

MODIFICAÇÃO DE MATERIAL NO PROCESSO DE CONFECÇÃO DE ENGRENAGEM: APLICAÇÃO DE IMPRESSÃO 3D EM PLA EM DISPOSITIVO DE BANHO DE LÂMINAS

**MATERIAL MODIFICATION IN THE GEAR MANUFACTURING PROCESS:
APPLICATION OF PLA 3D PRINTING TO A BLADE BATH DEVICE**

Engenharias • 21/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/789963669](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/789963669)

Donivaldo Moura Pereira¹

Siomara Dias da Rocha²

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre materiais e processos de fabricação de uma engrenagem utilizada em um dispositivo de banho de lâminas, visando avaliar a manufatura aditiva como alternativa à fabricação convencional por usinagem. Tradicionalmente, a peça era confeccionada em nylon em torno mecânico, seguida da usinagem dos dentes em máquina CNC. Como alternativa, foi desenvolvida a fabricação por impressão 3D utilizando ácido polilático (PLA). A engrenagem possui 26 mm de comprimento, diâmetros de 34 e 47 mm nas seções não dentada e dentada, furo passante de 30 mm e 28 dentes. A fabricação experimental foi realizada em impressora Creality K2 Plus, com altura de camada de 0,8 mm, cinco camadas superiores, três inferiores e preenchimento de 100%. O tempo de impressão foi de aproximadamente 34 minutos, enquanto o processo convencional demandava cerca de 40 a 50 minutos, considerando usinagem e CNC. A análise econômica indicou redução do custo de aproximadamente R\$ 2.000,00 para R\$ 500,00 por engrenagem. Para 16 unidades, estima-se economia de R\$ 24.000,00. Durante a avaliação, a engrenagem em PLA apresentou desempenho funcional e durabilidade próximas às da peça convencional. Os resultados demonstram o potencial da manufatura aditiva para reduzir custos, tempo de fabricação e operações de usinagem em aplicações específicas.

Palavras-chave: engrenagem; manufatura aditiva; impressão 3D; PLA; nylon; usinagem CNC; redução de custos.

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of the materials and manufacturing processes used to produce a gear employed in a blade bath device, aiming to evaluate additive manufacturing as an

alternative to conventional machining. Traditionally, the component was manufactured from nylon using a mechanical lathe, followed by CNC machining to produce the gear teeth. As an alternative, the gear was manufactured by 3D printing using polylactic acid (PLA). The gear has a total length of 26 mm, diameters of 34 and 47 mm in the non-toothed and toothed sections, respectively, a 30 mm through-hole, and 28 teeth. Experimental manufacturing was performed using a Creality K2 Plus 3D printer, with a layer height of 0.8 mm, five top layers, three bottom layers, and 100% infill. The printing time was approximately 34 minutes, whereas the conventional manufacturing process required approximately 40 to 50 minutes, considering machining and CNC operations. The economic analysis indicated a reduction in the estimated cost from approximately R\$ 2,000.00 to R\$ 500.00 per gear. For 16 units, estimated savings amounted to R\$ 24,000.00. During the evaluation, the PLA gear exhibited functional performance and observed durability comparable to those of the conventional component. The results demonstrate the potential of additive manufacturing to reduce costs, manufacturing time, and machining operations in specific applications.

Keywords: gear; additive manufacturing; 3D printing; PLA; nylon; CNC machining; cost reduction.

1. INTRODUÇÃO

A indústria contemporânea tem buscado continuamente processos de fabricação capazes de associar qualidade, produtividade, redução de custos e flexibilidade na produção de componentes. Nesse cenário, a manufatura aditiva tem adquirido relevância por possibilitar a transformação direta de modelos digitais tridimensionais em peças físicas, reduzindo etapas intermediárias e

favorecendo a produção de componentes personalizados ou de reposição. Entre as tecnologias disponíveis, a fabricação por extrusão de material, especialmente a *Fused Filament Fabrication* (FFF), destaca-se pela simplicidade operacional, acessibilidade e possibilidade de utilização de materiais termoplásticos. Essas características ampliam sua aplicação na fabricação de protótipos e componentes funcionais (SANDANAMSAMY et al., 2023).

A impressão 3D por deposição de filamento apresenta particular interesse para a produção de peças que anteriormente dependiam de processos convencionais de usinagem. Diferentemente da fabricação subtrativa, na qual o componente é obtido pela remoção progressiva de material, a manufatura aditiva constrói a peça pela deposição sucessiva de camadas, permitindo a fabricação de geometrias complexas a partir de um modelo CAD.

Essa característica pode reduzir o número de operações necessárias, além de facilitar alterações no projeto e a reprodução de componentes. Entretanto, o desempenho final da peça depende diretamente das condições empregadas durante a fabricação, como orientação, espessura de camada, velocidade de impressão, temperatura e preenchimento (COJOCARU et al., 2022; MEDIBEW, 2022).

Entre os materiais empregados na tecnologia FFF, o ácido polilático (PLA) apresenta ampla utilização devido à sua facilidade de processamento, disponibilidade comercial e comportamento adequado para diferentes aplicações de prototipagem e fabricação de componentes. Apesar dessas vantagens, as propriedades mecânicas e dimensionais das peças produzidas não dependem

somente do material, mas também dos parâmetros de impressão selecionados.

Estudos demonstram que fatores como orientação de construção, temperatura, espessura de camada e estratégia de preenchimento podem alterar significativamente a resistência e a qualidade final das peças fabricadas em PLA (SANDANAMSAMY et al., 2023; TANVEER et al., 2022).

A utilização de PLA na fabricação de engrenagens apresenta, portanto, uma oportunidade relevante para avaliar a substituição de processos convencionais de fabricação. Engrenagens produzidas por FFF podem apresentar precisão dimensional adequada para determinadas aplicações, embora características geométricas, como circularidade, concentricidade e dimensões dos dentes, devam ser consideradas na avaliação de seu desempenho. Buj-Corral e Zayas-Figueras (2023), ao compararem engrenagens fabricadas em PLA e nylon por FFF, verificaram diferenças nos erros dimensionais e de forma entre os materiais, evidenciando a importância da seleção adequada do material e dos parâmetros de fabricação para aplicações envolvendo componentes mecânicos.

Além da precisão dimensional, a capacidade da engrenagem de suportar esforços durante o funcionamento constitui um fator essencial para a substituição de uma peça convencional por uma peça impressa. Em componentes submetidos a carregamentos repetitivos, parâmetros como densidade de preenchimento podem influenciar diretamente a resistência e a vida em fadiga.

Muminovic et al. (2023), em estudo experimental com engrenagens de PLA produzidas por manufatura aditiva, observaram que o

aumento do percentual de preenchimento esteve associado ao aumento da vida em fadiga e a alterações nos mecanismos de falha. Dessa forma, a avaliação de uma engrenagem impressa deve considerar não apenas o custo e o tempo de fabricação, mas também sua capacidade de manter o funcionamento adequado quando instalada no equipamento.

Diante desse contexto, o presente trabalho avalia a substituição do processo convencional de fabricação de uma engrenagem utilizada em um dispositivo de banho de lâminas. Originalmente, a peça era confeccionada em nylon mediante operações de torno mecânico e usinagem CNC, envolvendo diferentes etapas de preparação, execução e acabamento. Como alternativa, foi proposta a fabricação direta da engrenagem por impressão 3D utilizando PLA, buscando simplificar o processo produtivo e reduzir o custo e o tempo necessários para obtenção do componente.

Assim, o estudo tem como objetivo avaliar tecnicamente e economicamente a alternativa proposta, considerando as dimensões da peça, os parâmetros de impressão, o tempo de fabricação, o custo estimado e o comportamento funcional da engrenagem instalada no equipamento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Manufatura Aditiva e Impressão 3D

A manufatura aditiva corresponde a um conjunto de processos de fabricação nos quais componentes são produzidos pela adição sucessiva de material, normalmente a partir de um modelo digital tridimensional. Essa característica diferencia a tecnologia dos processos convencionais de fabricação subtrativa, nos quais a

geometria é obtida pela remoção de material de um bloco ou peça inicial. Entre suas principais vantagens estão a possibilidade de produzir geometrias complexas, reduzir etapas de fabricação e diminuir o tempo necessário entre o desenvolvimento do projeto e a obtenção do componente físico (COJOCARU et al., 2022). Dessa forma, a tecnologia vem ampliando sua aplicação para além da prototipagem, alcançando a fabricação de componentes funcionais e peças de reposição.

Entre as tecnologias de manufatura aditiva destinadas a materiais poliméricos, destaca-se a Fused Filament Fabrication (FFF), também denominada Fused Deposition Modeling (FDM). Nesse processo, um filamento termoplástico é conduzido até um bico aquecido, onde ocorre sua fusão e posterior deposição sobre uma plataforma, formando a peça por meio da sobreposição de camadas. A simplicidade do processo, a disponibilidade de equipamentos e o baixo custo relativo dos materiais tornam a FFF uma das tecnologias mais acessíveis para fabricação de componentes poliméricos (PAZHAMANNIL et al., 2022).

A utilização da impressão 3D para fabricação de componentes funcionais apresenta, entretanto, diferenças importantes em relação às peças obtidas por processos convencionais. As propriedades finais do componente impresso dependem não somente do material utilizado, mas também das condições de fabricação. Espessura de camada, velocidade de impressão, temperatura do bico, temperatura da mesa, orientação da peça e ângulo de deposição constituem parâmetros capazes de modificar o comportamento mecânico e dimensional do produto final (COJOCARU et al., 2022). Assim, a substituição de um processo convencional pela impressão 3D requer avaliação das condições específicas de fabricação da peça.

2.2. Fabricação por FFF e Parâmetros de Impressão

A fabricação por FFF apresenta como característica fundamental a construção da peça pela deposição de cordões de material termoplástico em diferentes camadas. Durante esse processo, a união entre os cordões depositados influencia diretamente a integridade estrutural do componente. Dessa maneira, embora a geometria externa seja definida pelo modelo tridimensional, as características internas da peça são determinadas por parâmetros como densidade e padrão de preenchimento, número de paredes, altura das camadas e orientação de fabricação (TRAN et al., 2022).

A influência dos parâmetros de processo sobre as propriedades dos componentes impressos é amplamente discutida na literatura. Cojocar et al. (2022), em uma revisão sistemática sobre peças de PLA produzidas por FFF, destacam que espessura de camada, velocidade de impressão, temperatura de extrusão, temperatura da plataforma, orientação de construção e ângulo de deposição apresentam influência sobre as propriedades mecânicas. Os autores também ressaltam que a previsibilidade do comportamento de peças impressas é um dos principais requisitos para ampliar a utilização da tecnologia em aplicações industriais.

Outro parâmetro de importância é a densidade de preenchimento (infill), responsável por determinar a quantidade de material presente no interior da peça. A utilização de diferentes percentuais de preenchimento permite modificar a massa, o consumo de filamento, o tempo de impressão e a resistência do componente. Tran et al. (2022) apontam que o controle dos parâmetros de fabricação constitui uma estratégia importante para melhorar o desempenho mecânico de peças produzidas por FFF,

especialmente quando destinadas a aplicações que exigem maior resistência.

2.3. PLA Como Material para Fabricação de Componentes

O ácido polilático (PLA) é um dos materiais termoplásticos mais empregados na fabricação por FFF. Sua ampla utilização está associada à facilidade de processamento, à disponibilidade comercial, ao baixo custo relativo e à temperatura de processamento compatível com diferentes equipamentos de impressão 3D. Além disso, o PLA apresenta propriedades mecânicas que permitem sua utilização na fabricação de protótipos e determinados componentes funcionais (COJOCARU et al., 2022).

Apesar dessas características favoráveis, o comportamento de uma peça de PLA impressa em 3D não pode ser considerado equivalente ao de uma peça maciça produzida por processos convencionais. A deposição em camadas pode produzir comportamento anisotrópico, fazendo com que a resistência dependa da direção de construção e da forma como os cordões de material estão orientados. Segundo Tran et al. (2022), a anisotropia mecânica constitui uma das principais limitações da FFF, estando relacionada à formação de interfaces entre camadas e à presença de descontinuidades internas.

Nesse sentido, a seleção do PLA para a fabricação de uma engrenagem deve considerar não apenas a facilidade de impressão, mas também os requisitos funcionais do componente. Para aplicações submetidas a esforços repetitivos, fatores como densidade de preenchimento, orientação de impressão e geometria da peça tornam-se relevantes para determinar sua resistência e vida

útil. Portanto, a utilização do PLA como alternativa ao nylon deve ser acompanhada da avaliação do desempenho da engrenagem no equipamento em que será instalada.

2.4. Engrenagens Poliméricas e Aplicação da Impressão 3D

As engrenagens constituem elementos mecânicos responsáveis pela transmissão de movimento e torque entre eixos, sendo utilizadas em diferentes tipos de máquinas e dispositivos. A utilização de materiais poliméricos em engrenagens pode apresentar vantagens relacionadas à redução de massa, menor custo de fabricação e possibilidade de funcionamento com menores níveis de ruído e vibração em determinadas aplicações. Entretanto, características como resistência, desgaste, estabilidade dimensional e precisão geométrica devem ser consideradas na seleção do material e do processo de fabricação.

A fabricação de engrenagens por impressão 3D tem sido investigada como alternativa para obtenção de componentes funcionais. Buj-Corral e Zayas-Figueras (2023) realizaram um estudo comparativo entre engrenagens produzidas por FFF utilizando PLA e Nylon-PA6, avaliando características relacionadas à precisão dimensional e aos erros de forma. Os resultados indicaram que, de maneira geral, as engrenagens produzidas em PLA apresentaram melhor precisão dimensional que aquelas fabricadas em nylon, embora diferenças relacionadas à circularidade, concentricidade e ao percentual de preenchimento também tenham sido observadas.

Esse resultado é particularmente relevante para o presente estudo, uma vez que a peça analisada originalmente é fabricada em nylon e a alternativa proposta utiliza PLA. A comparação entre os dois

materiais não deve, portanto, restringir-se ao custo ou à facilidade de fabricação, mas também considerar a capacidade da engrenagem impressa de reproduzir adequadamente as dimensões necessárias para seu acoplamento e funcionamento. A precisão dos dentes, dos diâmetros e da região de montagem pode interferir diretamente na transmissão do movimento e no comportamento do conjunto mecânico.

2.5. Desempenho Mecânico e Vida Útil de Engrenagens Impressas

Além da precisão dimensional, o desempenho mecânico representa um dos principais critérios para avaliar a viabilidade da substituição de uma engrenagem convencional por uma peça fabricada por impressão 3D. Durante a operação, os dentes da engrenagem são submetidos a esforços repetitivos decorrentes do contato entre as superfícies, podendo ocorrer mecanismos de falha associados à deformação, desgaste, fratura ou fadiga. Por essa razão, a simples obtenção de uma peça geometricamente semelhante não garante que ela apresente o mesmo comportamento da peça original.

Muminović et al. (2023) avaliaram experimentalmente engrenagens de PLA produzidas por manufatura aditiva, investigando a influência do percentual de preenchimento sobre a vida em fadiga e os modos de falha. Os resultados demonstraram que o aumento do percentual de preenchimento proporcionou aumento significativo da vida em fadiga das engrenagens, além de modificar os tipos de falha observados durante os ensaios.

Esse resultado demonstra que o percentual de preenchimento não deve ser considerado apenas como um parâmetro relacionado ao

consumo de material e ao tempo de impressão. Para componentes submetidos a carregamentos cíclicos, como engrenagens, esse parâmetro pode assumir importância estrutural. Consequentemente, a avaliação da engrenagem proposta neste trabalho deve considerar a relação entre os parâmetros empregados na impressão, o consumo de material, o tempo de fabricação e o comportamento funcional observado após a instalação no dispositivo.

2.6. Fabricação Convencional Versus Manufatura Aditiva

A fabricação convencional de componentes mecânicos pode envolver operações como torneamento, fresamento, furação e usinagem CNC, dependendo da geometria e das tolerâncias requeridas. No caso de uma engrenagem produzida a partir de nylon, o processo pode demandar diferentes etapas para preparação do material, obtenção da geometria básica e formação dos dentes. Cada operação acrescenta tempo de processamento, necessidade de preparação de máquinas e utilização de recursos humanos e materiais.

A manufatura aditiva apresenta uma abordagem distinta, uma vez que o componente pode ser produzido diretamente a partir de seu modelo tridimensional, reduzindo a quantidade de operações intermediárias. Pazhamannil et al. (2022) destacam que a FFF apresenta vantagens relacionadas à simplicidade do processo, ao custo e à possibilidade de fabricação de geometrias complexas, embora limitações relacionadas ao acabamento superficial e às propriedades mecânicas ainda representem desafios para aplicações de maior exigência.

Nesse contexto, a comparação entre os dois processos deve considerar não somente o preço do material utilizado, mas o conjunto de recursos envolvidos na fabricação. O tempo de preparação, o tempo efetivo de produção, o consumo de material, a necessidade de máquinas e ferramentas e a possibilidade de reprodução rápida da peça constituem fatores importantes para a análise. A impressão 3D pode apresentar vantagem especialmente quando há necessidade de fabricar uma quantidade reduzida de componentes ou realizar rapidamente a reposição de uma peça.

2.7. Estado da Arte Aplicado Ao Problema Estudado

A literatura recente demonstra que a fabricação de componentes mecânicos por FFF apresenta potencial para substituir determinados processos convencionais, principalmente quando são consideradas peças de baixa complexidade produtiva, protótipos funcionais e componentes de reposição. Entretanto, a viabilidade dessa substituição depende das características específicas da aplicação. No caso das engrenagens, os estudos disponíveis demonstram que aspectos como precisão dimensional, material, preenchimento e comportamento à fadiga devem ser analisados conjuntamente.

Os trabalhos de Buj-Corral e Zayas-Figueras (2023) e Muminović et al. (2023) são particularmente relevantes para este estudo por abordarem diretamente engrenagens produzidas em PLA por FFF. Enquanto o primeiro trabalho concentra-se na precisão dimensional e nos erros geométricos de engrenagens produzidas em PLA e nylon, o segundo investiga a influência do preenchimento sobre a vida em fadiga de engrenagens de PLA.

Dessa forma, identifica-se uma oportunidade de investigação aplicada na comparação entre uma engrenagem originalmente fabricada por processos convencionais e uma alternativa produzida diretamente por impressão 3D. Embora a literatura demonstre a viabilidade técnica da produção de engrenagens em PLA, ainda é necessário avaliar essa solução considerando as condições reais de utilização de cada equipamento. Nesse sentido, o presente trabalho busca contribuir para essa discussão por meio da análise conjunta das dimensões, parâmetros de impressão, tempo de fabricação, custo e comportamento funcional da engrenagem produzida em PLA.

3. METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem predominantemente quantitativa e caráter experimental, complementada por observação prática. O estudo foi desenvolvido a partir de uma peça real utilizada em um dispositivo de banho de lâminas, tendo como foco a comparação entre o processo convencional de fabricação da engrenagem em nylon e a alternativa de fabricação por impressão 3D em PLA.

Inicialmente, foi analisado o processo convencional, no qual a engrenagem era confeccionada em nylon por meio de torno mecânico e, posteriormente, submetida à usinagem CNC para obtenção dos dentes. O tempo estimado foi de aproximadamente 10 a 15 minutos para o desbaste inicial, 10 a 15 minutos para o acabamento e cerca de 20 minutos para a etapa CNC, totalizando aproximadamente 40 a 50 minutos de fabricação, sem considerar eventuais tempos adicionais de preparação e ajustes.

Na etapa seguinte, a geometria da engrenagem foi preparada para fabricação aditiva e reproduzida em PLA, utilizando uma impressora Creality K2 Plus. A configuração informada para a impressão utilizou altura de camada de 0,8 mm, cinco camadas superiores, três camadas inferiores e preenchimento de 100%. A peça foi então fabricada diretamente por deposição de filamento, eliminando as etapas de usinagem empregadas no processo convencional.

Após a impressão, a engrenagem foi instalada no dispositivo de banho de lâminas para avaliação prática de seu funcionamento. Foram observados o encaixe da peça, a transmissão do movimento e a ocorrência de falhas ou alterações durante a operação. Para a comparação entre os processos foram considerados como principais indicadores o tempo de fabricação, o custo estimado, a funcionalidade e a durabilidade observada.

Os dados obtidos foram organizados de forma comparativa entre os dois métodos de fabricação. A análise considerou os aspectos produtivos, econômicos e funcionais, buscando verificar a viabilidade da utilização da manufatura aditiva como alternativa à fabricação convencional da engrenagem, considerando as condições reais de aplicação do componente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

4.1. Comparação Entre os Processos de Fabricação

A primeira etapa do estudo consistiu na análise do processo convencional de fabricação da engrenagem em nylon. Inicialmente, a geometria da peça era obtida em torno mecânico, sendo empregados aproximadamente 10 a 15 minutos para o desbaste e entre 10 e 15 minutos para o acabamento. Posteriormente, a peça era

encaminhada para a máquina CNC, onde eram confeccionados os dentes, em um tempo informado de aproximadamente 20 minutos. Dessa forma, o tempo total estimado de processamento situava-se entre 40 e 50 minutos por engrenagem, sem considerar possíveis períodos adicionais relacionados à preparação, fixação, programação, movimentação e ajustes dos equipamentos. O processo convencional de fabricação da engrenagem era iniciado pela obtenção da geometria básica em torno mecânico, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1. Confeção da geometria inicial da engrenagem no torno mecânico.



Fonte: Acervo do autor (2026).

A segunda alternativa consistiu na fabricação direta da engrenagem por impressão 3D, utilizando PLA e uma impressora Creality K2 Plus. Nesse processo, o corpo da peça e os dentes foram produzidos em uma única operação de fabricação, eliminando a necessidade das

etapas de torneamento e posterior usinagem CNC. O tempo registrado para a fabricação foi de aproximadamente 34 minutos.

A comparação evidencia uma redução do tempo direto de fabricação. Considerando o menor tempo do processo convencional, de 40 minutos, a impressão 3D proporcionou redução de aproximadamente 6 minutos; em relação ao maior tempo estimado, de 50 minutos, a redução alcançou 16 minutos. Assim, o processo aditivo apresentou uma redução aproximada de 15% a 32% no tempo direto de fabricação, dependendo da condição utilizada como referência. Como alternativa ao processo convencional, a engrenagem foi produzida diretamente por impressão 3D em PLA, utilizando a impressora Creality K2 Plus, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2. Confeção da engrenagem em impressora 3D Creality K2 Plus.



Fonte: Acervo do autor (2026).

Esse resultado está de acordo com a característica fundamental da manufatura aditiva de reduzir etapas intermediárias entre o modelo digital e a obtenção da peça física. Cojocarú et al. (2022) destacam que a fabricação por FFF permite a obtenção direta de componentes a partir de modelos tridimensionais, embora o comportamento final das peças dependa de diversos parâmetros de fabricação.

No presente estudo, essa característica foi particularmente relevante, pois a fabricação convencional dependia de duas operações principais torneamento e usinagem CNC enquanto a impressão 3D concentrou a obtenção da geometria em um único processo. Entretanto, a redução do número de operações não deve ser interpretada isoladamente como superioridade tecnológica, uma vez que requisitos de precisão, resistência, acabamento e condições de trabalho podem determinar a escolha do processo mais adequado.

4.2. Caracterização Dimensional da Engrenagem

A engrenagem estudada apresenta comprimento total de 26 mm. Em uma das regiões, possui diâmetro de 34 mm e extensão de 13 mm, sem dentes. Na região subsequente, apresenta diâmetro de 47 mm e extensão de 13 mm, onde estão localizados os dentes. A peça possui ainda furo passante de 30 mm e 28 dentes, conforme a Figura 3.

Figura 3. Engrenagem produzida por impressão 3D em PLA vista frontal, com 28 dentes.



Fonte: Acervo do autor (2026).

A manutenção dessas características geométricas foi fundamental para garantir a compatibilidade da peça impressa com o eixo e com as demais engrenagens do dispositivo. Nesse sentido, a fabricação aditiva mostrou-se capaz de reproduzir a geometria necessária para a aplicação analisada, permitindo a instalação da peça sem necessidade de alteração do conjunto.

O resultado apresenta relação direta com o estudo de Buj-Corral e Zayas-Figueras (2023), que compararam engrenagens produzidas por FFF em PLA e Nylon-PA6. Os autores avaliaram parâmetros

como espessura circular, passo de base, diâmetros externo e de fundo, circularidade e concentricidade, verificando que, de modo geral, as engrenagens produzidas em PLA apresentaram melhor precisão dimensional que aquelas produzidas em Nylon-PA6.

Embora o presente trabalho não tenha realizado uma análise metrológica tão detalhada quanto a empregada por Buj-Corral e Zayas-Figueras (2023), a compatibilidade dimensional observada após a fabricação e instalação indica que a geometria obtida por impressão foi suficiente para a aplicação estudada. Entretanto, essa constatação deve ser entendida como uma avaliação funcional, e não como comprovação de tolerâncias dimensionais equivalentes às obtidas por processos de usinagem de precisão.

4.3. Parâmetros de Impressão e Fabricação da Peça

A engrenagem foi produzida utilizando altura de camada de 0,8 mm, cinco camadas superiores, três camadas inferiores e preenchimento de 100%. A utilização de preenchimento integral resultou em uma estrutura interna completamente preenchida, condição que pode contribuir para o aumento da resistência do componente, embora também possa elevar o consumo de material em comparação com configurações de menor preenchimento.

A influência dos parâmetros de impressão sobre o comportamento das peças de PLA é amplamente reconhecida na literatura. Cojocar et al. (2022) destacam que parâmetros como espessura de camada, velocidade de impressão, temperatura de extrusão, temperatura da plataforma, orientação de construção e ângulo de deposição podem modificar as propriedades mecânicas dos componentes produzidos por FFF.

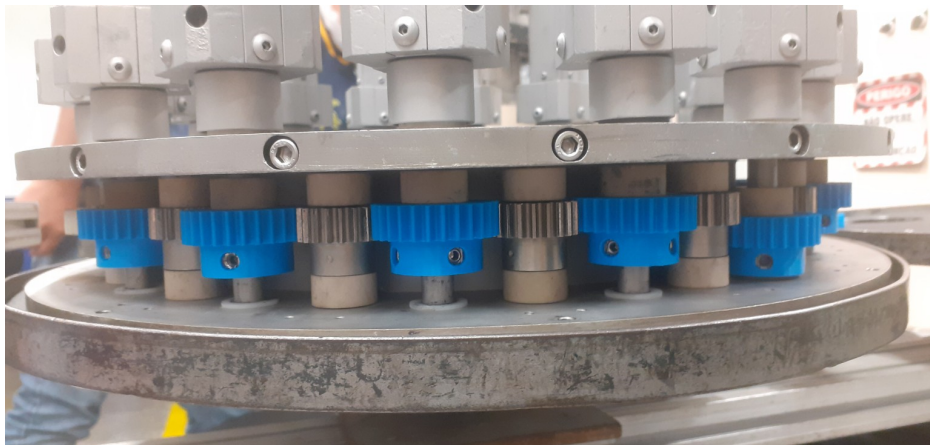
Especificamente para engrenagens, o percentual de preenchimento apresenta importância adicional. Muminović et al. (2023) investigaram experimentalmente engrenagens de PLA produzidas por manufatura aditiva e verificaram que o aumento do percentual de preenchimento esteve associado a aumento significativo da vida em fadiga, além de modificar os mecanismos de falha observados.

Nesse contexto, o preenchimento de 100% empregado no presente trabalho pode ser considerado coerente com a necessidade de obter uma peça destinada à transmissão de movimento e submetida a esforços durante a operação. Contudo, como não foram realizados ensaios controlados de fadiga, não é possível atribuir quantitativamente ao preenchimento integral a durabilidade observada. O parâmetro deve ser entendido como parte das condições de fabricação adotadas.

4.4. Aplicação da Engrenagem no Dispositivo de Banho de Lâminas

A engrenagem analisada integra um dispositivo de banho de lâminas composto por 16 engrenagens que trabalham de forma conjunta para transmitir e distribuir o movimento entre os elementos do sistema. A engrenagem produzida por impressão 3D foi posteriormente instalada no dispositivo de banho de lâminas, que possui um conjunto de 16 engrenagens trabalhando de forma integrada, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4. Dispositivo de banho de lâminas com o conjunto de engrenagens em operação.



Fonte: Acervo do autor (2026).

A substituição foi realizada diretamente em uma aplicação funcional, permitindo avaliar a engrenagem em condições reais de operação. Após sua instalação, a peça apresentou funcionamento satisfatório, com transmissão adequada do movimento e sem ocorrência de falhas visíveis durante o período de observação. A durabilidade observada foi considerada próxima à da engrenagem anteriormente utilizada em nylon.

Esse resultado é relevante porque demonstra que a alternativa proposta não se limitou à fabricação de um protótipo dimensionalmente semelhante, mas resultou em um componente efetivamente instalado no equipamento. Entretanto, a avaliação de durabilidade realizada neste estudo possui caráter observacional. Portanto, não deve ser interpretada como determinação da vida útil da engrenagem.

A literatura confirma que a avaliação da durabilidade de engrenagens produzidas por impressão 3D exige ensaios específicos. Muminović et al. (2023), por exemplo, utilizaram um dispositivo de ensaio de engrenagens submetidas a condições controladas de torque e velocidade para investigar fadiga e modos de falha. Os autores demonstraram que diferentes condições de

preenchimento produziram diferentes comportamentos de vida e falha.

Assim, o funcionamento satisfatório observado no presente estudo constitui evidência de viabilidade funcional preliminar, mas estudos posteriores poderão complementar essa avaliação mediante ensaios de desgaste, fadiga, torque e vida útil.

4.5. Análise Econômica

A comparação econômica apresentou diferença significativa entre os dois processos. A engrenagem convencional em nylon foi estimada em aproximadamente R\$ 2.000,00 por unidade, enquanto a engrenagem produzida em PLA apresentou custo estimado de aproximadamente R\$ 500,00 por unidade.

A diferença corresponde a uma economia estimada de R\$ 1.500,00 por engrenagem, equivalente a aproximadamente 75% de redução em relação ao custo informado para a fabricação convencional. A comparação entre os processos de fabricação quanto ao tempo, custo e quantidade de engrenagens pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação dos processos de fabricação.

Indicador	Processo convencional	Impressão 3D	Diferença
Tempo por peça	40–50 min	34 min	6–16 min
Custo por peça	R\$ 2.000,00	R\$ 500,00	R\$ 1.500,00
Redução estimada de custo	—	—	≈ 75%

Quantidade de engrenagens	16	16	—
Custo estimado para 16 peças	R\$ 32.000,00	R\$ 8.000,00	R\$ 24.000,00

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Considerando hipoteticamente a substituição das 16 engrenagens do dispositivo pelos mesmos valores unitários, o custo estimado passaria de R\$ 32.000,00 para R\$ 8.000,00, representando uma economia potencial de R\$ 24.000,00. Esse resultado reforça o potencial econômico da manufatura aditiva para a aplicação estudada.

Entretanto, os valores devem ser interpretados como estimativas baseadas nos custos informados para cada alternativa. Uma análise econômica industrial completa deveria incluir, além do material, custos de energia elétrica, depreciação e manutenção dos equipamentos, mão de obra, preparação do arquivo, tempo de operação, inspeção dimensional, eventuais falhas de impressão e pós-processamento.

Portanto, o resultado econômico demonstra uma vantagem expressiva da alternativa estudada, mas não permite generalizar que a impressão 3D será sempre 75% mais barata que a usinagem. A diferença dependerá do tipo de peça, material, quantidade produzida, equipamento utilizado, tempo de fabricação e requisitos dimensionais.

4.6. Comparação Técnica Entre os Processos

A comparação dos resultados demonstra que tanto o processo convencional quanto a impressão 3D foram capazes de fornecer uma engrenagem funcional para o dispositivo analisado. Entretanto, os processos apresentam características distintas. O processo convencional apresenta maior número de etapas e dependência de equipamentos específicos, como torno mecânico e máquina CNC. Por outro lado, oferece vantagens importantes quando são necessárias tolerâncias dimensionais rigorosas, materiais com propriedades específicas ou elevado controle sobre acabamento e geometria.

A impressão 3D, por sua vez, permitiu produzir diretamente a geometria completa da engrenagem, reduzindo as operações intermediárias e possibilitando a fabricação a partir do modelo digital. Essa característica é especialmente interessante para reposição de componentes, pequenas quantidades e situações nas quais a disponibilidade rápida da peça seja relevante.

Os resultados encontrados também são coerentes com Buj-Corral e Zayas-Figueras (2023), que demonstraram a possibilidade de fabricação de engrenagens por FFF em PLA e Nylon, embora tenham identificado diferenças de precisão dimensional e erros de forma entre os materiais.

Além disso, a literatura evidencia que o desempenho de componentes de PLA produzidos por FFF é dependente das condições de fabricação. Cojocarú et al. (2022) ressaltam que as propriedades mecânicas das peças podem ser influenciadas por diversos parâmetros do processo, o que reforça a necessidade de especificar as condições de impressão quando se pretende reproduzir um componente funcional.

Dessa forma, os resultados deste estudo indicam que a impressão 3D apresentou vantagem em tempo de fabricação, custo estimado e facilidade de reposição, além de demonstrar funcionamento satisfatório na aplicação avaliada. Contudo, a usinagem convencional permanece tecnicamente relevante para aplicações que demandem maior precisão, resistência ou condições de serviço incompatíveis com as características do PLA.

4.7. Síntese dos Resultados

Os resultados obtidos permitem considerar a fabricação da engrenagem em PLA por impressão 3D como uma alternativa tecnicamente viável para o dispositivo de banho de lâminas analisado. O tempo de fabricação foi reduzido de aproximadamente 40–50 minutos para 34 minutos, enquanto o custo estimado apresentou redução de aproximadamente 75%.

A principal contribuição do estudo, entretanto, está na demonstração da aplicação da peça em condições reais de funcionamento. A engrenagem produzida em PLA foi instalada no equipamento e apresentou funcionamento satisfatório durante o período de observação, indicando que a solução pode ser empregada como alternativa de reposição para a aplicação estudada.

Os resultados devem, contudo, ser interpretados dentro das condições específicas do experimento. A ausência de ensaios controlados de fadiga, desgaste, resistência e vida útil impede afirmar que a engrenagem em PLA apresenta desempenho equivalente ao nylon em todas as condições de operação. Assim, a principal conclusão dos resultados é a viabilidade técnica e

econômica preliminar da substituição, recomendando-se estudos posteriores para quantificar o desempenho mecânico e a vida útil do componente.

5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

A substituição da fabricação convencional da engrenagem em nylon pela fabricação por impressão 3D em PLA mostra-se tecnicamente e economicamente viável para a aplicação analisada, atendendo ao objetivo proposto de avaliar uma alternativa ao processo de torneamento e usinagem CNC.

A manufatura aditiva simplifica o processo de fabricação da engrenagem ao permitir a obtenção do corpo e dos dentes em uma única etapa, reduzindo a dependência de operações e equipamentos convencionais e favorecendo maior agilidade na produção e reposição do componente.

A engrenagem produzida em PLA apresenta compatibilidade dimensional e funcionamento satisfatório no dispositivo de banho de lâminas, demonstrando que a solução atende às condições funcionais observadas durante o período de avaliação.

A alternativa por impressão 3D também apresenta vantagem econômica para a condição estudada, indicando potencial de redução dos custos de fabricação e de maior acessibilidade para a reposição de componentes do equipamento.

Dessa forma, o objetivo geral da pesquisa foi atingido, uma vez que a alternativa proposta apresenta desempenho funcional adequado associado à redução do tempo e do custo estimado de fabricação.

Como limitação, destaca-se que a avaliação da durabilidade ocorre por observação prática, sem a realização de ensaios controlados de fadiga, desgaste, resistência mecânica e vida útil. Estudos futuros podem ampliar a investigação por meio de ensaios experimentais padronizados e da análise de diferentes parâmetros de impressão, materiais e condições de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUJ-CORRAL, Irene; ZAYAS-FIGUERAS, Enrique Ernesto. Comparative study about dimensional accuracy and form errors of FFF printed spur gears using PLA and Nylon. *Polymer Testing*, v. 117, art. 107862, p. 1-9, 2023. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107862. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014294182200383X>. Acesso em: 15 abr. 2026.

COJOCARU, Vasile; FRUNZEVERDE, Doina; MICLOSINA, Calin-Octavian; MARGINEAN, Gabriela. The influence of the process parameters on the mechanical properties of PLA specimens produced by fused filament fabrication—A review. *Polymers*, v. 14, n. 5, art. 886, 2022. DOI: 10.3390/polym14050886. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/5/886>. Acesso em: 22 abr. 2026.

MEDIBEW, Tesfaye Mengesha. A comprehensive review on the optimization of the fused deposition modeling process parameter for better tensile strength of PLA-printed parts. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2022, art. 5490831, p. 1-11, 2022. DOI: 10.1155/2022/5490831. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/5490831>. Acesso em: 30 abr. 2026.

MUMINOVIĆ, Adis J.; BRAUT, Sanjin; BOŽIĆ, Željko; PERVAN, Nedim; SKOBLAR, Ante. Experimental failure analysis of polylactic acid gears made by additive manufacturing. *Procedia Structural Integrity*, v. 46, p. 125-130, 2023. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.06.021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245232162300358X>. Acesso em: 8 maio 2026.

PAZHAMANNIL, Ribin Varghese; NAMBOODIRI V. N., Jishnu; GOVINDAN, P.; EDACHERIAN, Abhilash. Property enhancement approaches of fused filament fabrication technology: A review. *Polymer Engineering & Science*, v. 62, n. 5, p. 1356-1376, 2022. DOI: 10.1002/pen.25948. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pen.25948>. Acesso em: 18 maio 2026.

SANDANAMSAMY, L.; HARUN, W. S. W.; ISHAK, I.; ROMLAY, F. R. M.; KADIRGAMA, K.; RAMASAMY, D.; IDRIS, S. R. A.; TSUMORI, F. A comprehensive review on fused deposition modelling of polylactic acid. *Progress in Additive Manufacturing*, v. 8, n. 5, p. 775-799, 2023. DOI: 10.1007/s40964-022-00356-w. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00356-w>. Acesso em: 27 maio 2026.

TANVEER, Md. Qamar; MISHRA, Gautam; MISHRA, Siddharth; SHARMA, Rohan. Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed parts: a current review. *Materials Today: Proceedings*, v. 62, pt. 1, p. 100-108, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.310. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322009452>. Acesso em: 10 jun. 2026.

TRAN, Thang Q.; NG, Feng Lin; YU KAI, Justin Tan; FEIH, Stefanie; NAI, Mui Ling Sharon. Tensile strength enhancement of fused filament fabrication printed parts: a review of process improvement approaches and respective impact. *Additive Manufacturing*, v. 54, art. 102724, 2022. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102724. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860422001282>. Acesso em: 20 jun. 2026.

¹ Discente do Curso Superior de Engenharia Mecânica do Instituto de Ensino Superior Fucapi - CESF *Campus* Manaus – AM. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Docente do Curso Superior de Engenharia Mecânica do Instituto de Ensino Superior Fucapi - CESF *Campus* Manaus - Am. Doutora em Química (PPGQ/UFAM). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)