 2022). Um exemplo de processo é a Fabricação por Filamento Fundido (FFF), no qual um filamento termoplástico é fundido e extrudado em camadas (Prakash et al., 2018). Impressoras FFF possuem uma base para deposição do material, um bico de extrusão, e o processo é controlado por parâmetros como temperatura e velocidade de impressão, os quais influenciam na qualidade da peça (Saptaji et al., 2023). Embora a técnica possa resultar em deposições irregulares (Srinivasan et al., 2021), oferece alto acabamento, baixo custo, flexibilidade, e ausência de resíduos (Jandyal et al., 2022). Os materiais poliméricos usados, como ABS e PLA, precisam ter alta resistência, baixa taxa de retração e serem ambientalmente amigáveis (Zhang et al., 2021). O PLA e o ABS dominam 95% do mercado (Kristiawan et al., 2021).

Componentes com paredes finas são vantajosos por reduzirem custos de produção, consumo de recursos e aumentarem a eficiência dos sistemas de engenharia, sendo utilizados nas indústrias onde são exigidos peso reduzido, alta precisão e ergonomia (Dejene et al., 2023). No entanto, na fabricação de paredes finas, as restrições dos processos de produção, como a qualidade e confiabilidade, são preocupações significativas, especialmente para peças com geometrias complexas e tolerâncias dimensionais rigorosas (Dejene et al., 2023). Um desafio contínuo é a gestão dos parâmetros de impressão na FFF. Os parâmetros de retração, temperatura de extrusão, distância e velocidade de percurso precisam ser avaliadas para evitar problemas como strings e oozing, sendo fios e fluxo de fios respectivamente, causados pela alta temperatura de impressão. A falta de análise desses parâmetros pode levar a complicações no processo de fabricação (Jackson et al., 2022).

MATERIAL E MÉTODOS

As amostras foram impressas utilizando uma impressora Kywoo3D, modelo Tycoon Max, com capacidade de impressão de 300 mm x 300 mm x 230 mm e precisão de $\pm 0,1$ mm, utilizando um bico de impressão com diâmetro de 0,2 mm. O material empregado na impressão dos corpos de prova foi o PLA de alta temperatura (PLA-HT). Durante as impressões, foram analisados os seguintes parâmetros: perfil geométrico, velocidade de impressão, temperatura de impressão e orientações na mesa de impressão.

Por meio do Design de Experimentos (DOE), foi definida a quantidade de peças e variações de impressão, totalizando 18 peças com diferentes configurações. A modelagem dessas peças foi realizada no software Autodesk Inventor®, utilizado para criar modelos 3D que foram posteriormente fatiados com o auxílio do software Ultimaker Cura®, onde também foram especificados os parâmetros de impressão. No total, foram impressas 18 amostras efetivas.

A seleção do perfil geométrico, destacada na Figura 1, visa analisar as interferências que os parâmetros da Tabela 1 podem causar na fabricação de paredes finas ao se operar com essas formas. Além disso, busca-se avaliar o movimento de impressão em zigue-zague, permitindo uma análise mais detalhada tanto dos parâmetros quanto do comportamento do movimento.

Portanto, uma análise detalhada desses parâmetros é essencial para identificar os fatores que comprometem a construção de paredes finas com base nesses formatos. Inicialmente, os parâmetros fixos considerados foram: velocidade de percurso de 150 mm/s, preenchimento e velocidade de refrigeração de 100%, alinhamento da costura em Z no canto mais agudo, padrão superior/interior sem retração, padrão de preenchimento em linhas, temperatura da mesa a 60 °C, velocidade de retração de 25 mm/s, diâmetro do bico de impressão 0.2 mm, altura de camada de 0.1 mm e orientação de impressão de 45° em relação à mesa, além das variáveis descritas na Tabela 1. Após essa definição, foi necessário preparar o ambiente, incluindo o controle da temperatura da sala, a colocação do filamento no suporte correspondente e sua conexão com o bico de impressão, além da limpeza da mesa de impressão para garantir a aderência das peças.

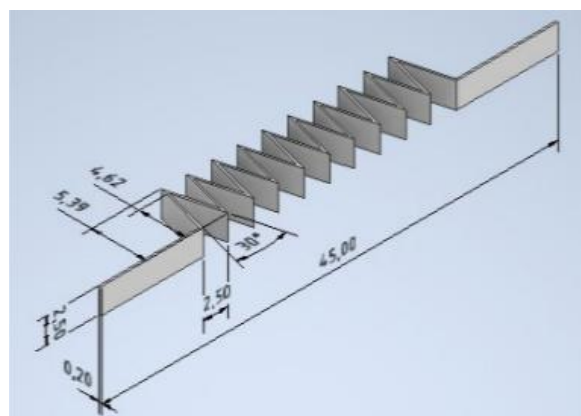


FIGURA 1. Modelo da peça construída no Inventor com espessura de 0.2 mm.

TABELA 1. Material e parâmetros de controle

Fatores de controle	Níveis
Material	PLA-HT
Perfil geométrico	Triângulo
Velocidade de impressão (mm/s)	30, 60 e 90
Temperaturas de impressão (° C)	200 e 240

Durante os procedimentos de impressão, foi necessário substituir o bico de impressão, o que exigiu o ajuste do parâmetro de offset. Esse processo envolve a regulação da distância entre o bico de impressão e a mesa de impressão, sendo um procedimento fundamental que afeta diretamente a qualidade da primeira camada. Uma distância maior entre o bico e a mesa pode resultar em falta de adesão da primeira camada, além de problemas como stringing (formação de fios ou teias de filamento) e oozing (vazamento de filamento), que podem solidificar em outras áreas e causar o deslocamento das peças impressas. Por outro lado, uma distância menor pode melhorar a deposição do material e a aderência das peças, além de reduzir o stringing e o oozing. Contudo, considerar uma distância apropriada, de modo que, essa distância não afete as deposições, ou seja, o bico não arrastar o material depositado e prejudicar os componentes ou senão interromper a sua fabricação. A Figura 2 ilustra um exemplo de ajuste adequado, onde é possível observar a ausência ou quase ausência de fios dispersos.



FIGURA 2. Amostra impressa à 200 °C, 90 mm/s, orientação 45° com espessura de 0.2 mm.

As velocidades de impressão de 30, 60 e 90 mm/s correspondem à velocidade com a qual o bico de impressão se movimenta para formar a peça ilustrada na Figura 1 enquanto o filamento é fundido. Além dessas, há outras duas velocidades importantes: a velocidade de percurso e a velocidade de retração. A velocidade de percurso refere-se à rapidez com que o bico retorna à posição inicial, conforme ilustrado na Figura 3. Esse movimento faz parte do ciclo que começa na extremidade direita e termina na esquerda, correspondendo à conclusão de uma camada e ao início de outra. Portanto, a velocidade de percurso determina a rapidez com que esse movimento de retorno é realizado após a conclusão de uma camada, repetindo-se até a finalização da peça. Por sua vez, a velocidade de retração refere-se à rapidez com que o filamento é puxado em Z pela extrusora, permitindo um fluxo controlado de material. Tanto

a velocidade de percurso quanto a de retração desempenham papéis cruciais na redução de problemas como stringing e oozing.

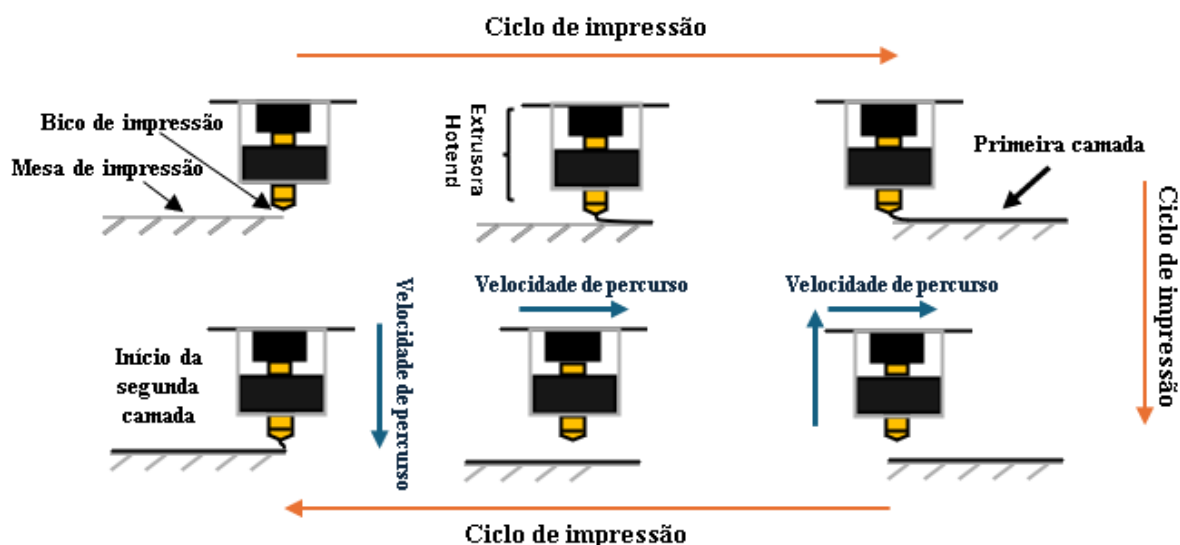


FIGURA 3. Ciclo de formação da primeira camada e início da segunda camada.

Após a conclusão das 18 amostras, foi realizado um registro fotográfico utilizando o projetor de perfil de bancada da marca Starrett, modelo VB300. O uso desse equipamento permitiu uma análise mais detalhada das ocorrências de formação de teias e vazamento de filamentos, conforme ilustrado na Figura 4, sendo a mesma amostra da Figura 2. As visualizações tornaram-se mais nítidas devido à observação do perfil e à lente de aproximação de 10x, que possibilitou identificar filamentos que antes não eram claramente visíveis.

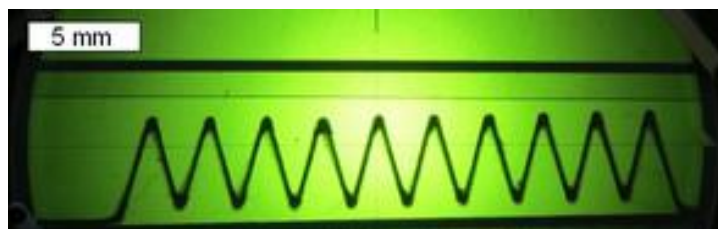


FIGURA 4. Fotografia mais detalhada para análise e caracterização.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante os processos de impressão foi observado que o tempo de fusão do filamento, em função da temperatura do bico, era insuficiente para acompanhar a velocidade de impressão, resultando em deposições inadequadas do material fundido, apesar das extrusões iniciais. Para mitigar esse problema, foi implementada a extensão TabAntiWarping do software de fatiamento, a qual cria discos com diâmetros ajustáveis, auxiliando na economia de material e no tempo de impressão. No entanto, nesse caso específico, os discos foram utilizados para postergar a impressão do perfil geométrico principal, funcionando como um modelo normal em vez de suporte. Um disco com 15 mm de diâmetro foi incluído em uma das extremidades de cada peça fatiada, conforme apresentado na Figura 2. Ainda assim, a quantidade inicial de discos foi insuficiente, exigindo a inclusão de dois discos sobrepostos com o mesmo diâmetro para colaborar com o tempo de fusão do filamento. Essa necessidade foi identificada porque o primeiro disco não estava sendo formado corretamente devido à falta de filamento fundido. A escolha da extremidade de início precisou ser feita conforme o percurso definido no software de fatiamento, começando pela formação completa dos discos e, por fim, pela conclusão da peça triangular. Após a inclusão dos discos, houve uma melhora na deposição do material fundido. No entanto, surgiram problemas relacionados ao stringing e oozing durante as impressões, exigindo a habilitação dos

parâmetros de retração e o ajuste adequado da velocidade de percurso. A retração foi ativada para evitar deposições indesejadas, reduzindo as ocorrências de stringing e oozing e minimizando o acúmulo de material no bico de impressão durante a construção das camadas.

Identificou-se, então, uma correlação crítica entre os parâmetros de retração e a qualidade geométrica. De modo que a velocidade de percurso, inicialmente ajustada para 150 mm/s fosse reduzida para 120 mm/s, resultando em uma melhora significativa na contenção dos problemas de impressão. Vale destacar que a velocidade de retração foi mantida no valor padrão do software de fatiamento (25 mm/s). Apesar das modificações, a falta de adesão do filamento fundido à mesa ainda foi observada. Isso levou à inclusão de mais discos nas extremidades das peças para aumentar o fluxo inicial de filamento, mas essas alterações não resultaram em melhorias significativas.

Diante disso, surgiu a necessidade de ajustar o offset, com valores variando entre -1.635 e -1.700, o que resultou em melhorias nas deposições. Contudo, ao fabricar a amostra da Figura 3, o problema de aderência retornou, necessitando um novo ajuste para -1.678. Mesmo assim, os problemas de aderência continuaram levando a ajustes progressivos nos valores de offset, começando em -1.710 e passando por -1.730, -1.750 e -1.785, até que o valor de -1.795 foi finalmente adotado para todas as amostras. Esse ajuste resultou na construção de camadas mais finas e aderentes, reduzindo falhas e buracos entre as camadas. Essas melhorias são visíveis na Figura 2, que demonstra uma redução considerável de stringing, além da formação do perfil geométrico.

Os parâmetros de velocidade de impressão e temperatura de impressão estão correlacionados ao filamento, de modo que uma maior temperatura colabora com um fluxo maior de filamento fundido, enquanto uma maior velocidade de impressão ajuda a reduzir deposições em excesso em determinadas áreas, como arestas ou vértices. Suas configurações são fundamentais para garantir a adesão das primeiras camadas, embora complicadas pelos relatos anteriores. Em temperaturas de impressão menores e alta velocidade de impressão, o material não se funde adequadamente para formar as primeiras camadas dos componentes. Esse problema foi frequentemente encontrado nas peças a 200 °C e velocidades de 90 e 60 mm/s. No entanto, em temperaturas mais elevadas, essa dificuldade foi reduzida, embora ainda exigisse os ajustes de offset e a inclusão dos discos como parte da peça. A Figura 5 explica melhor a relação entre velocidade e temperatura na construção de paredes finas, ao analisar as ocorrências de stringing. Observe-se em B, C, E e F, na Figura 5, a presença de stringing, que pode ter surgido devido à velocidade de impressão. Ao comparar as temperaturas, percebe-se que há menos ocorrências nas peças a 240 °C. Os stringings estão mais localizados nos vértices dos triângulos, justamente na troca de movimento entre vértices e arestas. Além disso, devido ao maior fluxo de material a 240 °C, esses fios de filamento tornam-se mais nítidos e volumosos à medida que a temperatura de impressão é elevada, conforme ilustrado na Figura 5 (F).

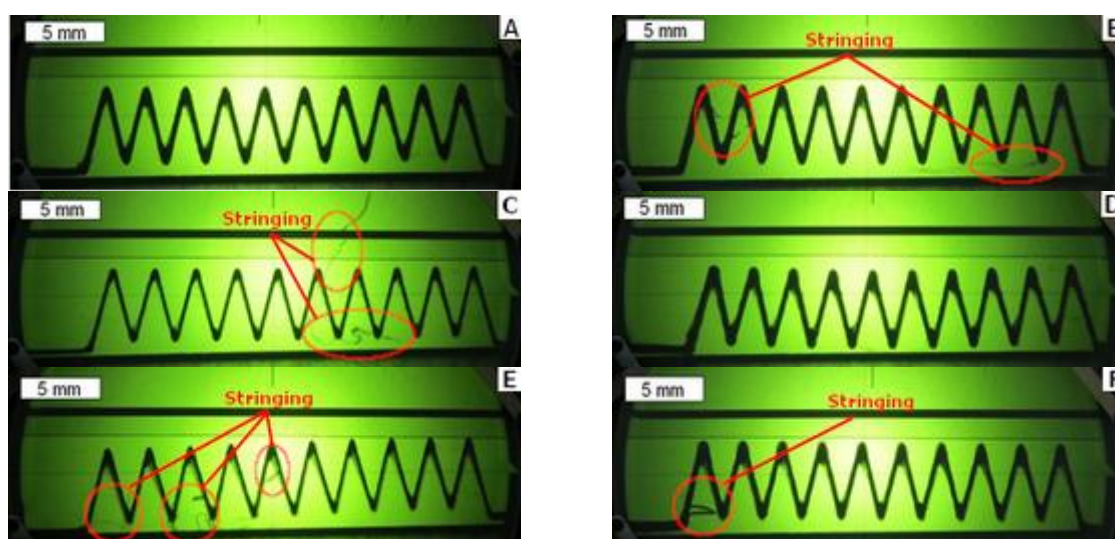


FIGURA 5. Comparação de peças com temperatura e velocidades distintas. A) 200 °C e 30 mm/s e B) 240 °C e 30 mm/s, C) 200 °C e 60 mm/s e D) 240 °C e 60 mm/s, E) 200 °C e 90 mm/s e F) 240 °C e 90 mm/s. Todas na orientação XY (45 °) em relação a mesa de impressão e bico de impressão de 0.2 mm.

CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que a construção de paredes finas por meio da impressão 3D é um processo complexo que requer a análise de diversos parâmetros, os quais influenciam diretamente a qualidade dos componentes fabricados. Os resultados evidenciam como esses parâmetros podem tanto mitigar quanto exacerbar problemas comuns na Fabricação por Filamento Fundido (FFF), como adesão inadequada, presença de stringing e oozing, além da formação inconsistente das camadas por conta das altas velocidades e baixas temperaturas. A relevância dos resultados está em destacar a importância de cada ajuste, uma vez que alterações podem comprometer o estado final das peças, essa etapa pode ser bastante esclarecida ao analisar as alterações quanto o manuseamento do offset, conforme destacado nos resultados. Portanto, considerando essas informações, acredita-se que os parâmetros ideais para fabricar paredes finas devem possuir as seguintes configurações: 200 °C, 30 mm/s, orientação de 45° senão 240 °C, 60 mm/s, orientação de 45° e bico de impressão de 0,2 mm, além de incluir as demais ferramentas, conforme discutido nesta pesquisa esses parâmetros são decididos por conta da Figura 5, devido as ausências de fios e a força definida da geometria triangular. Além disso, este estudo abre caminho para novas investigações sobre o processo de fabricação de paredes finas, enfatizando a importância de se aprofundar na acurácia geométrica, o que envolve o estudo da precisão, repetibilidade e a compreensão das irregularidades nos perfis geométricos.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

W. B. S, K. S. T., C. L. F. A e G. M. R. contribuíram com a curadoria, análise dos dados e procederam com a metodologia e experimentos. W. B. S. atuou na redação do trabalho. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as empresas 3DX Filamentos Ltda e Topink3D Impressoras e Suprimentos Ltda pelo apoio a pesquisa e ao Instituto Federal de São Paulo pela bolsa de iniciação científica PIBIFSP.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR-DUQUE, Julián Israel; GARCÍA-ALCARAZ, Jorge Luis; HERNÁNDEZ-ARELLANO, Juan Luis. Geometric considerations for the 3D printing of components using fused filament fabrication. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 109, n. 1, p. 171-186, 2020.
- DEJENE, N. D.; LEMU, H. G.; GUTEMA, E. M. Critical review of comparative study of selective laser melting and investment casting for thin-walled parts. **Materials**, MDPI, v. 16, n. 23, p. 7346, 2023.
- JACKSON, Brandon; FOULADI, Kamran; ESLAMI, Babak. Multi-parameter optimization of 3D printing condition for enhanced quality and strength. **Polymers**, v. 14, n. 8, p. 1586, 2022.
- JADHAV, Aniket; JADHAV, Vijay S. A review on 3D printing: An additive manufacturing technology. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 2094-2099, 2022.
- JANDYAL, Anketa et al. 3D printing—A review of processes, materials and applications in industry 4.0. **Sustainable Operations and Computers**, v. 3, p. 33-42, 2022.
- KRISTIAWAN, Ruben Bayu et al. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. **Open Engineering**, v. 11, n. 1, p. 639-649, 2021.
- PRAKASH, K. Satish; NANCHARAIH, T.; RAO, VV Subba. Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 2, p. 3873-3882, 2018.
- SRINIVASAN, D. et al. 3D printing manufacturing techniques, materials, and applications: an overview. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2021, n. 1, p. 5756563, 2021.