

ANÁLISE EXPERIMENTAL MULTIPARAMÉTRICA DE FADIGA PARA CORPOS DE PROVA DE PLA IMPRESSOS POR MANUFATURA ADITIVA / MULTIPARAMETRIC EXPERIMENTAL FATIGUE ANALYSIS FOR PLA TEST SPECIMENS PRINTED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Rafael Meyer¹, Raphael Fortes Marcomini²

¹Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil — rafael.meyer@estudante.ufjf.br

²Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil – raphael.marcomini@ufjf.br

Recebido em: 02/12/2025 | Aprovado em: 22/01/2026 | Publicado em: 03/02/2026

Resumo / Abstract

Este estudo apresenta uma análise experimental multiparamétrica da resistência à fadiga em corpos de prova fabricados por Modelagem por Deposição Fundida (FDM) utilizando PLA. Sete parâmetros de impressão — velocidade de deposição, temperatura da cama, temperatura do bico, altura de camada, padrão de preenchimento, espessura da parede e porcentagem de preenchimento — foram avaliados por meio do método Plackett-Burman, permitindo quantificar a influência individual de cada variável na vida em fadiga. Os ensaios foram realizados em flexão rotativa, sob carga fixa de $1,5 \pm 0,1$ N, frequência de 20 ± 1 Hz e tensão alternada na faixa de $\sigma = (2,8 \pm 0,1)$ MPa. Os resultados mostram que a espessura da parede é o parâmetro mais influente, aumentando a vida em fadiga em +3430 ciclos quando elevada de 0,8 mm para 2,0 mm. Em seguida, destacam-se a porcentagem de preenchimento (efeito -2586 ciclos, favorecendo 10%) e a velocidade de deposição (efeito +2026 ciclos, favorecendo 80 mm/s). Temperaturas inferiores do bico (205 °C) e da mesa (65 °C) e menor altura de camada (0,12 mm) também contribuíram para melhorar o desempenho ao reduzir tensões residuais e rugosidade superficial. A configuração otimizada atingiu 9485 ciclos, enquanto a pior apresentou apenas 11 ciclos, caracterizando falha catastrófica. Os resultados demonstram que a resistência à fadiga em peças FDM é fortemente governada pelo gerenciamento térmico e pela integridade superficial, fornecendo diretrizes essenciais para otimização de componentes impressos em 3D submetidos a carregamentos cíclicos.

Palavras-chave: manufatura aditiva; FDM; fadiga; PLA; análise multiparamétrica; planejamento Plackett-Burman; parâmetros de impressão.

This study presents a multiparametric experimental analysis of fatigue resistance in specimens manufactured by additive manufacturing (FDM) using PLA. Seven printing parameters—deposition speed, bed temperature, nozzle temperature, layer height, infill pattern, wall thickness, and infill percentage—were evaluated using the Plackett-Burman method, allowing the individual influence of each variable on fatigue life to be quantified. The tests were performed in rotating flexure under a fixed load of 1.5 ± 0.1 N, a frequency of 20 ± 1 Hz, and an alternating stress in the range of 2.8 MPa. The results show that wall thickness is the most influential parameter, increasing fatigue life by +3430 cycles when increased from 0.8 mm to 2.0 mm. Next, the fill percentage (effect -2586 cycles, favoring 10%) and deposition speed (effect +2026 cycles, favoring 80 mm/s) stand out. Lower nozzle (205 °C) and table (65 °C) temperatures and lower layer height (0.12 mm) also contributed to improved

performance by reducing residual stresses and surface roughness. The optimized configuration achieved 9485 cycles, while the worst performed only 11 cycles, characterizing catastrophic failure. The results demonstrate that fatigue resistance in FDM parts is strongly governed by thermal management and surface integrity, providing essential guidelines for optimizing 3D-printed components subjected to cyclic loading.

Keywords: additive manufacturing; FDM; fatigue; PLA; multiparametric analysis; Plackett-Burman planning; printing parameters.

1. Introdução / Introduction

No universo da engenharia e do projeto de equipamentos, a durabilidade e a confiabilidade dos componentes são fatores cruciais. Ao estudar os fenômenos relacionados à falha mecânica, é notável a predominância da fadiga, sendo ela responsável por cerca de 80 a 90% dos casos de falhas críticas (Callister, 2016). A fadiga define-se como um fenômeno de deterioração progressiva e localizada que ocorre em materiais submetidos a carregamentos cíclicos, culminando na falha após um número considerável de ciclos de tensão (Callister, 2016). Diferente da falha por sobrecarga estática, a fadiga se manifesta em níveis de tensão consideravelmente inferiores à tensão de escoamento do material (Callister, 2016). Seu processo é intrinsecamente ligado à iniciação e propagação de trincas microscópicas, que, ao longo do tempo, coalescem e crescem até que a área remanescente do material não seja mais capaz de suportar a carga aplicada, levando a uma fratura súbita e catastrófica. A natureza multifacetada da fadiga exige uma compreensão aprofundada de seus mecanismos, que são influenciados por uma variedade de fatores, incluindo a amplitude e frequência do carregamento, a geometria do componente, o acabamento superficial e as propriedades metalúrgicas do material (Norton, 2017). O estudo da fadiga é de fundamental importância para a engenharia mecânica, pois permite o desenvolvimento de metodologias de projeto que visam garantir a longevidade e a segurança dos componentes, utilizando conceitos como a curva S-N e a mecânica da fratura (Norton, 2017).

Paralelamente à importância do estudo da fadiga, a Manufatura Aditiva (MA), com o processo mais conhecido sendo a impressão 3D, emergiu como um foco central de pesquisa e aplicação industrial devido à flexibilidade de design que oferece (Goh; Agarwala; Goh; Dikshit; Sing, 2017). Tecnologias como a Modelagem por Deposição Fundida (FDM) (Horasan, 2024), um dos métodos mais comuns para polímeros termoplásticos (Sing; Yeong, 2021), têm sido amplamente adotadas em diversos setores, incluindo aeroespacial, automotivo e biomédico (Srivastava, 2022). No entanto, a utilização segura e otimizada de peças fabricadas por FDM em aplicações sujeitas a carregamentos cíclicos – como em veículos aéreos não tripulados e na indústria automotiva – exige um entendimento aprofundado de suas propriedades mecânicas, especialmente sob condições de fadiga (Rhadika,

2024). A natureza de MA introduz um conjunto significativo de parâmetros de impressão (como espessura de camada, velocidade de impressão, temperatura de impressão e outros) que podem causar alterações substanciais e ainda não totalmente mapeadas nas propriedades mecânicas das peças finais (Montero; Roundy; Odell; Ahn; Wright, 2001) (Onwubolu; Rayegani, 2014). Embora existam numerosos estudos sobre o comportamento mecânico de peças FDM sob cargas estáticas (Morettini; Palmieri; Capponi; Landi; 2022) (Nabavi-Kivi; Ayatollahi; Schmauder; Khosravani, 2023), há uma lacuna notável na literatura em relação à influência desses parâmetros no comportamento sob fadiga (Morettini; Razavi; Staffa, 2023). Investigar como a variação desses fatores de processo afeta a vida em fadiga é um tópico de pesquisa crucial para aumentar a usabilidade e confiabilidade de componentes impressos em 3D em ambientes de engenharia crítica.

Neste contexto, o presente trabalho se propõe a realizar uma avaliação experimental de fadiga para peças impressas em 3D. O foco será determinar a influência de diferentes parâmetros de impressão na vida em fadiga desses componentes. Para isso, foi utilizada a metodologia de Planejamento de Experimentos (DoE) de Placket-Burman (Luoma, 2007). Essa abordagem permite identificar de forma eficiente e otimizada os fatores de impressão mais significativos que impactam na resistência à fadiga do material.

Por fim, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a resistência à fadiga de peças impressas em 3D, investigando como diferentes parâmetros do processo de manufatura aditiva influenciam na sua durabilidade sob carregamento cíclico. Para atingir este objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os parâmetros de impressão mais significativos: utilizar o planejamento de experimentos pela metodologia Plackett-Burman para identificar quais parâmetros de impressão exercem maior influência na vida em fadiga das peças;
- Realizar ensaio de fadiga: submeter corpos de prova impressos a ensaios de fadiga por flexão rotativa, de acordo com as normas pertinentes, para obter dados experimentais sobre o comportamento do material sob ciclos de tensão;
- Analisar os resultados experimentais: correlacionar os resultados dos ensaios de fadiga com os parâmetros de impressão identificados como significativos, buscando estabelecer relações de causa e efeito;
- Desenvolver diretrizes de projeto: com base nos resultados e análises, propor diretrizes de impressão que permitam a otimização do processo para a fabricação de componentes com maior resistência à fadiga, aumentando sua confiabilidade e vida útil em aplicações de engenharia.

1.1 Impressão 3D (FDM) e comportamento mecânico / 3D Printing (FDM) and Mechanical Behavior

A Manufatura Aditiva (MA), ou impressão 3D, consiste na fabricação de componentes por adição sucessiva de material camada por camada a partir de um modelo digital, conforme a ISO/ASTM 52900 (2015). Essa tecnologia tem papel central na Indústria 4.0, ao permitir a produção de geometrias complexas, personalização de peças e redução de desperdícios em comparação aos processos convencionais (Prashar et al., 2022). Embora englobe técnicas para metais, como SLM, SLS e EBM, este trabalho concentra-se na impressão de polímeros pelo método FDM, amplamente difundido pela sua simplicidade e baixo custo (Zohdi; Yang, 2021).

No FDM, um filamento termoplástico é aquecido até o estado semifundido e extrudado por um bico móvel, solidificando-se após o resfriamento e formando a peça camada por camada. Essa estratégia de fabricação introduz anisotropia mecânica e porosidade intrínseca, distinguindo as peças impressas daquelas produzidas por processos convencionais, como a injeção. Como consequência, as interfaces entre filamentos e camadas tornam-se regiões estruturalmente mais frágeis, com impacto direto no comportamento à fadiga, especialmente em análises multiparamétricas (Bakhtiari et al., 2023; Gomez-Gras et al., 2021).

A qualidade da adesão interlaminar depende essencialmente da energia térmica disponível para a difusão molecular entre camadas, sendo influenciada pela reologia do polímero, que controla o fluxo, a estabilidade dimensional e a largura de deposição. O controle limitado de variáveis de processo, como pressão de extrusão e deposição do filamento, pode resultar em inconsistências geométricas e superfícies com elevada rugosidade, afetando negativamente as propriedades mecânicas, em particular sob carregamentos cíclicos.

Nesse contexto, o estudo da fadiga — caracterizada pela falha progressiva sob tensões inferiores ao limite de resistência estática — torna-se especialmente relevante para polímeros utilizados em manufatura aditiva (Miwa, 2022). Diferentemente dos metais, nos quais a fadiga está associada à nucleação e propagação de trincas a partir de defeitos microestruturais bem definidos, os polímeros apresentam comportamento mais complexo devido à sua natureza viscoelástica (Driemeier, 1995). O carregamento cíclico nesses materiais provoca histerese mecânica, com dissipação de energia na forma de calor (*self-heating*), podendo levar ao amolecimento local, alteração dos mecanismos de propagação de trincas e falhas prematuras.

Esse efeito térmico é particularmente crítico em peças fabricadas por FDM, uma vez que a baixa condutividade térmica dos polímeros, associada à porosidade do processo, dificulta a dissipação de calor. Assim, análises multiparamétricas de fadiga devem considerar simultaneamente os efeitos mecânicos e térmicos para uma avaliação realista do desempenho estrutural, sobretudo em materiais como o ABS, cada vez mais empregados em aplicações de engenharia (Miwa, 2022).

O desempenho mecânico de componentes FDM é fortemente influenciado por parâmetros de impressão, como altura de camada, velocidade e temperatura de extrusão, que afetam simultaneamente resistência, precisão dimensional e tempo de fabricação. A otimização desses parâmetros é fundamental para reduzir defeitos, controlar a anisotropia e melhorar a resistência à fadiga dos corpos de prova impressos (Bakhtiari et al., 2023; Gomez-Gras et al., 2021). A Figura 1 apresenta os principais parâmetros de deposição de camadas e as variáveis relacionadas ao equipamento de impressão.

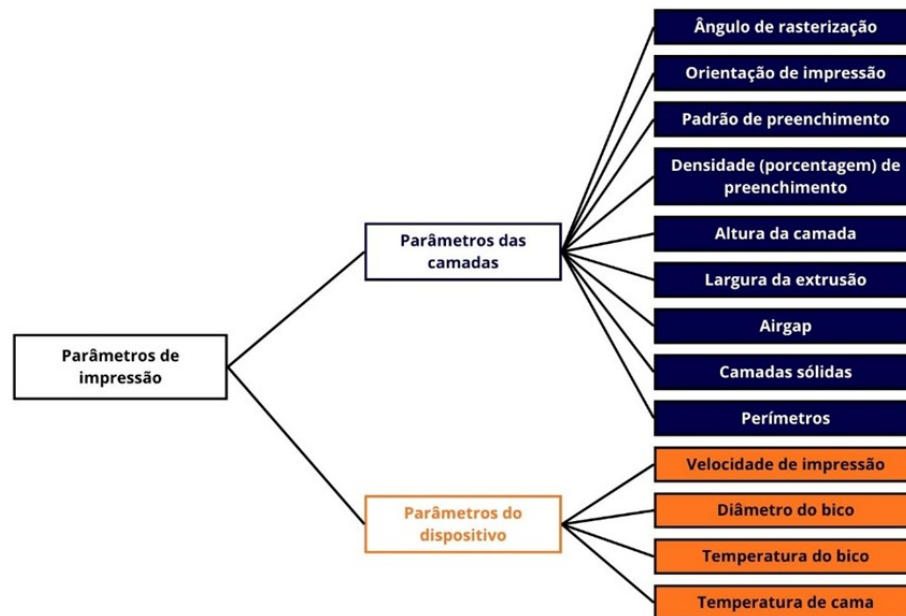


Figura 1 -- Parâmetros de impressão relevantes (Bakhtiari et al., 2023; Gomez-Gras et al., 2021) /
 Figure 1 -- Relevant printing parameters (Bakhtiari et al., 2023; Gomez-Gras et al., 2021)

A orientação de deposição controla a interação entre as cargas externas e as direções de extrusão, que correspondem às regiões microestruturalmente mais vulneráveis em componentes fabricados por FDM, sendo, portanto, um fator determinante no desempenho à fadiga. Orientações paralelas ao raster (0°) tendem a maximizar a resistência estática, pois as tensões atuam predominantemente ao longo do filamento contínuo (Rodrigues, 2025), enquanto orientações intermediárias, como 45° , podem aumentar a vida em fadiga ao induzir trajetórias mais tortuosas para a propagação de trincas, reduzindo a atuação direta sobre as interfaces interlaminares críticas (Bakhtiari et al., 2023). Em contraste, a orientação de 90° apresenta o desempenho mais desfavorável, uma vez que submete diretamente as interfaces entre camadas a tensões normais, condição na qual a resistência é governada pela adesão interlaminar, resultando em limites de fadiga significativamente inferiores (Bakhtiari et al., 2023; Zohdi; Yang, 2021). Neste trabalho, essa orientação foi fixada em 90° de forma intencional por representar um cenário estruturalmente conservador e altamente sensível às variações dos parâmetros de processo, permitindo isolar os efeitos da altura de camada e de outras variáveis sobre a nucleação e propagação de trincas sob carregamento cíclico, conforme recomendado em análises multiparamétricas de manufatura aditiva (Ahmad; Yahya, 2023; Bakhtiari et al., 2023).

Além da orientação de impressão, outros parâmetros microestruturais influenciam de maneira significativa o comportamento em fadiga de peças FDM, afetando a porosidade, a qualidade da adesão entre camadas e a distribuição de tensões. A interação entre esses fatores é particularmente relevante em estudos multiparamétricos, nos quais a otimização das condições de impressão permite mitigar defeitos inerentes à manufatura aditiva e aprimorar a durabilidade cíclica dos corpos de prova, fornecendo subsídios técnicos para aplicações estruturais em engenharia. A Figura 2 apresenta, de forma esquemática, os principais parâmetros de impressão considerados neste estudo.

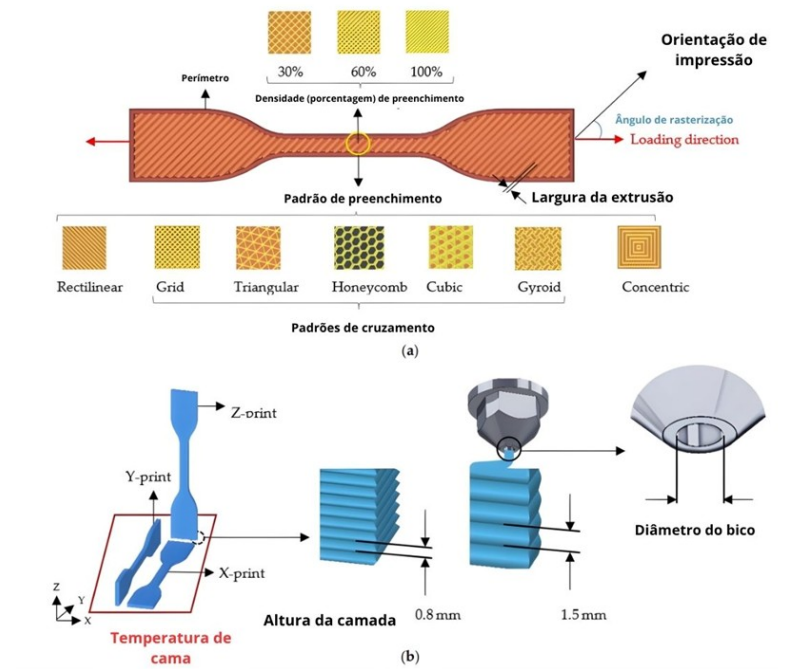


Figura 2 -- Ilustração esquemática dos parâmetros de impressão 3D: (a) densidade de preenchimento, padrão de preenchimento, perímetros e orientação raster e (b) diferentes orientações de construção, altura da camada e diâmetro do bocal. / Figure 2 -- Schematic illustration of 3D printing parameters: (a) infill density, infill pattern, perimeters and raster orientation, and (b) different build orientations, layer height, and nozzle diameter.

A temperatura do bico influencia diretamente a viscosidade do polímero fundido e, consequentemente, a eficiência da difusão molecular e da adesão interlaminar, sendo um parâmetro crítico para o desempenho à fadiga de peças impressas por FDM (Bakhtiari et al., 2023). Para o PLA, temperaturas de extrusão mais elevadas tendem a melhorar as propriedades mecânicas em tração, compressão e flexão, com valores otimizados tipicamente entre 200 e 220 °C, nos quais as amostras apresentam comportamento mais próximo ao de um material homogêneo e menor sensibilidade à orientação de deposição sob carregamento cíclico (Hsueh et al., 2021; Bakhtiari et al., 2023). Entretanto, temperaturas excessivas reduzem a viscosidade a níveis indesejáveis, favorecendo a formação de vazios e a degradação das propriedades mecânicas, como observado em sistemas PLA-PHA, o que acelera a nucleação de trincas em ensaios de fadiga (Syrlybayev et al., 2021). Esses efeitos reforçam a necessidade de análises multiparamétricas para a identificação de janelas térmicas que maximizem a durabilidade cíclica sem introduzir defeitos estruturais (Bakhtiari et al., 2023).

A altura de camada, parâmetro inversamente relacionado ao tempo de impressão, afeta simultaneamente a densidade interna e a rugosidade superficial das peças (Ahmad; Ghazali, 2022). Camadas mais finas reduzem vazios e aumentam a resistência estática; contudo, o impacto na fadiga é mais complexo. Em certos cenários, maiores alturas de camada podem resultar em maior vida em fadiga, uma vez que esse parâmetro exerce influência mais significativa sobre a porosidade do que a velocidade ou a temperatura de impressão (Ahmad; Yahya, 2023; Bakhtiari et al., 2023). Essa tendência é contrabalançada pelo aumento da rugosidade superficial associado ao *staircase effect*, no qual degraus mais pronunciados intensificam os concentradores de tensão na superfície da peça (Gindro, 2016). Como a nucleação de trincas de fadiga ocorre predominantemente na superfície, a rugosidade elevada pode anular os ganhos estruturais internos, reduzindo o limite de fadiga e

acelerando a falha. Assim, a seleção adequada da altura de camada, aliada a estratégias de pós-processamento quando necessário, é fundamental para avaliações representativas do comportamento em fadiga de corpos de prova fabricados por manufatura aditiva. A Figura 3 ilustra o efeito da altura de camada na impressão 3D.

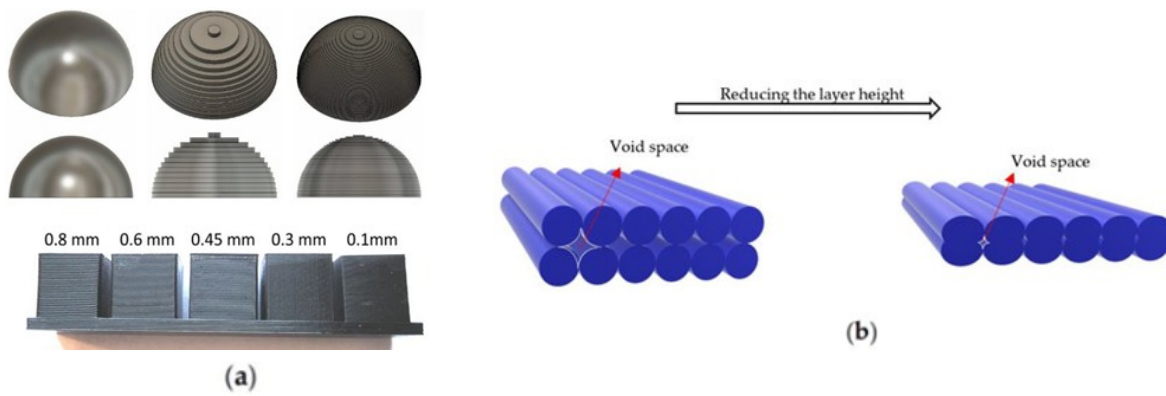


Figura 3 -- Influência da diminuição da altura da camada (a) e representação do espaço vazio na altura de camada (b) (Wishbox/Bakhtiari et al., 2023) / Figure 3 -- Influence of decreasing layer height (a) and representation of void space in layer height (b) (Wishbox/Bakhtiari et al., 2023)

A velocidade de impressão influencia o tempo de aquecimento e resfriamento na interface entre camadas, afetando tanto a microestrutura interna quanto a qualidade superficial e, consequentemente, a durabilidade à fadiga. Velocidades elevadas reduzem o tempo disponível para difusão molecular, enfraquecendo a adesão interlaminar, enquanto velocidades mais baixas favorecem a fusão entre filamentos, melhorando as propriedades mecânicas e a estabilidade térmica do material (Yu et al., 2022). Além disso, a redução da velocidade tende a produzir superfícies mais uniformes, diminuindo concentradores de tensão responsáveis pela nucleação de trincas em carregamentos cíclicos (Gindro, 2016). A interação entre velocidade, temperatura do bico e tempo de resfriamento torna esse parâmetro especialmente relevante em análises multiparamétricas voltadas à otimização do *interlayer bonding* em peças FDM (Yu et al., 2022).

A densidade de preenchimento exerce influência direta sobre a rigidez, a resistência e a durabilidade à fadiga de componentes impressos, uma vez que o aumento do infill reduz a porosidade interna e limita a presença de vazios que atuam como sítios preferenciais de nucleação de trincas sob carregamento repetitivo (Yankin et al., 2023; Ahmad; Yahya, 2023). De modo geral, a diminuição da fração de vazios resulta em incrementos do módulo elástico e da resistência mecânica, tanto estática quanto dinâmica (Ahmad; Ghazali, 2022). O padrão de preenchimento atua de forma complementar, sendo que geometrias com poros mais arredondados tendem a apresentar menor concentração de tensões em comparação a estruturas com arestas pronunciadas (Bakhtiari et al., 2023). Em aplicações específicas, como implantes biomédicos, densidades reduzidas podem ser necessárias por razões funcionais, exigindo um equilíbrio criterioso entre desempenho mecânico e requisitos de aplicação, reforçando a importância de análises multiparamétricas (Bakhtiari et al., 2023).

A espessura da parede, definida pelo número de contornos, reforça a região perimetral da peça e impacta diretamente a carga máxima suportada, a resistência à ruptura e a capacidade de absorção de energia. Paredes mais espessas aumentam a integridade estrutural e contribuem para maior estabilidade térmica, reduzindo os efeitos do *self-heating* durante a fadiga, fenômeno particularmente crítico em polímeros submetidos a carregamento cíclico (Callister; Rethwisch, 2020). Em estudos multiparamétricos, a combinação de maior espessura de parede e elevada

densidade de preenchimento atua como uma barreira adicional contra deformações cíclicas, prolongando a vida útil dos corpos de prova e fornecendo resultados mais robustos para modelagens de fadiga em manufatura aditiva.

Embora a temperatura da mesa esteja principalmente associada à adesão inicial e à mitigação de empenamento (*warping*), ela também contribui para o regime térmico global do processo FDM, influenciando indiretamente a qualidade das ligações interlaminares e o desempenho mecânico sob fadiga. Condições térmicas adequadas favorecem uma transferência de calor mais uniforme durante a deposição, o que, em conjunto com parâmetros como velocidade e temperatura do bico, pode resultar em estruturas mais homogêneas e resistentes sob carregamento cíclico, especialmente em materiais como o PLA. Adicionalmente, o material da plataforma interfere na dissipação térmica e no controle de defeitos superficiais, aspectos relevantes em análises multiparamétricas de corpos de prova impressos por MA.

A Tabela 1 resume como esses parâmetros modulam propriedades em peças FDM, relevantes para o foco em fadiga de espécimes impressos.

Tabela 1 - Resumo da Influência dos Parâmetros de Impressão FDM nas Propriedades Mecânicas /
Table 1 - Summary of the Influence of FDM Printing Parameters on Mechanical Properties

Parâmetro	Efeito no Ligamento (IB) / Porosidade	Efeito na Resistência Mecânica	Efeito na Estabilidade Térmica
Temperatura de Impressão	Controle da viscosidade melhora difusão molecular e adesão entre camadas até ponto ótimo; excessiva cria vazios e enfraquece (Hsueh et al., 2021; Syrlibayev et al., 2021; Bakhtiari et al., 2023).	Temperaturas mais altas melhoram tração, compressão e cisalhamento; otimizam durabilidade à fadiga (Hsueh et al., 2021; Bakhtiari et al., 2023).	Gerenciamento térmico vital; sensibilidade acelera trincas em fadiga (Bakhtiari et al., 2023).
Altura de Camada	Camadas finas reduzem vazios e aumentam densidade; maior altura pode prolongar vida útil em fadiga apesar de rugosidade (Ahmad; Ghazali, 2022; Bakhtiari et al., 2023).	Camadas finas aprimoram resistência estática; afeta porosidade mais que outros parâmetros, influenciando fadiga (Ahmad; Ghazali, 2022; Ahmad; Yahya, 2023; Gindro, 2016).	Camadas finas tornam estrutura termicamente estável; equilíbrio com pós-processamento minimiza efeitos (Ahmad; Ghazali, 2022; Gindro, 2016).

Densidade de Preenchimento	Maior densidade reduz porosidade e vazios; padrão afeta concentração de tensões (Yankin et al., 2023; Ahmad; Yahya, 2023; Pereira et al., 2021; Bakhtiari et al., 2023)..	Maior densidade aumenta rigidez, tensão de ruptura, módulo elástico e durabilidade à fadiga (Yankin et al., 2023; Ahmad; Yahya, 2023; Ahmad; Ghazali, 2022).	Redução de vazios melhora rigidez e resistência dinâmica; equilíbrio em aplicações como biomédicas (Bakhtiari et al., 2023).
Velocidade de preenchimento	Redução melhora tempo de fusão, adesão e ligações interlaminares; altas limitam difusão (Yu et al., 2022).	Redução melhora propriedades mecânicas, vida à fadiga e minimiza concentradores de tensão (Yu et al., 2022; Gindro, 2016).	Redução melhora estabilidade térmica e otimiza interlayer bonding (Yu et al., 2022).
Espessura da parede	Aumento fortalece perímetro e integridade estrutural; combina com densidade para barreira contra deformações	Aumento melhora carga em tração, resistência à ruptura, absorção de energia e vida útil em fadiga	Aumento melhora estabilidade térmica e resistência ao self-heating
Temperatura da mesa	Otimização melhora adesão inicial, ligações interlaminares e reduz warping/defeitos.	Otimização eleva resistência à tração (UTS) e durabilidade sob cargas cíclicas.	Facilita transferência de calor uniforme e dissipação térmica, minimizando defeitos.

1.2 Defeitos típicos em peças FDM (porosidade, delaminação, anisotropia) / Typical Defects in FDM Parts (Porosity, Delamination, Anisotropy)

Peças fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM) apresentam uma microestrutura característica resultante da deposição camada por camada, a qual introduz defeitos inerentes ao processo que afetam diretamente o desempenho mecânico, sobretudo sob carregamentos cíclicos. Em análises de fadiga multiparamétricas, a compreensão desses defeitos é fundamental para a correta

interpretação dos resultados experimentais e para a otimização do projeto de componentes produzidos por manufatura aditiva (MA). Entre os principais mecanismos que governam a resistência à fadiga destacam-se a porosidade, a delaminação e a anisotropia microestrutural.

A porosidade manifesta-se na forma de vazios não intencionais entre rasters adjacentes ou entre camadas sucessivas, atuando como concentradores internos de tensão que reduzem a resistência mecânica global da peça em comparação a processos convencionais de maior densificação (Zohdi; Yang, 2021). Sob carregamento cíclico, esses vazios favorecem a nucleação de trincas e aceleram a falha por fadiga. A redução da porosidade pode ser alcançada por meio da otimização de parâmetros como altura de camada e densidade de preenchimento, estratégias que têm se mostrado eficazes para melhorar a durabilidade de corpos de prova em estudos multiparamétricos (Ahmad; Yahya, 2023).

A delaminação corresponde à separação entre camadas adjacentes devido à adesão interlaminar insuficiente, fenômeno análogo à falha por descolamento em materiais compósitos (Ponte, 2022; Zohdi; Yang, 2021). Em regimes de fadiga, essa condição é particularmente crítica, pois as tensões cíclicas exploram as interfaces mais frágeis, promovendo a propagação acelerada de danos. Técnicas de pós-processamento, como recozimento térmico e soldagem ultrassônica, têm sido investigadas para reforçar o interlayer bonding, reduzindo a suscetibilidade à delaminação e aumentando a integridade estrutural das peças impressas (Omer et al., 2025).

A anisotropia decorre da dependência direcional das propriedades mecânicas imposta pela estratégia de deposição do FDM. Em geral, maiores resistências são observadas nas direções paralelas à deposição (eixos X e Y), enquanto no eixo perpendicular (Z) o comportamento é governado exclusivamente pela resistência das ligações interlaminares, resultando em desempenho inferior (Rodrigues, 2025). Essa característica exerce influência significativa na fadiga, uma vez que a orientação da peça determina os caminhos preferenciais de propagação de trincas. Assim, a consideração explícita da anisotropia no projeto e na modelagem do material é essencial para a previsão confiável da vida útil em aplicações sujeitas a carregamentos repetitivos (Carta et al., 2025).

Sob carregamentos cíclicos, esses defeitos atuam de forma sinérgica: a porosidade tende a iniciar trincas, que se propagam preferencialmente ao longo de interfaces fragilizadas pela delaminação e pela anisotropia estrutural. Dessa forma, a durabilidade de peças fabricadas por FDM não depende apenas das propriedades intrínsecas do polímero, mas principalmente da qualidade das interfaces e do controle dos vazios introduzidos durante a impressão. Essa abordagem integrada é central para as análises multiparamétricas desenvolvidas neste trabalho, permitindo uma avaliação mais realista do comportamento à fadiga de corpos de prova produzidos por manufatura aditiva (Zohdi; Yang, 2021).

2. Metodologia / Methodology

2.1 Material utilizado / Material Used

O material utilizado foi o PLA da marca Voolt 3D® com as seguintes especificações técnicas descritas na Tabela 2:

Tabela 2 -- Especificações técnicas do material utilizado / Table 2 -- Technical specifications of the material used

Matéria prima	Poliácido Láctico
Diâmetro do Filamento	1,75 mm $\pm$ 0,02 mm
Temperatura de extrusão	190° ~ 230° C
Temperatura da mesa	50° ~ 70 C
Transição vítrea (Tg)	~ 55° C
Velocidade Volumétrica	até 25 mm ³ / s
Densidade	1,24g / cm ³

Além disso, para melhorar a qualidade de impressão foi utilizado um desumidificador de filamentos Space Pi Dryer Creality.

2.2 Corpos de prova / Test Specimens

O corpo de prova foi adaptado da norma (ISO 12106:2017) que rege experimentos relacionados à fadiga, seguem seus parâmetros abaixo na Figura 4:

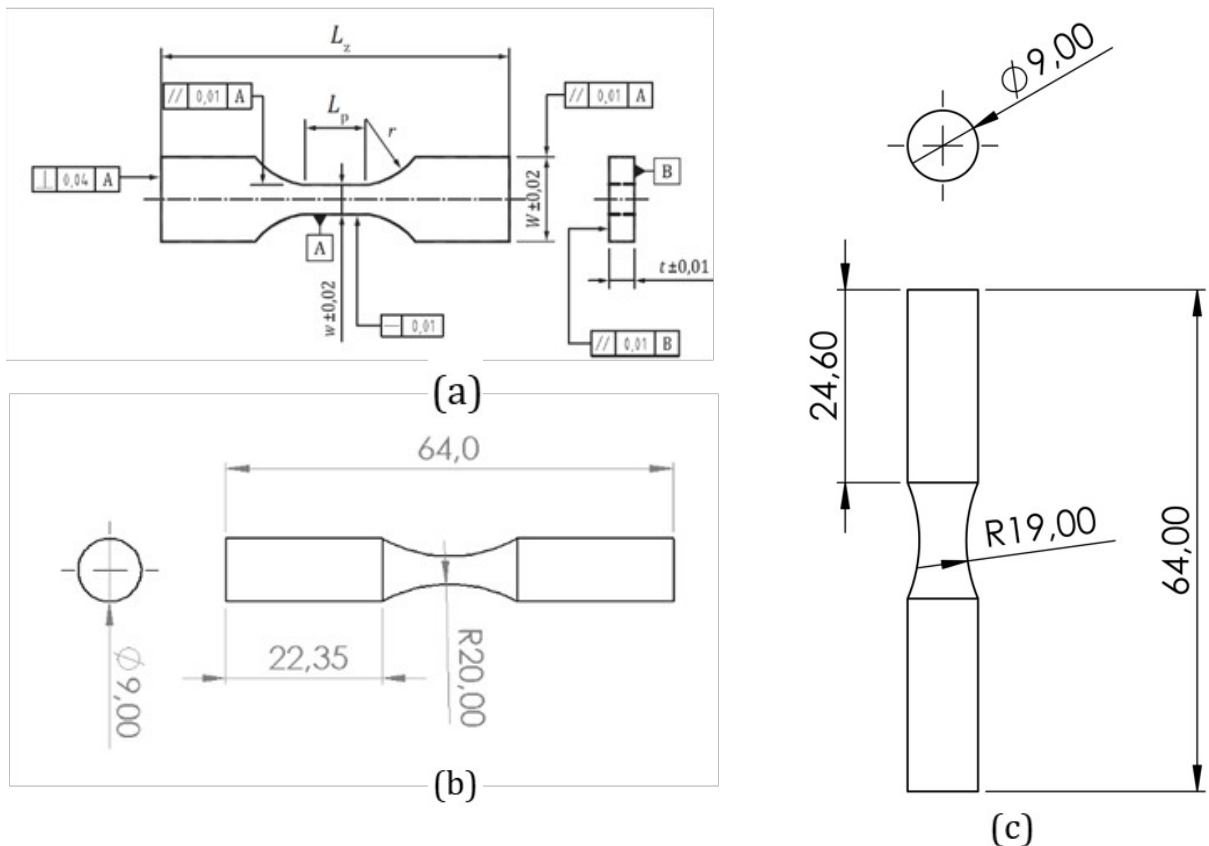


Figura 4 - Cotas relacionadas a norma (a), geometria inicial dos corpos de prova (b) e geometria final dos corpos de prova impressos (c) (do autor) / Figure 4 - Dimensions related to the standard (a), initial specimen geometry (b), and final printed specimen geometry (c) (by the author)

Vale ressaltar que o diâmetro do pescoço indicado na norma é 4 mm, mas ensaios preliminares indicaram que a rigidez do corpo de prova é baixa para as tensões aplicadas pelo equipamento, por esse motivo optou-se alterar seu diâmetro para 6 mm.

2.3 Organização do experimento / Experiment Organization

A organização dos experimentos neste estudo de análise multiparamétrica de fadiga em corpos de prova impressos por manufatura aditiva (MA) via FDM foi estruturada com base em metodologias de design de experimentos (DOE), visando avaliar sete parâmetros chave, como temperatura de impressão, altura de camada, velocidade de impressão, orientação de construção, densidade de preenchimento, espessura da parede e temperatura da mesa, que influenciam o desempenho à fadiga.

Optou-se pelo método Plackett-Burman como abordagem principal para a triagem inicial, pois ele identifica rapidamente os parâmetros mais influentes na fadiga das peças, com redução significativa de custo e tempo, permitindo uma análise estatística rápida sem comprometer a detecção de efeitos principais, conforme aplicado em otimização de propriedades mecânicas em MA (Bakhtiari; Tolouei-Rad, 2023). Essa escolha justifica-se pela necessidade de uma avaliação multiparamétrica eficiente em um contexto experimental onde muitos fatores potenciais afetam o

desempenho, facilitando a transição para otimizações mais detalhadas em fases subsequentes (Yankin et al., 2023).

Assim, para definir a divisão dos experimentos e determinar a quantidade e o modo de fabricação dos corpos de prova, foi elaborada a tabela de Plackett-Burman, de forma a contemplar os valores máximos e mínimos de cada parâmetro selecionado para o estudo. A Tabela 3 apresenta as variáveis utilizadas em cada lote impresso.

Tabela 3 -- Organização por Plackett-Burman para realização dos testes (do autor) / Table 3 -- Plackett-Burman organization for conducting tests (by the author)

Peça	Velocidade de deposição (mm/s)	Temperatura de cama (°C)	Temperatura do bico (°C)	Altura da camada (mm)	Padrão de deposição do preenchimento	Espessura da parede (mm)	Porcentagem preenchida (%)
1	80	65	220	0,28	Giróide	0,8	10
2	80	65	205	0,12	Triangular	2,0	10
3	80	75	220	0,12	Giróide	2,0	30
4	80	75	205	0,28	Triangular	0,8	30
5	20	65	220	0,12	Triangular	0,8	30
6	20	65	205	0,28	Giróide	2,0	30
7	20	75	220	0,28	Giróide	2,0	10
8	20	75	205	0,12	Triangular	0,8	10

Assim, com os parâmetros previamente definidos, foram impressos oito corpos de prova para cada um dos testes (1 a 8), de modo a possibilitar o cálculo da média de ciclos e da tensão correspondente entre as diferentes configurações analisadas.

2.4 Execução dos testes / Test Execution

Para a realização dos ensaios de fadiga, foi empregada a máquina de fadiga rotativa TecEquipment® SM1090, projetada para demonstrar a falha de materiais submetidos a tensões alternadas. O equipamento baseia-se no princípio de Wohler, utilizando um motor elétrico que faz girar um corpo de prova em balanço com uma carga aplicada em sua extremidade livre, gerando esforços cíclicos de flexão.

Para a execução dos testes, realizou-se a pré-parametrização dos valores a serem utilizados na máquina, definidos pela frequência de rotação e pela carga inicial aplicada. Para esse procedimento, foram utilizados corpos de prova previamente impressos, com o objetivo de calibrar corretamente o equipamento e, assim, evitar possíveis danos ou inconsistências durante os ensaios principais. A partir dessa calibração, foram determinados os valores de tensão fixa para todas as peças $\sigma = (2,8 \pm 0,1) \text{ MPa}$ e frequência $\omega = (20 \pm 1) \text{ Hz}$, considerando as incertezas associadas aos instrumentos de medição empregados. Nesse experimento repete-se esse ciclo até terminarmos os 64 experimentos que foram dispostos na Tabela 3.

As tensões apresentadas neste trabalho são nominais, calculadas com base na seção transversal geométrica dos corpos de prova. Considerando a presença de preenchimento parcial e espessura finita de paredes, a área efetivamente resistente é inferior à área geométrica, implicando que a tensão real nos filamentos é superior àquela reportada. Contudo, como a mesma definição de área foi adotada para todas as amostras, os resultados permanecem válidos para análises comparativas entre parâmetros de processo, conforme prática consolidada na literatura de manufatura aditiva (Bakhtiari et al., 2023; Zohdi; Yang, 2021).

Para complementar a análise dos mecanismos de falha, especialmente a nucleação de trincas na superfície, foi realizada a caracterização da rugosidade dos corpos de prova utilizando um rugosímetro portátil TR100, com distância de varredura de 2,5 mm. O parâmetro R_z , que mede a altura total de rugosidade (distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo dentro do comprimento de amostragem), foi o escolhido por trazer informações sobre os maiores defeitos superficiais.

3. Resultados e Discussão / Results and Discussion

Os corpos de prova foram fabricados em PLA (Ácido Polilático), um termoplástico que, ao contrário de muitos metais, não exibe um limite de fadiga claro, falhando sob tensões baixas após múltiplos ciclos, sendo particularmente sensível a fatores como a temperatura e a qualidade das interfaces (Santos et al., 2021). A Tabela 4 apresenta a síntese estatística dos resultados de fadiga, obtidos a partir das oito repetições realizadas para cada uma das oito configurações definidas pelo planejamento Plackett-Burman com tensão fixa para todas as peças $\sigma = (2,8 \pm 0,1) \text{ MPa}$ e frequência $\omega = (20 \pm 1) \text{ Hz}$.

Tabela 4 - Resumo estatístico dos resultados experimentais de fadiga (N_f) por Configuração / Table 4 - Statistical summary of experimental fatigue results (N_f) by Configuration

Peça	Média de Ciclos (N_f)	Desvio Padrão (DP)	Mediana de Ciclos (N_f)	Variância	Erro do equipamento (ciclos)	Qualidade Relativa (N_f)
1	867	61	860	3780	1	Média Baixa
2	9485	985	9391	970283	1	Máxima
3	1540	84	1540	7089	1	Média Baixa
4	383	55	373	2978	1	Mínima Viável
5	101	29	101	822	1	Baixíssima
6	1077	46	1077	2132	1	Baixa

7	2981	118	3002	13823	1	Média
8	11	20	0	419	1	Falha Catastrófica

A análise descritiva dos resultados permite a imediata identificação dos extremos de desempenho cíclico:

- Melhor desempenho (Peça 2): Alcançou uma média de 9485 ciclos, configurando o regime de maior durabilidade sob o carregamento aplicado.
- Pior desempenho (Peça 8): Apresentou uma média de apenas 11 ciclos, com uma Mediana de 0 (indicando que a maioria das repetições falhou instantaneamente ou em menos de um ciclo completo), caracterizando uma falha catastrófica ou ruptura por sobrecarga aparente, apesar de a carga ser constante.

A inspeção dos dados de variabilidade revela um padrão significativo. Embora a Peça 2 tenha apresentado a maior vida média, ela também exibe o Desvio Padrão ($DP = 985$) e a Variância (970283) mais elevados da amostra. Este alto grau de dispersão nos resultados de alta ciclagem ($N_f \geq 10^4$) é um comportamento frequentemente relatado na literatura para polímeros FDM testados em fadiga [Bakhtiari; Aamir; Tolouei-Rad, 2023].

Quando os materiais operam em regimes de alta vida cíclica, a falha não é ditada pela resistência média da seção, mas sim pela ocorrência do defeito mais crítico (a "falha de primeira ordem") na região de maior tensão (Suresh, 1998). Esses defeitos, como porosidades micro-raster ou microtrincas interlaminares, são estocásticos. Consequentemente, mesmo que a configuração da Peça 2 seja a mais otimizada, a presença ocasional de um defeito inerente ao processo de FDM resulta em uma falha prematura em algumas amostras, ampliando a distribuição estatística. Em contraste, as peças que falham rapidamente (como a Peça 4 e a Peça 8) apresentam desvios padrões baixos, pois a falha é determinística e dominada por certos defeitos de processamento, que limitam consistentemente o desempenho em fadiga, resultando em pouca dispersão.

A Tabela 5 resume os resultados obtidos, apresentando a Média Rz em micrômetros (μm) para cada configuração:

Tabela 5 - Resumo Estatístico dos Resultados Experimentais de Rugosidade (Rz) por Configuração /
 Table 5 - Statistical Summary of Experimental Roughness Results (Rz) by Configuration

Peça (Configuração)	Média Rz (μm)	Desvio Padrão (μm)	Mediana (μm)	Variância (μm)
1	14,2	3,3	14,2	10,89
2	3,0	1,1	3,3	1,21

3	12,6	2,8	13,3	7,84
4	16,8	4,2	17,5	17,64
5	19,8	7,9	19,0	62,41
6	9,8	7,2	6,8	51,84
7	7,3	2,9	6,7	8,41
8	27,8	10,2	29,4	104,04

A correlação entre os dados de rugosidade (Tabela 5) e a vida em Fadiga (Tabela 4) é evidente e confirma o embasamento teórico de que a qualidade superficial é um fator decisivo na falha por fadiga:

1. Melhor desempenho superficial: a Peça 2, que apresentou a máxima vida em fadiga ($N_f = 9485$ ciclos), registrou a menor rugosidade média ($R_z = 3,0 \mu m$). Este resultado valida que a superfície mais lisa (provavelmente devido à menor altura de camada e parâmetros otimizados) minimiza os concentradores de tensão do efeito staircase (Gindro, 2016), retardando a nucleação de trincas.
2. Pior Desempenho Superficial: Em contraste, a Peça 8, que apresentou falha catastrófica ($N_f = 11$ ciclos), registrou a rugosidade mais alta ($R_z = 27,8 \mu m$). A extrema irregularidade da superfície criou pontos de tensão tão severos que a peça falhou sob sobrecarga aparente, reforçando que a rugosidade elevada é um gatilho primário e catastrófico para a falha cíclica.

Em geral, o desempenho à fadiga dos corpos de prova é inversamente proporcional à rugosidade superficial R_z , comprovando que, para o PLA em regime de flexão rotativa, a nucleação de trincas é dominada pela qualidade geométrica da superfície.

Para determinar a hierarquia de influência, o efeito principal de cada fator foi calculado como a diferença entre a média das respostas no nível alto (+) e a média das respostas no nível baixo (-), dividida por 4 (metade do número total de ensaios). Os níveis alto e baixo para cada um dos sete parâmetros são detalhados na Tabela 6, juntamente com os resultados de N_f utilizados no cálculo.

Tabela 6 - Mapeamento da configuração de impressão Plackett-Burman e resultados de fadiga / Table 6 - Mapping of Plackett-Burman printing configuration and fatigue results

Peça	Fator A: Velocidade (mm/s)	Fator B: T. Cama (°C)	Fator C: T. Bico (°C)	Fator D: Altura Camad	Fator E: Padrão	Fator F: Parede (mm)	Fator G: Preenchimento (%)	Média N_f
------	----------------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	--------------------	----------------------------	----------------------------------	----------------

	a (mm)							
1	+(80)	-(65)	+(220)	+ 0.28	+(Giróide)	-(0.8)	-(10)	867
2	+(80)	-(65)	-(205)	-(0.12)	-(Triangular)	+(2.0)	-(10)	9485
3	+(80)	+(75)	+(220)	-(0.12)	+(Giróide)	+(2.0)	+(30)	1540
4	+(80)	+(75)	-(205)	+(0.28)	-(Triangular)	-(0.8)	+(30)	383
5	-(20)	-(65)	+(220)	-(0.12)	-(Triangular)	-(0.8)	+(30)	101
6	-(20)	-(65)	-(205)	+(0.28)	+(Giróide)	+(2.0)	+(30)	1077
7	-(20)	+(75)	+(220)	+(0.28)	+(Giróide)	+(2.0)	-(10)	2981
8	-(20)	+(75)	-(205)	-(0.12)	-(Triangular)	-(0.8)	-(10)	11

Para identificar os parâmetros de impressão FDM mais influentes na vida em fadiga dos corpos de prova em PLA (Acierno & Patti, 2023; Costa, Barros & Lima, 2023), adotou-se um planejamento Plackett–Burman com 7 fatores e 8 ensaios. Esse tipo de planejamento é amplamente utilizado para triagem inicial de variáveis em manufatura aditiva (Ahmad, Wong & Ghazali, 2022; Bakhtiari et al., 2023), pois permite avaliar rapidamente quais parâmetros exercem maior impacto nas propriedades mecânicas.

Cada fator foi avaliado em dois níveis:

- alto (+1) – valores superiores para velocidade, temperatura, etc.
- baixo (–1) – valores inferiores dentro da faixa de processo recomendada na literatura (HSUEH et al., 2021; Horasan & Sarac, 2024).

O cálculo do efeito principal (E) de cada parâmetro segue a lógica clássica de projeto de experimentos: medir quanto a resposta muda quando o fator passa do nível baixo para o nível alto (Luoma, 2007). Para cada fator:

1. Calcula-se a média das respostas nos ensaios onde o fator está em nível alto → $\bar{y}_+$.
2. Calcula-se a média das respostas nos ensaios onde o fator está em nível baixo → $\bar{y}_-$.
3. O efeito é dado por:

$$E = \frac{\bar{y}_+ - \bar{y}_-}{4} \quad (1)$$

O divisor 4 corresponde a N/2, porque o planejamento com 8 ensaios possui quatro repetições de cada nível (+/–) para cada fator. Isso normaliza o efeito e mantém a comparabilidade entre fatores.

Essa abordagem é equivalente a somar as respostas ponderadas pelos sinais (+1/–1)

definidos na matriz do planejamento e dividir pelo número de repetições correspondentes, procedimento amplamente documentado em experimentos para caracterização mecânica de peças impressas por FDM (Montero et al., 2001; Onwubolu & Rayegani, 2014).

Após o cálculo, os efeitos foram ordenados em módulo, permitindo identificar rapidamente os fatores dominantes. Essa etapa é essencial em estudos de fadiga de polímeros processados por FDM, já que pequenas variações de parâmetros como temperatura, velocidade e preenchimento podem alterar substancialmente a resistência à nucleação e propagação de trincas (Ezeh & Susmel, 2018; Zohdi & Yang, 2021).

A triagem obtida fundamenta etapas subsequentes de otimização, reduzindo significativamente o número de experimentos necessários, prática comum em trabalhos recentes de otimização de parâmetros de impressão (Rankin et al., 2023; Morettini et al., 2022).

A Tabela 7 resume a magnitude dos efeitos calculados, ordenando os fatores por sua influência absoluta na vida em fadiga. Um efeito positivo indica que a mudança para o nível alto (+) aumentou a vida útil, enquanto um efeito negativo sugere que o nível baixo (-) foi mais benéfico.

Tabela 7 - Efeitos Principais dos Parâmetros de Impressão na Vida em Fadiga (Nf) / Table 7 - Main Effects of Printing Parameters on Fatigue Life (Nf)

Hierarquia (Magnitude)	Fator	Efeito Principal	Nível Otimizado	Interpretação Mecânica
1	Espessura da Parede (F)	+3430,25	Alto (2.0 mm)	Dominante Positivo. Maior resistência superficial.
2	Porcentagem de Preenchimento (G)	-2585,75	Baixo (10%)	Dominante Negativo. Evita problemas térmicos.
3	Velocidade de Deposição (A)	+2026,25	Alto (80 mm/s)	Redução de self-heating e densificação.
4	Temperatura da Cama (B)	-1653,75	Baixo (65°C)	Controle de tensões residuais.
5	Altura da Camada (D)	-1457,25	Baixo (0.12 mm)	Redução do staircase effect/rugosidade.
6	Temperatura do Bico (C)	-1366,75	Baixo (205 °C)	Otimização do Interlayer Bonding.
7	Padrão (E)	-878,75	Baixo (Triangular)	Suporte interno previsível.

Os resultados demonstram que a resistência à fadiga em regime de alto ciclo para o PLA (FDM) é predominantemente governada por fatores relacionados à integridade geométrica da superfície e à

gestão do regime térmico do processo.

A dominância dos fatores revelados pelo Plackett-Burman é mecanicamente consistente com a natureza da falha por fadiga em flexão rotativa e com as heterogeneidades introduzidas pelo processo FDM.

O desempenho superior do preenchimento triangular em relação ao giroide pode ser atribuído à sua geometria estrutural mais favorável à transmissão de cargas uniaxiais. O padrão triangular é caracterizado por trajetórias predominantemente retilíneas e nós bem definidos, que reduzem a flexão alternada dos filamentos e promovem uma distribuição de tensões mais homogênea ao longo da direção do carregamento. Em contraste, o preenchimento giroide, apesar de apresentar elevada isotropia e boa absorção de energia, possui trajetórias curvas contínuas que tendem a induzir esforços de flexão cíclica nos filamentos, acelerando a nucleação de trincas sob carregamento repetitivo. Esse comportamento é coerente com análises geométricas e mecânicas de estruturas celulares aplicadas à manufatura aditiva (Bakhtiari et al., 2023; Zohdi; Yang, 2021).

Com um efeito principal de +3430,25 ciclos, o aumento da espessura da parede (de 0.8 mm para 2.0 mm) é o parâmetro mais crucial para maximizar a vida em fadiga. Em ensaios de flexão rotativa, a tensão máxima é concentrada na superfície do corpo de prova. A parede externa (ou contornos) de uma peça FDM é construída com 100% de densidade, atuando como a casca estrutural principal. Ao aumentar a espessura da parede, a seção transversal resistiva na região crítica de tensão é drasticamente ampliada e densificada, fornecendo uma barreira robusta contra a nucleação de trincas. A falha em fadiga inicia-se tipicamente na superfície; portanto, fortalecer o perímetro é a estratégia mais eficaz para a durabilidade em flexão rotativa.

A redução da altura da camada (de 0,28 mm para 0,12 mm) se mostrou altamente benéfica (efeito negativo de -1457,25, indicando que o nível baixo é o melhor). Camadas mais grossas geram o efeito *staircase*, que é a rugosidade inerente à deposição por camadas, resultando em concentradores de tensão mais severos na superfície (Gindro, 2016).

Dado que a nucleação de trincas é amplamente influenciada pela rugosidade superficial (Gindro, 2016), a utilização da menor altura de camada testada (0,12 mm) minimiza esses defeitos geométricos. Isso diminui a magnitude das concentrações de tensão localizadas na superfície, retardando a iniciação da trinca e, conseqüentemente, prolongando a vida útil do material em alto ciclo.

O resultado da porcentagem de preenchimento (efeito negativo de -2585,75, indicando que o nível baixo, 10%, é o melhor) representa um paradoxo mecânico. Teoricamente, aumentar o preenchimento (de 10% para 30%) deveria aumentar a rigidez e a resistência estática do componente, melhorando a durabilidade cíclica (Yankin et al., 2023). A observação de que o preenchimento baixo (10%) confere maior vida à fadiga sugere que o mecanismo de falha é dominado por efeitos não-mecânicos, especificamente a tensão residual e o gerenciamento térmico.

O PLA é um polímero termoplástico com baixa temperatura de transição vítrea (55°C) e baixa condutividade térmica (0,13 W/m°C) (Suresh, 1998). O aumento da densidade de preenchimento

(30%) exige um tempo de extrusão maior e um aporte energético significativamente superior, resultando em acúmulo de calor interno (*self-heating*) (Driemeier, 1995). Em massas maiores, este calor se dissipa lentamente, induzindo tensões residuais elevadas durante o resfriamento. Estas tensões residuais agem como uma tensão média positiva interna, que, quando combinada com o carregamento cíclico externo (fadiga), acelera drasticamente a nucleação e propagação de trincas (Driemeier, 1995). Portanto, para o PLA em regimes de fadiga, a otimização térmica (mantendo o preenchimento baixo/10%) é mais crítica do que o ganho marginal de rigidez fornecido pelo preenchimento alto, especialmente quando a casca externa já é robusta.

A alta velocidade de deposição (80 mm/s) demonstrou ser significativamente melhor (efeito positivo de +2026,25). A teoria clássica de FDM sugere que velocidades mais baixas (20 mm/s) permitem maior tempo de residência e fusão, otimizando a difusão molecular e a adesão intercamadas (Yu et al., 2022).

A explicação para este resultado reside, novamente, no controle térmico e cinético:

- Redução do Self-Heating: A alta velocidade de deposição reduz o tempo total de impressão, limitando a exposição cumulativa ao calor e minimizando o *self-heating*.
- Densificação por pressão: A 80 mm/s, a impressora deve manter um alto fluxo de massa. Este alto fluxo gera uma pressão de extrusão mais intensa, que pode forçar o material fundido a preencher melhor os vazios *inter-raster* e a densificar a camada superficial, compensando o tempo de fusão reduzido.

A alta velocidade (80 mm/s), quando combinada com a baixa porcentagem de preenchimento (10%) e temperaturas controladas, minimiza o acúmulo de tensões internas sem comprometer drasticamente a adesão superficial.

Ambos os fatores térmicos apresentaram efeitos negativos (T. Bico -1366,75; T. Cama -1653,75), indicando que os níveis baixos testados (65 °C e 205 °C , respectivamente) são mais eficazes para maximizar Nf.

Embora o aumento da temperatura do bico (de 205 °C para 220 °C) seja tipicamente associado à melhoria da difusão molecular e do *Interlayer Bonding* (Hsueh et al., 2021), este estudo sugere que 220 °C ultrapassou o ponto ideal para o material específico (PLA Voolt 3D®). Temperaturas excessivas podem levar à perda de viscosidade e à degradação térmica localizada, introduzindo vazios indesejados ou resultando em um resfriamento descontrolado que gera maior retração e, consequentemente, tensões residuais e delaminação (Syrlybayev et al., 2021).

A baixa temperatura da mesa (65 °C) também contribui para o controle das tensões. A temperatura de transição vítrea do PLA é 55 °C. Manter a mesa a 75 °C (nível alto) mantém o material em um estado mais relaxado por mais tempo, exacerbando as tensões internas quando o resfriamento final ocorre, o que é prejudicial sob carregamento cíclico. A temperatura de 65 °C parece oferecer um equilíbrio entre adesão inicial e minimização da tensão residual.

3.1. Análise da configuração ótima e da falha catastrófica / Analysis of Optimal Configuration

and Catastrophic Failure

A configuração que resultou no desempenho máximo (Peça 2, 9485 ciclos) combinou os níveis de parâmetros otimizados:

- Alta velocidade (A+) → **80 mm/s**;
- Baixa temperatura do bico (C-) → **205 °C**;
- Baixa temperatura da cama (B-) → **65 °C**;
- Baixa altura de camada (D-) → **0,12 mm**;
- Alta espessura de parede (F+) → **2 mm**;
- Baixo preenchimento (G-) → **10%**.

A sinergia entre alta parede (F+) e baixa altura de camada (D-) garantiu uma casca externa forte e minimamente rugosa, minimizando a nucleação de trincas. Simultaneamente, o uso de baixo preenchimento (G-) e temperaturas baixas (B-, C-), facilitadas pela alta velocidade (A+), mitigou problemas termodinâmicos críticos (self-heating e tensões residuais), permitindo que o componente atingisse uma vida em fadiga significativamente superior.

A configuração de pior desempenho (Peça 8, 11 ciclos) combinou:

- Baixa velocidade (A-) → **20 mm/s**
- Alta temperatura da cama (B+) → **75 °C**
- Baixa temperatura do bico (C-) → **205 °C**
- Baixa altura de camada (D-) → **0,12 mm**
- Baixo preenchimento (G-) → **10%**
- Baixa espessura de parede (F-) → **0,8 mm**

Embora a altura da camada (D-) e o preenchimento (G-) estivessem em seus níveis otimizados, a combinação de parede fina (0.8 mm) e baixo preenchimento (10%) resultou em uma seção transversal estruturalmente frágil. Sob a tensão imposta pela flexão rotativa, a falta de massa periférica robusta levou à ruptura imediata. Nesses casos, o componente falha quase instantaneamente, caracterizando uma falha por sobrecarga estática na prática, em vez de uma falha gradual por propagação de trinca de fadiga. Isso reforça que a espessura da parede (F) é o parâmetro de controle de qualidade mais fundamental na região de tensão máxima.

4. Conclusão / Conclusion

Esta pesquisa demonstrou que os parâmetros de impressão em manufatura aditiva via FDM exercem influência significativa na resistência à fadiga de corpos de prova em PLA, com ênfase na gestão térmica e na qualidade da superfície para mitigar falhas prematuras. Os achados principais revelam que uma maior espessura de parede (2,0 mm) e velocidades de deposição elevadas (80 mm/s), combinadas com níveis baixos de preenchimento (10%), altura de camada (0,12 mm) e temperaturas (cama a 65°C e bico a 205°C), otimizam a vida útil sob carregamentos cíclicos, reduzindo tensões residuais e concentradores de tensão. O padrão triangular de preenchimento também se mostrou superior ao giroide. Esses resultados validam a utilidade do método Plackett-

Burman para identificar fatores dominantes de forma eficiente, estabelecendo bases para diretrizes de otimização que elevam a confiabilidade de componentes impressos em aplicações críticas, como aeroespacial e automotiva.

Agradecimentos / Acknowledgements

Agradeço à minha noiva, Emanuelle, por estar ao meu lado em todos os momentos e pelo constante apoio às minhas iniciativas. À minha família, pela base sólida, incentivo e força que sempre me proporcionaram na busca pelo meu melhor.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora pela disponibilização dos laboratórios e pelo ensino de qualidade que tornou possível o desenvolvimento deste estudo.

Referências / References

- ACIERNO, D.; PATTI, A.** Fused Deposition Modelling (FDM) of Thermoplastic-Based Filaments: Process and Rheological Properties—An Overview. *Materials*, v. 16, n. 24, p. 7664, 2023.
- AHMAD, M. N.; YAHYA, A.** Effects of 3D Printing Parameters on Mechanical Properties of ABS Samples. *Designs*, v. 7, p. 136, 2023.
- AHMAD, N. F. N.; WONG, Y. H.; GHAZALI, N. N. N.** A systematic review of fused deposition modeling process parameters. *Soft Science*, v. 2, p. 11, 2022.
- ALVES, D. N.; FERREIRA, Y. L. L.** Projeto de máquina de ensaio de fadiga de flexão de deslocamento prescrito. 2023. 50 f. Projeto Final (Engenharia Mecânica) – CEFET/RJ, 2023.
- BAKHTIARI, H.; AAMIR, M.; TOLOUEI-RAD, M.** Effect of 3D Printing Parameters on the Fatigue Properties of Parts Manufactured by Fused Filament Fabrication: A Review. *Applied Sciences*, v. 13, p. 904, 2023.
- BEYNON, J.** Concorde Accident Investigation Report. Air Accidents Investigation Branch (AAIB), 2001.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G.** Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- CARTA, M. et al.** Improving Surface Roughness of FDM-Printed Parts Through CNC Machining: A Brief Review. *Journal of Composite Science*, v. 9, p. 296, 2025.
- COSTA, R. F.; BARROS, T. M.; LIMA, F. R.** Fatigue Analysis of FDM-Printed PLA Components under Cyclic Loading Conditions. *Journal of Polymer Engineering*, v. 43, n. 5, p. 411–425, 2023.
- DOWLING, N. E.** Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. 4. ed. Pearson, 2013.
- DRIEMEIER, L.** Considerações sobre a fadiga em metais e o comportamento do concreto sob solitação cíclica. 1995. Dissertação (Mestrado) – USP, São Carlos, 1995.

DUPONT, J. P. de M. Caracterização do comportamento à compressão de PLA e PC fabricados por filamento fundido. Instituto Superior Técnico, 2022.

EZEH, O.; SUSMEL, L. Fatigue behaviour of additively manufactured polylactide (PLA). *Procedia Structural Integrity*, v. 13, p. 728–734, 2018.

FORSTER, A. M. Materials testing standards for additive manufacturing of polymer materials: state of the art and standards applicability. NISTIR 8059, 2015.

GOH, G. D. et al. Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): challenges and potential. *Aerospace Science and Technology*, v. 63, p. 140–151, 2017.

GINDRO, R. R. Correlação entre tensões de fadiga de corpos com superfícies polidas e corpos com rugosidade. 2016. TCC (Engenharia Mecânica) – Mauá, 2016.

HORASAN, M.; SARAC, I. The fatigue responses of 3D-printed polylactic acid (PLA) parts with varying raster angles and printing speeds. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v. 47, n. 10, p. 3693–3706, 2024.

HSUEH, M. H. et al. Effect of printing parameters on the thermal and mechanical properties of 3D-printed PLA and PETG using FDM. *Polymers*, v. 13, p. 1758, 2021.

KIM, S. et al. Fatigue Life Assessment of Wind Turbine Blades under Variable Load Conditions. *Renewable Energy*, v. 146, p. 1695–1705, 2020.

LADEIRA, I. J. D.; CALLICCHIO, L. Manufatura aditiva de materiais metálicos: métodos, procedimentos e produtos. TCC – Mackenzie, São Paulo, 2021.

LAGES, M. da S. et al. Desenvolvimento de uma máquina para ensaio de fadiga por flexão. *Matéria*, v. 24, n. 1, Art. 638, 2019.

LUOMA, A. Testing 1-2-3: Experimental Design with Applications in Marketing and Service Operations. *International Statistical Review*, v. 75, p. 431, 2007.

MACEDO, B. Z. Estudo do comportamento em fadiga de alto ciclo da liga Ti-35Nb-7Zr para aplicações biomédicas. Tese (Doutorado), USP, 2018.

MANUFATURA ADITIVA/IMPRESSÃO 3D DIRECIONADA À SUSTENTABILIDADE. MIX *Sustentável*, v. 10, n. 2, p. 81–90, 2024.

MARTINI, M. et al. An outline of fused deposition modeling: system models and control strategies. *Applied Sciences*, v. 12, p. 5400, 2022.

MIWA, V. H. S. Análise numérica e experimental da vida em fadiga do polímero ABS impresso em 3D. TCC – UnB, 2022.

MONTERO, M. et al. Material characterization of FDM ABS by designed experiments. *Society of Manufacturing Engineers*, v. 10, p. 1–21, 2001.

MORETTINI, G. et al. Comprehensive characterization of PLA printed structures. *Progress in Additive Manufacturing*, v. 7, n. 5, p. 1111–1122, 2022.

- MORETTINI, G. et al.** On the combined use of ASED and ECC for fracture load prediction. *Procedia Structural Integrity*, v. 47, p. 296–309, 2023.
- NABAVI-KIVI, A. et al.** Fracture analysis of 3D-printed ABS: effects of raster angle. *Physical Mesomechanics*, v. 2, n. 1, p. 19–32, 2023.
- NORTON, R. L.** Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2017.
- NTSB.** Collapse of I-35W Highway Bridge, Minneapolis, Minnesota. NTSB/HAR-08/03, 2008.
- OMER, M. A. E. et al.** Advances in interlayer bonding in fused deposition modelling. *Virtual and Physical Prototyping*, v. 20, n. 1, 2025.
- ONWUBOLU, G. C.; RAYEGANI, F.** Characterization and optimization of ABS parts by FDM. *Int. J. Manufacturing Engineering*, 2014.
- PEREIRA, T. et al.** Influência do preenchimento e altura de camada em PLA impresso via FDM. *Desafios*, v. 8, p. 95–103, 2021.
- PÔNTE, F. S.** Desafios dos laboratórios de impressão 3D no contexto da COVID-19. Dissertação – UCS, 2022.
- PRADO, A. N.; MATTOS, É. C. A.; RODRIGUES, F. S.** Manufatura aditiva: conceitos, aplicações e impactos na gestão. *EIGEDIN*, v. 3, n. 1, 2019.
- RANKIN, A. et al.** Optimization of fatigue performance of FDM ABS and Nylon printed parts. *Micromachines*, v. 14, p. 304, 2023.
- RODRIGUES, R. S.** Otimização da impressão 3D por FDM em próteses infantis. Tese – UDESC, 2025.
- SANTOS, R.; LIMA, F.; PEREIRA, A.** Fadiga em estruturas mecânicas e biomédicas: revisão. *Revista Matéria*, v. 26, n. 3, 2021.
- SING, S. L.; YEONG, W. Y.** Process–structure–properties in polymer. *Polymers*, v. 13, p. 13–14, 2021.
- SIRIVASTAVA, M.; RATHEE, S.** Additive manufacturing: recent trends and applications. *Progress in Additive Manufacturing*, v. 7, p. 261–287, 2022.
- SCOZZAFAVE, C. C.** Metodologia de análise de fadiga via CAE. Dissertação – USP, 2014.
- STEPHENS, R. I. et al.** Metal Fatigue in Engineering. 2. ed. Wiley-Interscience, 2001.
- SURESH, S.** Fatigue of Materials. 2. ed. Cambridge University Press, 1998.
- SYRLYBAYEV, D. et al.** Optimisation of strength properties of FDM printed parts. *Polymers*, v. 13, p. 1587, 2021.
- YU, W. et al.** Effects of printing parameters on properties of FDM PLA biomaterials. *Molecules*, v. 27, p. 7373, 2022.

ZOHDI, N.; YANG, R. C. Material anisotropy in additively manufactured polymers: a review.
Polymers, v. 13, p. 3368, 2021.