

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

EFEITO DA VELOCIDADE E TEMPERATURA DE IMPRESSÃO NA QUALIDADE DE PEÇAS DE PLA IMPRESSAS EM 3D

KELVIN DOS S. TIENE¹, WESLEY B. DA SILVA², CLEITON L. F. DE ASSIS³

¹ Graduando em Bacharelado em Engenharia Elétrica, Bolsista FAPESP, IFSP, Câmpus Votuporanga, kelvin.tiene@aluno.ifsp.edu.br.

² Graduando em Bacharelado em Engenharia Elétrica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Votuporanga, w.barbosa@aluno.ifsp.edu.br

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

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

RESUMO: A qualidade geométrica refere-se à avaliação da exatidão e precisão de um produto em relação ao modelo projetado. No contexto da Manufatura Aditiva, os parâmetros de processo influenciam significativamente a qualidade das peças. Este estudo utilizou um PLA-HT (ácido polilático de alta temperatura) e seguiu a metodologia de Design de Experimentos (DoE) para avaliar o efeito da velocidade e temperatura de impressão na qualidade de peças impressas em 3D. Corpos de prova foram impressos com altura de camada de 0,1 mm, velocidades de 30 e 60 mm/s, e bico de 0,2 mm, temperaturas de 200 e 240 °C e em três direções da mesa de impressão: eixo X (0°), XY (45°), e Y (90°). A avaliação geométrica qualitativa foi realizada com base na análise de retitude e paralelismo de amostras fotografadas. Um código em Python foi utilizado para transformar as imagens em gráficos. A elevação da temperatura aumentou a espessura das paredes, mas melhorou as características geométricas nas direções XY e Y a 30 mm/s. A impressão no eixo X revelou maior regularidade geométrica. A análise do efeito da velocidade de impressão nas amostras impressas a 200°C e direção XY revelou melhora das características geométricas. A otimização dos parâmetros pode ser alcançada com temperatura de impressão de 200 °C e velocidade de impressão de 60 mm/s, na direção X, proporcionando qualidade geométrica as peças.

PALAVRAS-CHAVE: parâmetros-de-impressão; projetor-de-perfil; retitude; paralelismo.

EFFECT OF PRINTING SPEED AND TEMPERATURE ON THE QUALITY OF 3D PRINTED PLA PARTS

ABSTRACT: Geometric quality refers to the assessment of a product's accuracy and precision in relation to the designed three-dimensional model. In the context of fused filament fabrication (FFF), process parameters significantly influence the quality of the printed parts. This study utilized PLA-HT (high-temperature polylactic acid) and followed the Design of Experiments (DoE) methodology to evaluate the effect of printing speed and temperature on the quality of 3D printed parts. Specimens were printed with a 0.1 mm layer height, speeds of 30 and 60 mm/s, and a 0.2 mm nozzle at 200 and 240 °C, in three print bed directions: X-axis (0°), XY (45°), and Y (90°). Qualitative geometric evaluation was performed based on the analysis of straightness and parallelism of photographed samples. A Python code was used to transform the images into graphs. Increasing the temperature resulted in thicker walls but improved geometric characteristics in the XY and Y directions at 30 mm/s. Printing along the X-axis revealed greater geometric regularity. The analysis of the effect of printing speed on samples printed at 200°C and in the XY direction showed an improvement in straightness and parallelism characteristics. The variation in printing speed did not result in visual geometric differences in the printed samples. Optimization of the parameters can be achieved with a printing temperature of 200°C and a printing speed of 60 mm/s in the X direction, providing geometric quality to the parts.

KEYWORDS: printing-parameters; profile-projector; straightness; parallelism.

INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, é um método de construção de formas complexas em camadas a partir de dados de modelos 3D, utilizando uma ampla gama de materiais, o que permite alta precisão e rapidez em comparação com métodos convencionais de fabricação (Mallikarjuna *et al.*, 2023; Mohanty *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2024). O método mais popular, chamado de Fabricação por Filamento Fundido (FFF), envolve a fusão, extrusão e deposição de filamentos termoplásticos (Awasthi e Banerjee, 2021; Rajan *et al.*, 2022; Siemiński, 2021), como o ácido polilático (PLA), um polímero renovável e biodegradável amplamente utilizado devido à sua biocompatibilidade e atoxicidade, podendo substituir a utilização de polímeros à base de petróleo (Liu *et al.*, 2019; Mallikarjuna *et al.*, 2023; Samykano *et al.*, 2024).

A qualidade geométrica, ou acurácia dimensional, refere-se à avaliação da exatidão e precisão de um produto em comparação com o modelo tridimensional desejado (Hanon *et al.*, 2021). Esse aspecto é essencial para determinar a confiabilidade da impressora 3D na produção de objetos de acordo com os resultados esperados (Hanon *et al.*, 2021), representando um elemento crítico no controle de qualidade da manufatura aditiva (Buswell *et al.*, 2022). No contexto da tecnologia de FFF, a determinação dos parâmetros de processo influencia significativamente a qualidade das peças impressas por FFF (Cappellini *et al.*, 2022; Elkaseer *et al.*, 2020; Buj-Corral *et al.*, 2021).

Nesse sentido, faz-se necessário compreender o efeito da velocidade e temperatura de impressão na qualidade geométrica de peças impressas por FFF, proporcionando otimizar o processo de impressão e obter resultados de alta qualidade.

MATERIAL E MÉTODOS

A técnica de impressão dos corpos de prova foi a Fabricação por Filamento Fundido (FFF). A impressora 3D foi fornecida pela empresa Topink3D Ltda, visando pesquisas de desenvolvimento e inovação tecnológica. O equipamento é da marca Kywood3D, modelo Tycoon Max, com eixo linear. O volume útil de impressão é de 300 mm x 300 mm x 230 mm. A velocidade máxima de impressão é de 100 mm/s e de deslocamento de 150 mm/s. O diâmetro de filamento do material é de 1,75 mm. A temperatura máxima do bico de impressão é de 260 °C. A mesa de impressão é de alumínio aquecida, com tampo de vidro temperado (até 110 °C), nivelamento automático e detecção de fim de filamento. O gabinete da impressora é aberto, sendo adequado para o trabalho com polímeros de baixa retração térmica. O software de fatiamento utilizado foi o Ultimaker Cura® de código aberto.

O material polimérico utilizado para a fabricação dos corpos de prova foi o PLA-HT (ácido polilático de alta temperatura), fornecido pela empresa 3DX Filamentos Ltda. Foram impressos três corpos de prova para cada condição experimental, visando uma avaliação geométrica qualitativa posterior.

A matriz experimental foi desenvolvida com base na metodologia de Design de Experimentos (DoE), uma ferramenta estatística que permite a criação de um plano de experimentação eficiente, considerando as combinações de fatores de controle e seus níveis. Essa matriz proporcionou um roteiro estruturado para os experimentos, otimizando a coleta de dados e garantindo a robustez dos resultados.

Os corpos de prova foram impressos com alturas de camada de 0,1 mm, velocidades de 30 e 60 mm/s e bico com diâmetro de 0,2 mm. As temperaturas de impressão utilizadas foram de 200 e 240 °C. As amostras foram impressas em três direções em relação aos eixos da mesa, na direção do eixo X (0°), entre os eixos na direção XY (45°) e na direção do eixo Y (90°). A matriz fatorial gerou as combinações entre os níveis dos fatores de controle. A Figura 1 apresenta o modelo 3D dos corpos de prova impressos com bico de 0,2 mm. Foi determinada a geometria de parede fina quadrada, com largura correspondente ao diâmetro do bico de impressão, para a análise qualitativa do efeito dos parâmetros de impressão nos desvios geométricos das peças. O propósito foi provocar deliberadamente mudanças abruptas na direção de deslocamento do bico de impressão, acionando os eixos separadamente e/ou conjuntamente durante o processo de impressão.

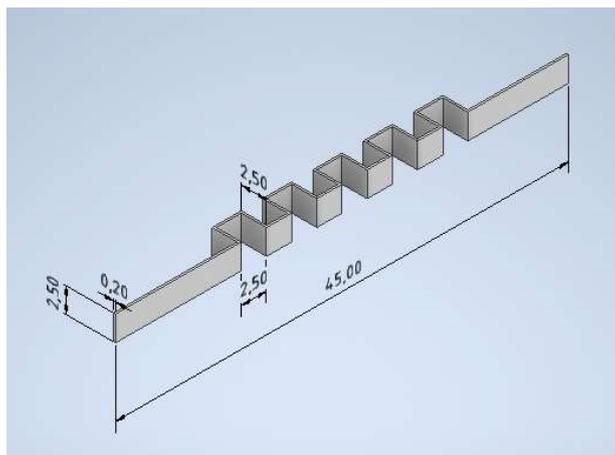


FIGURA 1. Modelo em 3D dos corpos de prova.

A avaliação geométrica qualitativa baseou-se na análise dos desvios de forma, como retitude e paralelismo, das amostras visualizadas em perfil superior. Utilizando um projetor de perfil vertical de bancada, marca Starrett, modelo VB300, equipado com uma lente de ampliação de 10 vezes e uma escala para calcular a relação de pixels da imagem com o tamanho real, foi possível visualizar o perfil superior das amostras e capturar imagens de alta qualidade com uma câmera fotográfica, conforme ilustrado na Figura 2.

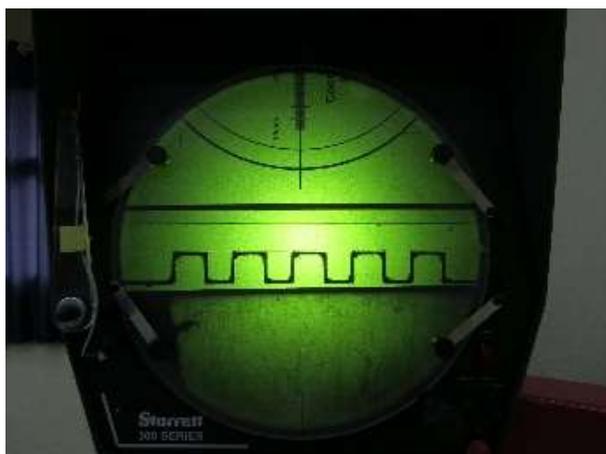


FIGURA 2. Fotografia com auxílio do projetor de perfil e escala.

Posteriormente, as imagens foram devidamente recortadas e editadas com auxílio do software de código aberto ImageJ, aplicando o filtro Unsharp Mask nas fotografias para possibilitar maior distinção da peça com o fundo, como pode ser observado na Figura 3.



FIGURA 3. Representação das fotografias editadas com auxílio do software ImageJ.

Com base nas imagens recortadas e editadas, juntamente com a relação de pixels com a escala real das amostras, um código desenvolvido em Python foi utilizado para transformar as fotografias em gráficos. Nesse contexto, as formas ideais de cada figura foram plotadas sobre a forma real impressa em 3D, permitindo uma análise qualitativa do efeito dos diferentes parâmetros de impressão nos erros de forma. A Figura 4 ilustra um exemplo dos gráficos gerados.

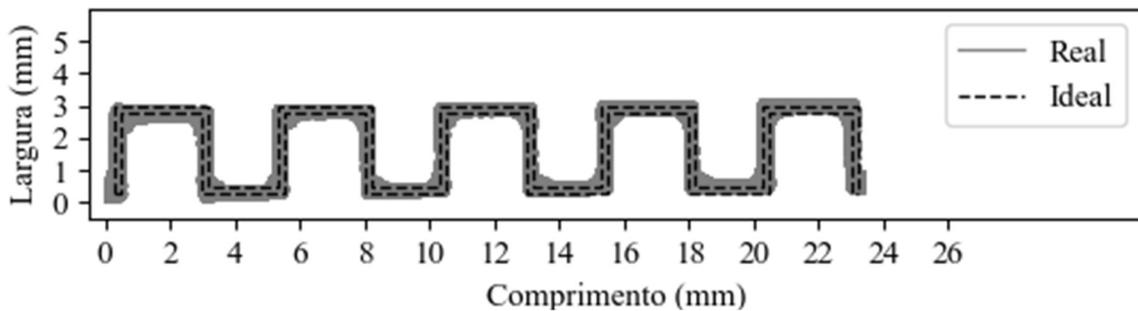


FIGURA 4. Representação gráfica e sobreposição dos gráficos gerados com auxílio do programa em Python.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando a visualização e compreensão dos erros de forma das amostras impressas, os gráficos apresentaram apenas uma seção representativa de perfil quadrado dentre os cinco perfis produzidas em cada peça, conforme apresentado anteriormente na Figura 4.

As Figuras 5 e 6 apresentam o efeito do aumento da temperatura de impressão, considerando diferentes direções de impressão, em amostras fabricadas com velocidade de impressão de 30 mm/s e 60 mm/s, respectivamente. A análise visual do efeito do aumento da temperatura de impressão revelou um aumento da espessura das paredes impressas no eixo Y e intensificado no eixo XY. Além disso, houve melhora qualitativa das características geométricas de retidão e paralelismo das paredes. Os efeitos podem ser explicados pelo aumento da fluidez do material sob altas temperaturas, permitindo que o material seja depositado de maneira mais uniforme (Behdani *et al.*, 2020). As amostras impressas na direção do eixo X apresentaram maior regularidade nas características geométricas em comparação as demais direções de impressão. A impressão nas direções Y e XY foi mais suscetível ao acúmulo de material nos vértices, além de ondulações devido a vibrações durante a troca de direção, demonstrando aumento das características de erro de forma ao se aproximar da direção de impressão do eixo Y. Isso sugere que, a combinação de movimentos do bico de impressão e da mesa aquecida, dependendo da direção de impressão, causou maiores vibrações, proporcionando maior dificuldade para a impressão manter a forma ideal por conta dos movimentos abruptos.

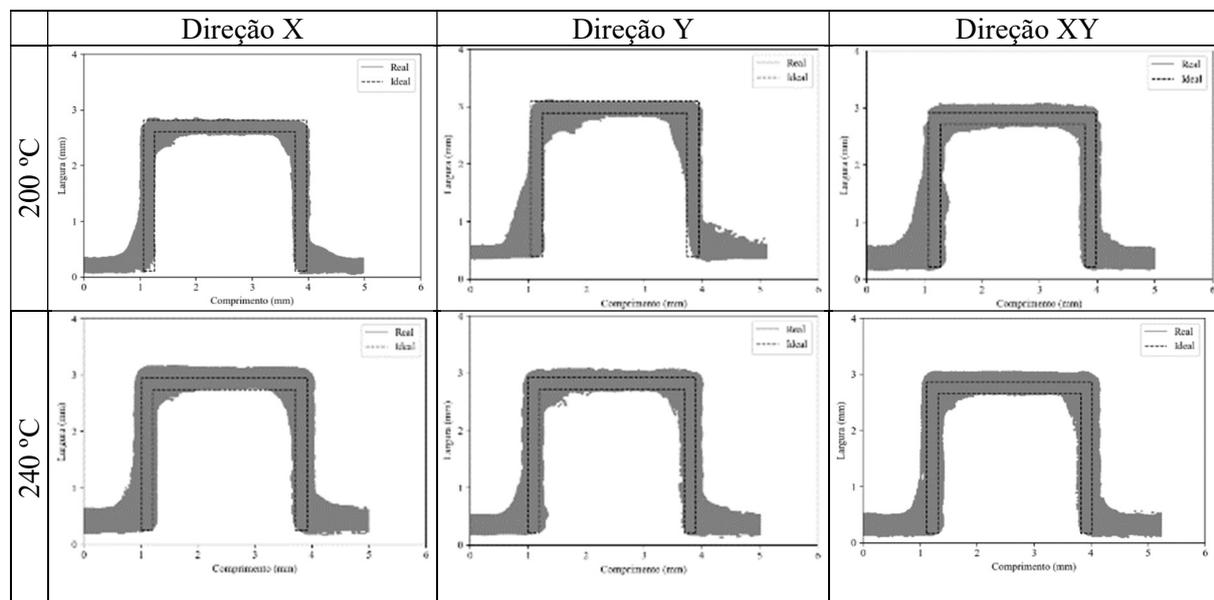


FIGURA 5. Influência da temperatura de impressão e direção de impressão nas características geométricas de amostras impressas em 3D com velocidade de 30 mm/s.

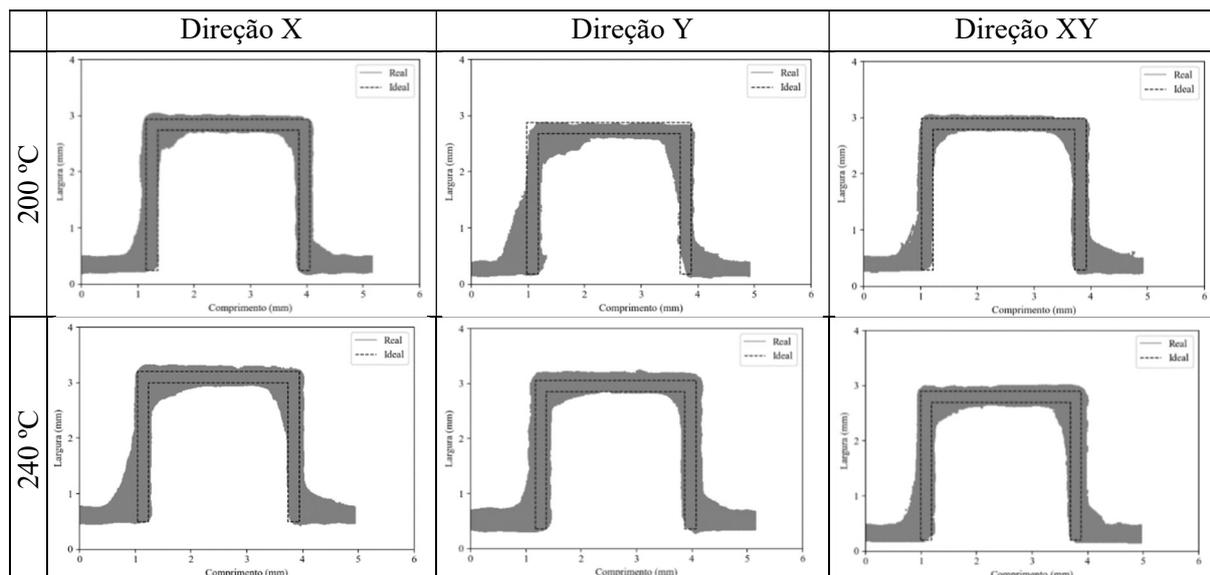


FIGURA 6. Influência da temperatura de impressão e direção de impressão nas características geométricas de amostras impressas em 3D com velocidade de 60 mm/s.

A partir da comparação entre a Figura 5 e a Figura 6 é possível constatar que o efeito do aumento da velocidade de impressão nas amostras com temperatura de impressão de 200°C e direção de impressão XY revelou uma redução das ondulações provocadas pelas vibrações indesejadas e uma redução do acúmulo de material nos vértices, melhorando as características de retitude e paralelismo. Por outro lado, o aumento da velocidade de impressão não resultou em diferenças perceptíveis para as outras direções de impressão, independente da temperatura de impressão.

CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi avaliar qualitativamente o impacto dos parâmetros de impressão, como temperatura, velocidade e direção de impressão nas características geométricas de amostras de paredes finas de perfil quadrado. Qualitativamente foram avaliados os erros de forma, como retitude e paralelismo. A análise visual demonstra que o aumento da temperatura de extrusão resultou em um aumento na espessura das paredes, especialmente nas direções de impressão XY e Y. Além disso, as características geométricas de retidão e paralelismo das paredes foram qualitativamente aprimoradas com o aumento da temperatura, indicando uma deposição mais uniforme do material devido à maior fluidez em temperaturas mais elevadas. Observou-se que as amostras impressas na direção do eixo X apresentaram maior regularidade geométrica em comparação com as impressas nas direções XY e Y, pois foram mais propensas a erros de forma, como acúmulo de material nos vértices e ondulações causadas por vibrações durante as trocas de direção. Ao comparar as diferentes velocidades de impressão, para as direções X e Y, o aumento da velocidade não gerou diferenças perceptíveis, independentemente da temperatura de extrusão. A otimização dos parâmetros de impressão pode ser alcançada aplicando uma temperatura de impressão de 200 °C, velocidade de impressão de 60 mm/s e direção do eixo X, proporcionando menos consumo energético, maior velocidade de produção e melhor adequação da utilização dos eixos de impressão para geometria de paredes finas de perfil quadrado.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

K. S. T., W. B. S. e C. L. F. A. contribuíram com a curadoria e análise dos dados. K. S. T. e W. B. S. procederam com a metodologia e experimentos. K. S. T. 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 a FAPESP (2023/17666-3) pela bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

Behdani, Behrouz *et al.* Numerical study on the temperature-dependent viscosity effect on the strand shape in extrusion-based additive manufacturing. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 4, n. 2, p. 46, 2020.

Mallikarjuna, B. *et al.* A review on the melt extrusion-based fused deposition modeling (FDM): background, materials, process parameters and military applications. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, p. 1-15, 2023.

Mohanty, Amar K. *et al.* Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations. **Science**, v. 362, n. 6414, p. 536-542, 2018.

Kumar, Sudhir *et al.* A comprehensive review of FDM printing in sensor applications: Advancements and future perspectives. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 113, p. 152-170, 2024.

Awasthi, Pratiksha; Banerjee, Shib Shankar. Fused deposition modeling of thermoplastic elastomeric materials: Challenges and opportunities. **Additive Manufacturing**, v. 46, p. 102177, 2021.

Rajan, K. *et al.* Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-40, 2022.

Siemiński, Przemysław. Introduction to fused deposition modeling. In: Additive Manufacturing. **Elsevier**, p. 217-275, 2021.

Liu, Zengguang *et al.* A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, p. 2877-2889, 2019.

Samykan, Mahendran *et al.* An overview of fused filament fabrication technology and the advancement in PLA-biocomposites. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-36, 2024.

Hanon, Muammel M.; Zsidai, László; Ma, Qianjin. Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors. **Materials Today: Proceedings**, v. 42, p. 3089-3096, 2021.

Buswell, Richard *et al.* Geometric quality assurance for 3D concrete printing and hybrid construction manufacturing using a standardised test part for benchmarking capability. **Cement and Concrete Research**, v. 156, p. 106773, 2022.