



LEONARDO BARROS DE OLIVEIRA

**PRODUÇÃO DE PEÇAS DE REPOSIÇÃO PARA MÁQUINAS EM
UMA INDÚSTRIA DE SAÚDE E TECNOLOGIA: UM ESTUDO
DE CASO**

LAVRAS – MG

2023

LEONARDO BARROS DE OLIVEIRA

**PRODUÇÃO DE PEÇAS DE REPOSIÇÃO PARA MÁQUINAS EM UMA INDÚSTRIA DE SAÚDE
E TECNOLOGIA: UM ESTUDO DE CASO**

Concepção Básica apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Fabio Domingues de Jesus

Orientador

LAVRAS – MG

2023

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Oliveira, Leonardo Barros de
PRODUÇÃO DE PEÇAS DE REPOSIÇÃO PARA MÁQUINAS
EM UMA INDÚSTRIA DE SAÚDE E TECNOLOGIA: UM
ESTUDO DE CASO / Oliveira, Leonardo Barros de. – Lavras :
UFLA, 2023.

36 p. : il.

TCC(Especialização)–Universidade Federal de Lavras, 2023.
Orientador: Prof. Dr. Fabio Domingues de Jesus.
Bibliografia.

1. Engenharia Mecânica. 2. Manufatura Aditiva. 3. Impressão
3D. I. Jesus, Fabio Domingues de. II. Título.

LEONARDO BARROS DE OLIVEIRA

**PRODUÇÃO DE PEÇAS DE REPOSIÇÃO PARA MÁQUINAS EM UMA INDÚSTRIA DE SAÚDE
E TECNOLOGIA: UM ESTUDO DE CASO**

Concepção Básica apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 04 de Dezembro de 2023.

Prof. Dr. Fabio Domingues de Jesus UFLA
Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos UFLA
Prof. Dr. Filipe Augusto Gaio De Oliveira UFLA

Prof. Dr. Fabio Domingues de Jesus
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

RESUMO

Neste trabalho, tem-se como objetivo analisar a aplicabilidade da Manufatura Aditiva na fabricação de peças de reposição para máquinas industriais em uma indústria de Saúde e Tecnologia. Inicialmente, realizou-se um levantamento teórico sobre o processo geral de Manufatura Aditiva, suas vantagens e desvantagens em comparação com os métodos tradicionais de manufatura, bem como as principais tecnologias disponíveis. A impressora utilizada para o estudo empregava a tecnologia FDM, sendo, portanto, realizada uma revisão mais detalhada sobre esse tema específico. Como parte do estudo de caso, foi conduzido um levantamento sobre as peças que poderiam ser fabricadas, levando em consideração as vantagens e limitações dessa tecnologia. A peça escolhida para ser fabricada foi o parafuso do culote rotativo, utilizado em uma máquina de tampografia industrial. Os modelos CAD foram obtidos a partir do modelo físico da peça original, e melhorias foram implementadas para abordar desgastes observados na peça original. A manufatura da peça foi realizada utilizando PLA e ABS. Após a impressão das peças, estas foram submetidas a um processo de validação para verificar a funcionalidade das peças finais, e ambas atenderam eficientemente aos critérios estabelecidos. Dessa forma, foi possível verificar com a utilização do processo FDM, que a Manufatura Aditiva é uma potencial alternativa para atender a demanda por peças de reposição na indústria, desde que seja feita uma análise criteriosa considerando as limitações dessa tecnologia e de seus materiais. .

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Modelagem por Deposição Fundida. Impressão 3D. ABS. PLA.

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze the applicability of Additive Manufacturing in the production of spare parts for industrial machines in the Health and Technology industry. Initially, a theoretical survey was conducted on the general process of Additive Manufacturing, its advantages and disadvantages compared to traditional manufacturing methods, as well as the main available technologies. The printer used for the study employed FDM technology, leading to a more detailed review on this specific topic. As part of the case study, a survey was conducted on the parts that could be manufactured, taking into account the advantages and limitations of this technology. The chosen part for fabrication was the screw of the rotary breech, used in an industrial pad printing machine. CAD models were obtained from the physical model of the original part, and improvements were implemented to address wear observed in the original part. The manufacturing of the part was carried out using PLA and ABS. After the printing of the parts, they underwent a validation process to verify the functionality of the final pieces, and both efficiently met the established criteria. In this way, it was possible to verify, through the FDM process, that Additive Manufacturing is a potential alternative to meet the demand for spare parts in the industry, provided a careful analysis is conducted considering the limitations of this technology and its materials.

Keywords: MAdditive Manufacturing. FDM. Spare Parts. ABS. PLA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processo geral de Manufatura Aditiva	11
Figura 3.1 – Parafuso do culote rotativo original	19
Figura 3.2 – Ilustração do culote rotativo da máquina de tampografia	19
Figura 3.3 – Processo de tampografia	20
Figura 3.4 – Paquímetro Digital	21
Figura 3.5 – Desgaste parafuso original	22
Figura 3.6 – Impressora Ultimaker S5	23
Figura 3.7 – Região crítica para acoplamento da ventosa	25
Figura 4.1 – Modelo digital do parafuso do culote rotativo	27
Figura 4.2 – Modelos A, B e C propostos	28
Figura 4.3 – Preparação dos modelos para impressão	28
Figura 4.4 – Modelos impressos em ABS	29
Figura 4.5 – Modelos impressos em PLA	29
Figura 4.6 – Principais medidas	30
Figura 4.7 – Modelos com a ventosa	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros de Impressão para ABS e PLA	24
Tabela 4.1 – Máquinas que mais exigem intervenções	27
Tabela 4.2 – Medidas dos modelos em PLA.	30
Tabela 4.3 – Medidas dos modelos em ABS.	31
Tabela 4.4 – Médias obtidas DIC	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivo geral	9
1.2	Objetivo específicos	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1	Manufatura Aditiva	10
2.2	Processo Geral de Manufatura Aditiva	11
2.2.1	Modelagem	11
2.2.2	Conversão para STL	12
2.2.3	Configurações da máquina e configurações de impressão	12
2.2.4	Processo de impressão	12
2.2.5	Remoção da peça	12
2.2.6	Pós-processamento	12
2.3	Tecnologias da Manufatura aditiva	13
2.3.0.1	Tecnologias a Laser	13
2.3.1	Projeção de Luz	14
2.3.2	Tecnologias de Extrusão	15
2.3.3	Tecnologias a Jato	15
2.4	FDM para fabricação de peças de reposição	16
2.5	Materiais utilizados nos processos FDM	16
2.5.1	PLA (Ácido Polilático)	17
2.5.2	ABS	17
2.5.3	PETG	17
3	MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1	Seleção de peças	18
3.2	Obtenção do modelo CAD	20
3.3	Estudo da peça	21
3.4	Filamento utilizado para impressão	22
3.5	Manufatura da peça	23
3.5.1	Pós-processamento	24

3.5.2	Validação das peças	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5	CONCLUSÕES	34
5.1	Trabalhos Futuros	34
	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva vem ganhando cada vez mais destaque como alternativa viável e inovadora para a fabricação de peças de geometria complexa em diversos setores industriais. A indústria de saúde e tecnologia é uma das diversas áreas que podem se beneficiar das vantagens e inovações proporcionadas pelas diferentes tecnologias da manufatura aditiva, uma vez que a necessidade de peças de reposição nesse setor exige soluções rápidas e econômicas.

Nesta pesquisa, será realizado um estudo de caso sobre a utilização modelagem de deposição fundida (FDM), umas das tecnologias da manufatura aditiva, como uma alternativa para a produção de peças de reposição para máquinas industriais em uma indústria de saúde e tecnologia. Serão explorados as vantagens e desvantagens, bem como as considerações técnicas e econômicas envolvidas ao se adotar a tecnologia FDM.

A Modelagem por Deposição Fundida permite a criação de peças tridimensionais pela deposição de sucessivas camadas de material até a conclusão da peça. Essa categoria fornece uma série de vantagens, incluindo a possibilidade da criação de geometrias complexas em um curto tempo e sob demanda, reduzindo assim os custos associados a outras tecnologias de fabricação, como, por exemplo, a necessidade de ferramentais adicionais como moldes ou matrizes.

Na indústria de saúde e tecnologia, a disponibilidade imediata de peças de reposição é fundamental para evitar máquinas paradas e garantir a continuidade dos processos existentes. A manufatura aditiva oferece a possibilidade da produção de peças rápidas encurtando o caminho da cadeia e suprimentos, sem a necessidade de estoques físicos e fornecedores externos. Mesmo considerando o tempo de manufatura da peça por meio da Manufatura Aditiva, que irá ser particular para cada peça, a reprodução da peça proporciona a eliminação do tempo de entrega existente desde o momento da compra e fabricação do fornecedor externo. Além disso, essa tecnologia fornece a possibilidade da fabricação de peças personalizadas e adaptadas a necessidades específicas de cada máquina, o que possibilita significativas melhorias nos processos de utilização das máquinas.

No entanto, existem alguns desafios a serem considerados ao adotar a utilização da modelagem por deposição fundida na fabricação de peças de reposição para a indústria. Questões relacionadas a escolhas dos materiais, as limitações dos materiais utilizados na impressão FDM, custos relacionados ao investimento e operacionais são aspectos que requerem ser considerados para a implementação. Portanto, é fundamental

realizar um estudo cuidadoso sobre a viabilidade da implementação dessa tecnologia para a fabricação de peças de reposição de forma generalizada.

Neste estudo de caso serão analisados os principais benefícios da impressão FDM para a fabricação de peças de reposição, bem como os principais desafios e considerações envolvidos nessa aplicação. Espera-se que os resultados obtidos forneçam informações para que demais pesquisas que possam beneficiar o setor industrial com a aplicação dessa importante tecnologia como uma alternativa viável e eficiente para atender as necessidades industrial de peças de reposição.

1.1 Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo geral analisar a aplicação da modelagem por deposição fundida (FDM) na fabricação de peças de reposição para máquinas industriais na indústria de saúde e tecnologia.

1.2 Objetivo específicos

No que diz respeito aos objetivos o estudo buscou:

- Investigar as vantagens e desvantagens da tecnologia FDM na produção de peças de reposição.
- Avaliar as considerações técnicas relacionadas à adoção da impressão FDM para a fabricação de peças específicas.
- Identificar os desafios relacionados à escolha de materiais e limitações na impressão FDM para a produção de peças de reposição
- Identificar possibilidades de melhorias na geometria da peça de reposição.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva (MA) é o processo de fabricação no qual o objeto é criado pela adição de material em camadas até a conclusão do objeto. Também conhecida como impressão 3D, esse processo difere das tecnologias convencionais, nas quais o material é moldado ou o objeto é obtido pela retirada de material. Inicialmente conhecida como Prototipagem Rápida, o primeiro método para a criação de um objeto tridimensional por camadas usando um modelo virtual foi desenvolvido em 1980 (Gardan, 2015).

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015), o termo Prototipagem Rápida descreve um processo para criar rapidamente um sistema ou representação de peças antes da liberação final ou comercialização. No entanto, com o avanço das tecnologias e melhorias na qualidade de saída das máquinas de manufatura aditiva, tornou-se possível que as peças que antes eram fabricadas apenas como protótipos se tornassem o produto final. O termo Manufatura Aditiva também descreve esse processo de maneira mais adequada, uma vez que a Prototipagem Rápida ignora o princípio básico dessas tecnologias, que é a adição de material.

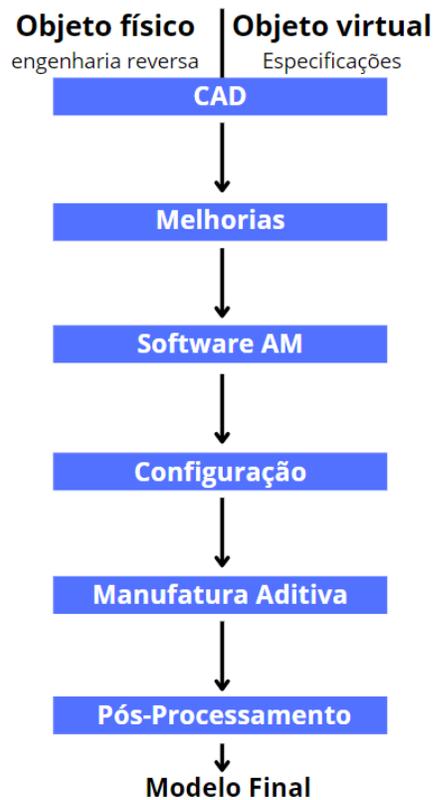
A Manufatura aditiva tem o potencial de produzir peças com geometrias complexas, exigindo um mínimo de pós-processamento e resultando em um desperdício de material quase nulo. Atualmente, essa técnica é aplicada a uma grande variedade de materiais plásticos e metálicos (Bikas; Stavropoulos; Chryssoulouris, 2015). Além disso, a manufatura aditiva possibilita a criação de peças personalizadas sob demanda, mantendo os custos de produção baixos, uma vez que não requer ferramentas adicionais de fabricação, como moldes ou matrizes (Kristiawan et al., 2021)

Comparando-se às tecnologias de Manufatura Subtrativa, a MA apresenta vantagens e desvantagens em seu uso. Quando aplicada a baixos volumes de produção, a MA possui uma grande vantagem na maioria dos modelos de custos atuais, pois não há a necessidade de investimento em ferramentais específicos para produção de determinada peça personalizada. No entanto, para produções em altos volumes, os processos subtrativos levam vantagem pois os investimentos são diluídos no custo unitário ao longo de grandes volumes, enquanto para a MA o custo unitário permanece quase constante. Considerando a necessidade de personalização e à complexidade da geometria, a MA também apresenta uma grande vantagem em relação aos processos convencionais de fabricação (Pereira; Kennedy; Potgieter, 2019).

2.2 Processo Geral de Manufatura Aditiva

Generalizando, o processo de Manufatura aditiva inicia-se na obtenção do modelo virtual CAD e finaliza com a obtenção da peça física resultante (Gibson; Rosen; Stucker, 2015). A Figura 2.1 nos apresenta o fluxo geral para os processos de manufatura aditiva.

Figura 2.1 – Processo geral de Manufatura Aditiva



Fonte: Do autor (2023)

2.2.1 Modelagem

A primeira etapa dos processos de manufatura aditiva é a obtenção de um modelo 3D que descreve a geometria externa da peça a ser produzida. A obtenção do modelo 3D pode ser realizada através das especificações e dimensões da geometria da peça a ser produzida, usando qualquer software de modelagem CAD, ou também a partir da utilização de uma peça já existente e um scanner para realizar a digitalização dessa peça (Cardeal et al., 2021). Esse arquivo CAD obtido será utilizado para descrever a peça que será enviada para realizar o fatiamento em camadas.

2.2.2 Conversão para STL

Após a obtenção do modelo CAD, é necessário convertê-lo para um arquivo compatível com a máquina a ser utilizada. Quase todas as máquinas de manufatura aditiva aceitam o formato STL, e a maioria dos softwares CAD pode produzir esse tipo de arquivo (Gibson; Rosen; Stucker, 2015). Esse processo de conversão transforma o arquivo CAD em pequenos triângulos para representar o objeto. Quanto menores forem esses triângulos, mais precisa será a representação do objeto (Gardan, 2015).

2.2.3 Configurações da máquina e configurações de impressão

O arquivo STL, que descreve a peça, é enviado para um software específico responsável por realizar as configurações de impressão. Nessa etapa, ocorre a manipulação do arquivo STL para definir a orientação, tamanho e posição corretos (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).. Além disso, são realizadas as configurações dos parâmetros de impressão, tais como temperatura de impressão, espessura da camada, velocidade de impressão, qualidade do acabamento, entre outros (Gardan, 2015).

2.2.4 Processo de impressão

A etapa de impressão é um processo automatizado, e a máquina pode continuar esse processo sem a necessidade de supervisão. No entanto, é importante realizar um monitoramento para garantir que nenhum erro ocorra, como falha de impressão, falta de material ou interrupção de energia (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

2.2.5 Remoção da peça

Após a conclusão do processo de impressão, a peça final deve ser removida da máquina. Dependendo da tecnologia utilizada, esse processo pode exigir interação com a máquina, que pode ter intertravamentos de segurança para garantir, por exemplo, que as temperaturas de operação estejam suficientemente baixas ou que não haja partes ativamente móveis (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

2.2.6 Pós-processamento

Após a remoção da peça, pode ser necessário realizar procedimentos adicionais para garantir que estejam prontas para uso. Nessa etapa, por exemplo, pode ser necessário remover os suportes utilizados durante o processo de impressão. Dependendo da aplicação e do material da peça, também pode ser necessário

realizar um tratamento para obter um acabamento superficial melhor, ou até mesmo um tratamento térmico, dependendo dos requisitos do processo (Kumar; Pandey; Wimpenny, 2019).

2.3 Tecnologias da Manufatura aditiva

A manufatura aditiva possui uma grande variedade de tecnologias para a produção de objetos tridimensionais por camadas. Pode-se citar essas tecnologias em cinco categorias diferentes, dependendo de seu princípio de funcionamento. As categorias são as seguintes (Gardan, 2015):

- Tecnologias a Laser
- Projeção de Luz
- Tecnologias de extrusão
- Tecnologias a Jato

A seguir, será abordado brevemente cada categoria e os diferentes processos existentes que utilizam cada tecnologia, destacando o princípio de funcionamento, as vantagens que cada um desses processos pode proporcionar e também os materiais utilizados em cada processo.

2.3.0.1 Tecnologias a Laser

Essa categoria de tecnologias são processos em que o laser é utilizado para criar objetos a partir da formação de camadas de determinado material, onde o laser seletivamente irá formar essas camadas até a conclusão do objeto (Horn; Harrysson, 2012).

Estereolitografia: Esse processo, conhecido como SLA, é uma das primeiras tecnologias de manufatura aditiva desenvolvidas e uma das mais conhecidas e utilizadas (Gardan, 2015). O laser é direcionado para a resina onde a solidificação é desejada de acordo com cada camada do objeto 3D. Quando a luz atinge a resina, as moléculas fotossensíveis absorvem a energia da luz, desencadeando uma reação química chamada polimerização (Zakeri; Vippola; Levänen, 2020). Os materiais utilizados nesses processos são resinas líquidas, que possuem diferentes propriedades de acordo com os requisitos finais da peça a ser produzida (Huang et al., 2018). O SLA fornece alta precisão na impressão de peças, possibilitando uma qualidade de impressão

com grande precisão dimensional (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

Fusão Seletiva a Laser: Conhecido como SLM, essa tecnologia utiliza laser para fundir seletivamente camadas de um material em pó para obter o objeto tridimensional. Nesse processo, o pó é distribuído uniformemente sobre a superfície de uma plataforma e, em seguida, um feixe de laser é direcionado de acordo com a camada a ser criada, fundindo seletivamente a peça. Então, a plataforma é rebaixada e o processo é repetido para a próxima camada até que a peça seja concluída. Os materiais que podem ser utilizados nesse processo incluem aço, aço inoxidável, cromo, cobalto, titânio e alumínio (Gardan, 2015). Este processo permite a construção de geometrias complexas de metal, com excelente densidade e propriedades mecânicas (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

Sinterização Seletiva a Laser (SLA): semelhante ao processo SLM, utiliza o laser para formar camadas através de um pó, que, nesse caso, podem ser poliamida, aço, titânio, ligas, pós cerâmicos, etc. (Gardan, 2015). Nesse processo, em vez de solidificar o pó, ele irá sinterizar cada camada. Então, a plataforma será rebaixada para que o processo de sinterização seja repetido nas sucessivas camadas até a conclusão da peça. Esse processo é mais lento em comparação com outros processos de manufatura aditiva, porém fornece alta precisão e qualidade superficial, tornando-o um dos mais utilizados (Bikas; Stavropoulos; Chryssolouris, 2015).

2.3.1 Projeção de Luz

Esse processo, também empregado para materiais fotossensíveis, utiliza a projeção de luz para realizar a manufatura da peça. Um filme revestido com resinas fotossensíveis é curado por meio da projeção de um flash de luz, que solidifica uma camada completa (Gardan, 2015). A principal vantagem desse processo é a redução do tempo de produção, pois, diferentemente de outros processos em que a solidificação ocorre ponto a ponto até a conclusão de cada camada, o projetor de luz realiza a solidificação de uma camada de uma só vez (Gardan, 2015).

2.3.2 Tecnologias de Extrusão

Modelagem por deposição fundida (FDM): O princípio de funcionamento da máquina FDM é aquecer o filamento no bico até atingir um estado semilíquido e depois extrudar sobre uma placa ou camada previamente impressa. A termoplastia dos filamentos de polímero permite que se fundam durante a impressão e depois solidifiquem à temperatura ambiente após a impressão (Kristiawan et al., 2021). Segundo Gardan (2015), o processo FDM é o mais popular entre os processos de manufatura aditiva, possuindo impressoras 3D para uso comum a baixo custo, até tecnologias mais avançadas que atendem grandes indústrias. Esse processo oferece uma ampla gama de materiais termoplásticos, possui um custo relativamente baixo e é fácil de usar quando comparado a outros processos (Gibson; Rosen; Stucker, 2015). O processo FDM é amplamente utilizado na indústria para fabricação de protótipos, peças finais na indústria automotiva e aeroespacial, no setor médico devido aos materiais biocompatíveis, entre outras aplicações (Rajan et al., 2022).

Deposição de Energia Direcionada (DED): Processo de impressão é mais comumente utilizado para reparar peças já fabricadas. Essa tecnologia pode ser utilizada para polímeros, cerâmicos e metais, sendo o uso mais predominante o pó metálico. O DED consiste na deposição de energia diretamente em uma região focada para aquecer um substrato, derretendo simultaneamente o material que está sendo depositado na poça de fusão (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

2.3.3 Tecnologias a Jato

Dentro dessa categoria, os objetos são construídos a partir da deposição de jatos controlados. Os principais processos que utilizam essa tecnologia são a Modelagem Multijato (MJM) e a Impressão Tridimensional (3DP) (Gardan, 2015).

No processo MJM, gotas de materiais fotopoliméricos são depositadas a partir de múltiplos jatos para criar as camadas das peças, que são curadas pela exposição a uma lâmpada UV (Zhang et al., 2018).

O processo 3DP, também conhecido como CJP, realiza a fabricação das peças através da combinação de pós aglutinantes. Inicialmente, o pó é distribuído em uma plataforma e, em seguida, o jato de aglutinante é aplicado seletivamente para formar as camadas e a geometria da peça a ser obtida (Gardan, 2015).

2.4 FDM para fabricação de peças de reposição

O processo de Modelagem por Deposição Fundida é amplamente utilizado em diversos setores, tendo como uma das grandes vantagens em relação a outros processos a sua disponibilidade, tanto em termos de custos para sua utilização quanto nas exigências e recursos necessários para realizar os serviços de impressão (Łukaszewski; Buchwald; Wichniarek, 2021).

O processo FDM é baseado no derretimento de filamentos termoplásticos para criar geometrias tridimensionais. O material termoplástico, disponibilizado em rolos, é puxado por uma roda motriz e direcionado a um cabeçote de um bico aquecido a uma determinada temperatura para deixá-lo em um estado semilíquido. Com o material no estado semilíquido, ele é extrudado pelo bico e despejado em linhas ultrafinas para formar as camadas até a conclusão da peça (Kristiawan et al., 2021).

Inicialmente, a técnica FDM era utilizada para fabricação de protótipos, porém com a evolução das máquinas para impressão e dos materiais utilizados no processo, essa técnica passou a ser utilizada também para a fabricação de produtos finais. Dentre os usos, destaca-se a fabricação de protótipos, próteses, gabaritos e peças de reposição (Łukaszewski; Buchwald; Wichniarek, 2021).

Ao se utilizar manufatura aditiva para fabricação de peças de reposição, é possível encurtar a cadeia de suprimentos, tornando a aplicação para a manutenção industrial extremamente interessante (Cardeal et al., 2021). Além do potencial econômico, a possibilidade de personalização fornecida pela FDM oferece oportunidades de melhorias para os processos industriais na fabricação de peças de reposição.

Com essa técnica, é possível realizar melhorias para peças de reposição em situações em que a demanda não é previsível, evitando problemas como tempo de entrega, parada de máquina e custo de estoque, que podem aumentar ainda mais os custos da manutenção, além, claro, do custo de aquisição da peça (Cardeal et al., 2021). Nesse cenário, a técnica FDM se torna extremamente interessante, considerando a rápida produção de uma peça de reposição a baixo custo, evitando o custo de aquisição externa dessa peça, custo de estoque, custo de capital investido e custo de máquina parada.

2.5 Materiais utilizados nos processos FDM

Para manufatura de peças através do processo FDM há uma grande gama de materiais disponíveis, o que torna esse reforça ainda mais a grande aplicabilidade desse processo em diversas áreas. Dentro dos principais materiais utilizados pode-se citar o PLA, ABS, PETG (Besko; Bilyk; Sieben, 2017).

2.5.1 PLA (Ácido Polilático)

O PLA é um das matérias mais utilizados no processo de impressão FDM devido, principalmente, a sua facilidade de impressão. Além de sua facilidade na impressão, o PLA possui propriedades vantajosas por ser um material biodegradável, biocompatibilidade, boa disponibilidade, propriedades antibacteriana e boas propriedades mecânicas e térmicas (Trivedi; Gupta; Singh, 2023).

Segundo Santana et al. (2018), o PLA possui temperatura de transição vítrea entre 55°C e 65 °C, o que facilita sua impressão permitindo que ela ocorra até mesmo na mesa sem aquecimento. A temperatura de extrusão pode variar entre 180°C e 230°C a depender do fornecedor ou processo (3DFila, 2023).

2.5.2 ABS

O ABS é um copolímero formado por acrilonitrila, butadieno e estireno. O ABS possui propriedades mecânicas superiores ao PLA e é considerado mais durável. O ABS é impresso entre as temperaturas de 220°C e 240°C (3DLab, Ano de acesso) e possui temperatura de transição vítrea elevada, cerca de 100°C, exigindo mais conhecimento técnico para realizar impressões quando comparado com o PLA (Besko; Bilyk; Sieben, 2017).

2.5.3 PETG

O PETG (Polietileno Tereftalato Glicol) é um material que ganhou muito espaço na impressão 3D por reunir as melhores vantagens mecânicas do ABS com a facilidade de impressão fornecida pelo PLA. Se trata de uma versão modificada do PET onde foi adicionado glicol durante sua polimerização, tornando o mais adequado para o uso em impressão.

O PETG possui temperatura de transição vítrea de 80°C, sendo menor que o ABS e maior que o PLA (Santana et al., 2018). Já a temperatura de extrusão para utilização do PETG é de 230°C à 260°C (Besko; Bilyk; Sieben, 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo de caso é analisado a viabilidade da aplicação da impressão FDM para manufatura das peças de reposição em uma indústria de saúde e tecnologia situada na região sul de Minas Gerais, sendo realizado nos entre os meses de abril e novembro de 2023.

3.1 Seleção de peças

A primeira etapa desse estudo consiste na seleção de peças que podem ser fabricadas a partir do processo de impressão FDM. Essa etapa é fundamental para uma boa aplicação, considerando que é importante se escolher peças que sejam possíveis de se produzir, levando em conta a demanda da peça de reposição, valor da peça quando comprada de fornecedores externos, tempo de entrega, quantidade exigida em estoque e limitações dos materiais disponíveis para impressão FDM.

Para isso, foi realizado um *Brainstorming* entre os times de Manutenção Industrial e Engenharia de Manufatura com o objetivo de obter um levantamento das peças que, por meio de uma análise pre poderiam ser fabricadas pelo método FDM.

A peça selecionada para ser fabricada foi o parafuso do culote rotativo mostrado na Figura 3.1. O parafuso do culote rotativo possui uma geometria que possibilita o encaixe de uma ventosa em uma de suas extremidades, sendo que o parafuso possui um canal para passagem de ar que permite que seja gerado um vácuo entre a ventosa e a base da peça que será gravada, mantendo ela fixa ao culote rotativo durante o processo de gravação.

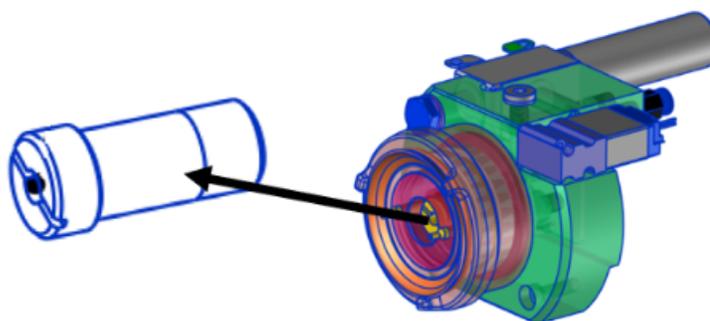
O culote rotativo e o parafuso do culote rotativo, exemplificado na Figura 3.2, possui os componentes necessários para realizar todo o processo de movimentação durante as várias etapas do processo de gravação da peça final. As peças injetadas previamente chegam por uma esteira até a máquina de tampografia, então o culote rotativo realiza o acoplamento a base da peça e movimenta ela ao longo da máquina de gravação para que ela passe pelo processo de gravação a partir do contato dos tampões com a peça.

Figura 3.1 – Parafuso do culote rotativo original



Fonte: Do autor (2023)

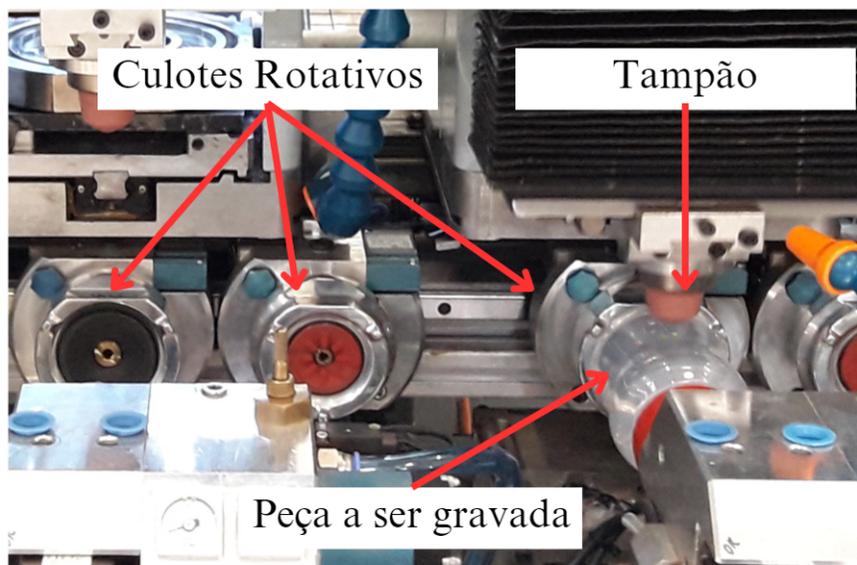
Figura 3.2 – Ilustração do culote rotativo da máquina de tampografia



Fonte: (Wutzl, 2017)

Na Figura 3.3 é possível visualizar a disposição de três culotes rotativos, bem como uma peça acoplada ao culote da direita com um tampão se aproximando para realizar a gravação.

Figura 3.3 – Processo de tampografia



Fonte: Do autor (2023)

3.2 Obtenção do modelo CAD

Com a peça a ser fabricada já definida, o modelo CAD foi obtido para que seja possível realizar a fabricação da mesma. Por ser tratar de uma geometria de fácil detalhamento, a obtenção do modelo foi realizada com medições diretas utilizando um paquímetro e um calibre de roscas na peça original. Na Figura 3.4 podemos ver o paquímetro utilizado para realizar as medições.

Com as dimensões já definidas, foi utilizado o software SolidWorksTM para a modelagem do parafuso do culote rotativo.

Figura 3.4 – Paquímetro Digital



Fonte: Do autor (2023)

3.3 Estudo da peça

O parafuso do culote rotativo tem a função de suportar uma ventosa em sua extremidade e ser rosqueado no culote rotativo da máquina de tampografia. Para sua utilização, é necessário que o parafuso suporte o encaixe da ventosa em sua extremidade.

Para verificação do uso da peça foi necessário analisar qual o uso da peça e correlacionar com as características dos materiais e dos objetos impressos a partir da modelagem por deposição fundida.

Observando o desgaste da peça original, Figura 3.5, pode-se verificar que o principal problema está na ranhura da cabeça do parafuso, onde há um grande desgaste devido ao a dificuldade de se retirar o parafuso utilizando uma chave fenda. De maneira geral os operadores tinham dificuldades de encaixar a chave fenda de maneira adequada na cabeça do parafuso e com o tempo a ranhura era totalmente danificada e a peça precisava ser retirada por outros meios e descartada posteriormente.

Figura 3.5 – Desgaste parafuso original



Fonte: Do autor (2023)

Observando esse problema, inicialmente foram propostos três modelos (A, B e C) utilizando um alojamento hexagonal, sendo hexágonos circunscritos em circunferências com diâmetros de 4,2 mm, 5,2 mm e 6,2 mm para determinar qual seria o impacto de se utilizar uma chave hexagonal (allen) para realizar a colocação e a retirada do parafuso do culote rotativo e se isso teria algum impacto para o processo.

3.4 Filamento utilizado para impressão

A escolha do material se torna mais simples para esse estudo visto que o principal objetivo é analisar a viabilidade da fabricação de uma peça de reposição e a peça escolhida não é submetida a esforços que exijam propriedades muito específicas de cada material. Além disso, para a peça escolhida, o acabamento superficial não é crítico, o que também influencia na escolha do material

Por esse aspecto PLA é um material atraente pela sua facilidade de impressão e disponibilidade no mercado, além de também apresenta uma melhor união das camadas, o que representaria uma peça com maior dificuldade de ocorrer danos em sua rosca. Por ser um material mais duro que outros, como por exemplo o ABS, ele fornece um acabamento superficial com menor qualidade, porém o uso da peça não possui fins estéticos, logo o PLA se torna uma escolha válida para realizar o estudo.

Como alternativa, o uso do ABS também será estudado, como ele possui melhores propriedades mecânicas e menor custo de material. Apesar de exigir maior conhecimento para realizar a impressão a partir do ABS, a impressora a ser utilizada é enclausurada, possui fácil configurações de impressão o que acaba tornando atraente o estudo com o ABS.

3.5 Manufatura da peça

Já com os modelos CAD e os materiais escolhidos, foi necessário então realizar um trabalho para preparação do modelo digital para a impressão. Nesta etapa é importante considerar as características e limitações do material, da impressora FDM a ser utilizada, no caso uma Ultimaker S5, mostrada na Figura 3.6 e a geometria da peça a ser fabricada. A impressora Ultimaker S5, utilizada possui bico extrusor de 0,4mm, o que deve ser observado no momento de definir as características da peça a ser impressa.

Figura 3.6 – Impressora Ultimaker S5



Fonte: Do autor (2023)

A peça impressa possui uma rosca externa de 16 mm com passo de 1,25mm, sendo possível realizar impressão dessa rosca, porém para a finalidade no qual ela é destinada, que é o acoplamento a máquina, as camadas durante o acoplamento seriam facilmente separadas devido as limitações do processo FDM. Além disso, para a obtenção de uma rosca com boa qualidade, seria necessário configurar a impressão com uma altura de camada inferior na região da rosca e também reduzir a velocidade de impressão.

Esses fatores somados, aumentariam muito o tempo de manufatura da peça, aumentando o tempo de fabricação em cerca de 70%, portanto, a peça será impressa apenas com o diâmetro de 16 mm e a rosca será feita no pós-processamento utilizando um cossinete M16x1.25 para um melhor acabamento da rosca e consequentemente uma maior resistência de acoplamento a máquina.

As configurações de impressão foram feitas utilizando o software Ultimaker Cura™. A disposição da peça na mesa de impressão foi com o eixo do parafuso paralelo ao eixo Z, e foi utilizada uma espessura de parede de 2 mm para evitar que a parede fosse vazada no momento de fazer a rosca no pós-processamento. Devido a geometria da peça, ao se utilizar parede de 2mm, conseqüentemente a região ficaria completamente preenchida.

Tabela 3.1 – Parâmetros de Impressão para ABS e PLA

Parâmetros	ABS	PLA
Temperatura de Extrusão (°C)	200	245
Temperatura da Mesa (°C)	85	50
Padrão de Deposição	Triangular	Triangular
Preenchimento (%)	50	50
Altura de Camada (mm)	0,15	0,15
Velocidade de Impressão (mm/s)	80	70
Espessura de Paredes (mm)	2	2
Expansão Horizontal (mm)	0,022	0,014
Expansão Horizontal do Furo (mm)	0,01	0

Fonte: Dos autores (2023)

Considerando a particularidade do processo e do material, foi necessário realizar algumas alterações, principalmente nas configurações de expansão horizontal, para que fosse possível utilizar o mesmo modelo STL para produzir as peças em PLA e ABS, pois elas possuem comportamento diferentes em relação a sua contração.

3.5.1 Pós-processamento

Após a conclusão da peça o pós-processamento se deu com a retirada dos suportes, utilizando um alicate de bico fino e uma pequena espátula para retirada das rebarbas do suporte. Depois se utilizou uma lixa em alguns pontos onde o suporte deixou o acabamento da região com uma rugosidade alta. Por fim se utilizou o cossinete M16x1,25 e um porta cossinete para criar a rosca externa desejada no parafuso impresso.

3.5.2 Validação das peças

A validação de peça se deu em cinco etapas:

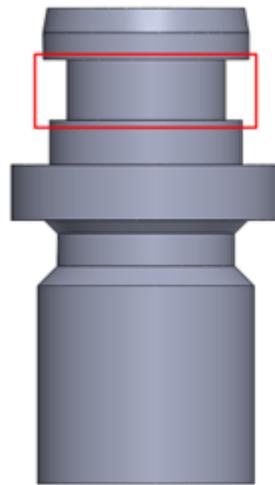
1. Verificação dimensional dos modelos
2. Encaixe da ventosa na cabeça do parafuso do culote rotativo;

3. Instalação do parafuso no conjunto do culote rotativo;
4. Uso da máquina por uma semana;
5. Retirada do parafuso e a retirada da ventosa da cabeça do parafuso;

Primeiramente foi verificado o dimensional para cada peça impressa, conforme as cotas representadas na Figura 4.6. Essas medidas são as principais para o funcionamento da peça por serem regiões críticas para a fabricação da rosca, encaixe da ventosa e acomplamento da chave allen. Com os resultados obtidos foi realizado um Delineamento Inteiramente Casualizado no Software SISVAR com grau de confiabilidade de 5%. Para essa análise foram considerados os fatores modelos e material, sendo o fator modelo com 3 níveis e o fator material com 2 níveis.

Na segunda etapa, o encaixe da ventosa é realizado de forma manual, através da realização de uma certa pressão no canal da ventosa através da cabeça do parafuso. Nesta etapa todos os modelos os modelos foram testados para verificar se o não iriam ocorrer danos na região destacada na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Região crítica para acoplamento da ventosa



Fonte: Do autor (2023)

Na terceira etapa, foi realizada a instalação dos modelos na máquina. Para garantir que estivessem com o mesmo torque, foi utilizado um torquímetro de estalo durante a sua instalação nos culotes rotativos.

As peças impressas foram instaladas nas máquinas para verificar o seu funcionamento. Como o equipamento possui quatro culotes rotativos, foi possível dividir em rodadas para testar os modelos A, B e C simultaneamente.

Inicialmente, as três peças do Modelo A produzidas em PLA foram instaladas e testadas por uma semana. Após isso, as três peças do Modelo B produzidas em PLA foram instaladas e testadas por uma semana, e por fim, as três peças do Modelo C produzidas em PLA foram instaladas e testadas também por uma semana.

Esse padrão foi repetido até que as 42 peças produzidas em PLA e ABS fossem testadas. Após a retirada das peças da máquina, foi verificado se houve algum dano aparente a cada uma das peças testadas. A retirada da ventosa também foi realizada para verificar se o parafuso suportaria a força necessária para removê-lo, sem ocorrer ruptura entre as camadas na região destacada na Figura 3.7.

A fim de validar melhor o ponto mais crítico da peça, foi realizado um teste colocação e retirada da ventosa em 3 peças de cada modelo por 50 vezes a fim de verificar se as peças suportariam esse esforço repetitivo, visto que esse processo é comumente durante o setup da máquina.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O levantamento das máquinas que mais exigiram intervenções no ano de 2022 pode ser visualizado na Tabela 4.1. A escolha do parafuso do culote rotativo mostrou-se interessante devido à alta demanda, aos custos envolvidos e ao tempo de entrega, que, de acordo com Cardeal et al. (2021), são parâmetros fundamentais para uma boa aplicação da manufatura aditiva. Trata-se de uma peça com geometria complexa que apresentava oportunidades de melhoria para melhor atender ao processo.

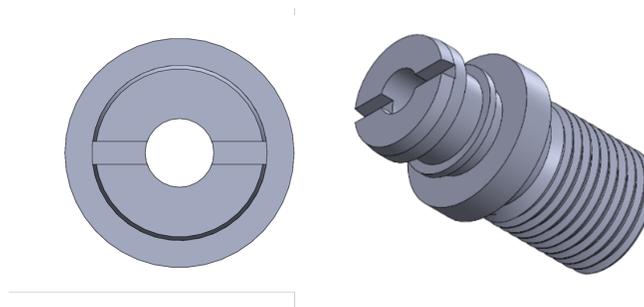
Tabela 4.1 – Máquinas que mais exigem intervenções

Descrição do processo	Número de intervenções (%)
Processo de gravação	27
Injeção de plástico	23
Injeção de silicone	15
Linhas de montagem	12
Compressores	11
Outros	12

Fonte: Dos autores (2023)

Figura 4.1 mostra o modelo obtido de acordo com as medições da peça original. Nesta etapa, as habilidades de um engenheiro mecânico são fundamentais para a reprodução da peça, eliminando a necessidade, neste caso, da utilização de um scanner para digitalização da mesma, que segundo Paulic et al. (2014) é uma etapa fundamental para a aplicação da manufatura aditiva.

Figura 4.1 – Modelo digital do parafuso do culote rotativo



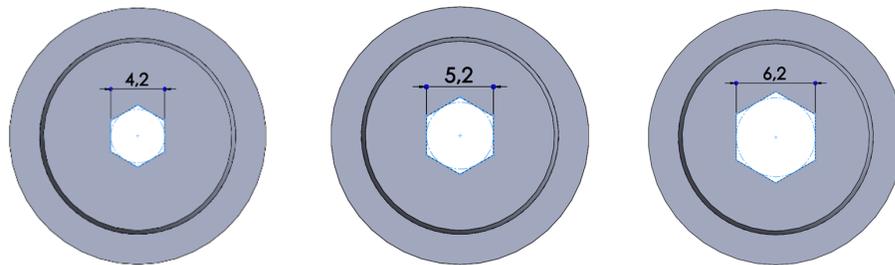
Fonte: Do autor (2023)

O estudo da peça envolveu uma análise das condições às quais ela seria submetida. Verificou-se que ela não estava sujeita a esforços que pudessem danificá-la durante o uso na máquina, eliminando a necessidade de um estudo mais avançado sobre as tensões, o que tornaria o desenvolvimento da peça mais lento devido às limitações do processo FDM para análises desse tipo. Segundo Paul (2021), a literatura

disponível ainda não fornece modelos realistas de Análise de Elementos Finitos para peças originadas em processos FDM.

A partir do estudo da peça as melhorias de geometria propostas são as exibidas na Figura 4.2. Os modelos A, B e C foram projetados com uma entrada hexagonal atravessando todo o corpo da peça, em vez de possuir apenas um furo e uma fenda na cabeça. Essa alteração proporcionou uma melhoria significativa ao permitir o uso de chaves hexagonais de 4 mm, 5 mm e 6 mm, em vez de apenas uma fenda

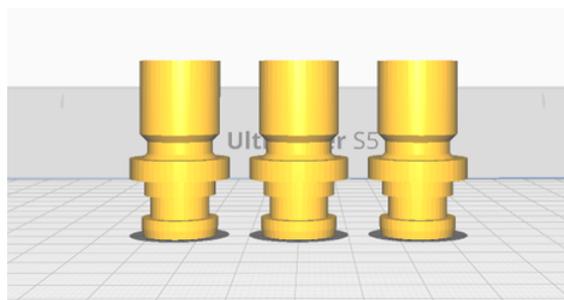
Figura 4.2 – Modelos A, B e C propostos



Fonte: Do autor (2023)

A seguir, na Figura 4.3, pode-se ver a disposição dos três modelos na mesa de impressão, sendo eles impressos simultaneamente. Esse mesmo processo foi realizado para a produção de sete peças de cada modelo para cada material, totalizando 21 peças de PLA e 21 peças de ABS.

Figura 4.3 – Preparação dos modelos para impressão



Fonte: Do autor (2023)

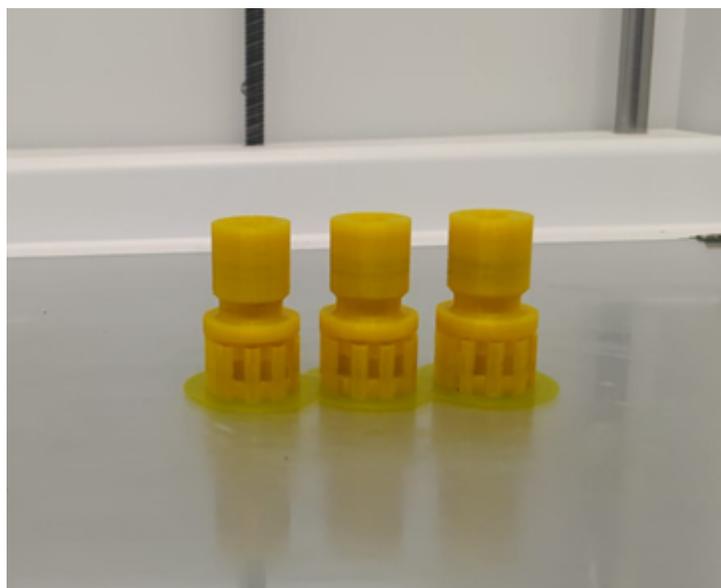
Na Figura 4.4 podemos visualizar três modelos impressos em ABS e na Figura 4.5 três modelos em PLA.

Figura 4.4 – Modelos impressos em ABS



Fonte: Do autor (2023)

Figura 4.5 – Modelos impressos em PLA



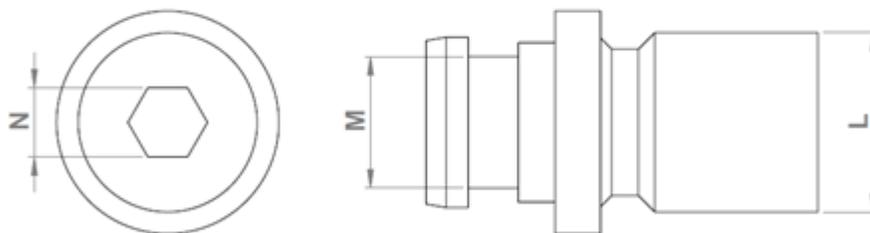
Fonte: Do autor (2023)

Devido à geometria da rosca, a impressão direta da peça com a rosca resultaria em uma rosca com possibilidades de falhas geométricas, uma menor resistência entre as camadas na região da rosca e um maior tempo para impressão da peça.

Devido às características dos materiais termoplásticos utilizados na impressão FDM, fazer uma rosca externa com um cossinete é um processo simples, mais rápido e proporciona um acabamento muito melhor para a rosca em comparação com a impressão em uma impressora com bico de 0,4 mm.

Para validar as peças, foram realizadas etapas para garantir que estivessem aptas a serem utilizadas na máquina. Inicialmente, foi verificado o dimensional de cada peça impressa. Conforme as Tabelas 4.2 e 4.3 podemos verificar quais foram as medidas obtidas para cada modelo considerando a representação esquemática das cotas na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Principais medidas



Fonte: Do autor (2023)

Tabela 4.2 – Medidas dos modelos em PLA.

	Modelo A			Modelo B			Modelo C		
	L (mm)	M (mm)	N (mm)	L (mm)	M (mm)	N (mm)	L (mm)	M (mm)	N (mm)
1ª peça	15,99	11,71	4,11	16,01	11,70	5,07	16,05	11,71	6,10
2ª peça	16,01	11,74	4,12	15,97	11,74	5,13	15,97	11,74	6,09
3ª peça	16,05	11,78	4,12	16,03	11,75	5,11	16,07	11,78	6,11
4ª peça	16,00	11,79	4,10	15,99	11,80	5,14	15,99	11,79	6,10
5ª peça	16,00	11,78	4,14	16,03	11,79	5,13	15,98	11,87	6,12
6ª peça	16,05	11,76	4,15	16,01	11,77	5,14	16,02	11,76	6,12
7ª peça	16,07	11,72	4,12	16,02	11,75	5,09	16,02	11,72	6,09

Fonte: Dos autores (2023)

Tabela 4.3 – Medidas dos modelos em ABS.

	Modelo A			Modelo B			Modelo C		
	L (mm)	M (mm)	N (mm)	L (mm)	M (mm)	N (mm)	L (mm)	M (mm)	N (mm)
1ª peça	16,01	11,73	4,09	15,97	11,75	5,12	16,01	11,72	6,09
2ª peça	15,97	11,73	4,09	15,97	11,74	5,12	16,01	11,74	6,07
3ª peça	15,97	11,72	4,10	15,98	11,76	5,15	15,98	11,75	6,10
4ª peça	15,99	11,74	4,09	15,97	11,75	5,12	15,97	11,75	6,06
5ª peça	16,03	11,76	4,08	16,00	11,74	5,09	16,00	11,76	6,04
6ª peça	15,99	11,74	4,06	16,00	11,73	5,06	15,99	11,75	6,09
7ª peça	16,00	11,76	4,10	15,98	11,73	5,08	16,01	11,75	6,09

Fonte: Dos autores (2023)

Os resultados obtidos para a média a partir da DIC realizado utilizando o SISVAR podem ser visualizados na Tabela 4.4. Para a cota L tivemos uma variância de 0,00072 para o fator modelo e 0,006688 para o fator material. Para a cota M tivemos uma variância de 0,000317 para o fator modelo e 0,002917 para o fator material. Já para a cota N tivemos uma variância de 13,80 para o fator modelo e 0,006193 para o fator material.

A variância para o fator modelo e fator material são baixas para as Cotas L e M, o que demonstra que as medidas obtidas estão próximo a média geral. Para a cota N a variância pelo fator material foi baixa, porém para o fator modelo foi alta, isso ocorre pois a cota N os valores são diferentes quando considerados os modelos.

Nessa verificação, foi possível perceber que a variação foi mínima a partir da análise de média de variância. Essa variação dimensional é comum em peças impressas em FDM devido à suscetibilidade desse processo a flutuações de temperatura, que podem afetar o tamanho final das peças. Segundo Freitas, Boind e Blödorn (2018), o processo de impressão FDM fornece uma dispersão dos resultados dimensionais que, quando bem estudada, pode ser compensada para que a peça final atenda às condições de projeto.

Tabela 4.4 – Médias obtidas DIC

Modelo	L (mm)	M (mm)	N (mm)
A	15,99	11,75	4,10
B	16,01	11,75	5,11
C	16,01	11,76	6,09

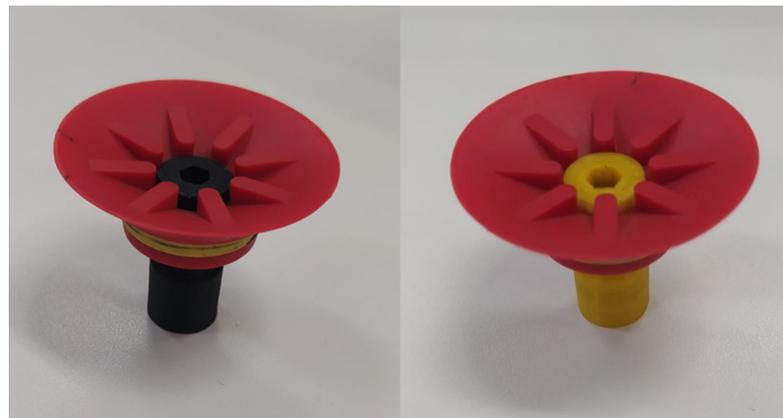
Fonte: Dos autores (2023)

Portanto, para que o resultado satisfatório alcançado e o alto grau de obtido através do delimitamento experimental com os dados das Tabelas 4.2 e 4.3 fosse alcançado, foram necessárias configurações e testes

preliminares que envolviam as particularidades de cada material. O PLA, por ser um material mais simples, não exigiu muitos ajustes nas configurações de impressão; no entanto, o ABS necessitou de mais ajustes de acordo com experiências prévias de uso do material. Foi necessário realizar ajustes no software Cura, alterando a **Expansão Horizontal**, **Expansão Horizontal Camada Inicial** e, principalmente, **Expansão Horizontal do Furo**. Sem essas configurações de impressão, não seria possível utilizar a mesma geometria para realizar a impressão em ABS, sendo necessário produzir um novo modelo CAD, pois o local de acoplamento da chave Allen iria ficar menor que o nominal da chave Allen e o local de acoplamento da ventosa poderia ser prejudicado permitindo a passagem de ar.

Após a verificação dimensional as ventosas foram instaladas na cabeça dos modelos A, B e C, e todos os modelos suportaram bem as ventosas sem apresentar danos. No momento de se colocar a ventosa é realizado uma força de compressão região crítica mostrada na Figura 3.7. Como esperado, a resistência a uma compressão realizada manualmente dificilmente irá promover algum dano a peça, visto que sua fragilidade está na separação de camadas, conforme abordado no estudo de Yao et al. (2020). Os modelos com a ventosa já acomodada podem ser vistos na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Modelos com a ventosa



Fonte: Do autor (2023)

Em seguida, os modelos foram instalados na máquina para verificar se seriam capazes de suportar o torque necessário para mantê-los presos durante o uso, foi utilizado um torque de 3 NM. Todos foram submetidos ao mesmo torque e não apresentaram nenhum problema durante a instalação.

Durante o uso, foi observado que o modelo C proporcionava uma maior força de acoplamento entre a ventosa e a base da peça a ser gravada, enquanto o modelo A apresentava uma menor força de acoplamento e o modelo B possuía uma força de acoplamento intermediária. Isso é explicado pela relação entre diâmetro

e perda de carga, que, segundo Çengel e Cimbala (2012), à medida que o diâmetro diminui, a perda de carga aumenta, resultando em uma diminuição na força de acoplamento.

No entanto, nenhum dos modelos apresentou problemas de acoplamento durante os testes. É importante ressaltar que essas observações foram feitas em um período de teste relativamente curto. Considerando um período de utilização mais longo, o modelo A, devido à sua menor força de acoplamento, tem maior possibilidade de gerar falhas de gravação ao desacoplar da base da peça. No entanto, para confirmar essa possibilidade, será necessário realizar testes adicionais.

A remoção das peças da máquina também não apresentou nenhum tipo de dano, e as três peças não apresentaram defeitos aparentes. Os fios de rosca não mostraram indícios de descolamento entre suas camadas. Ao remover a ventosa das peças que tinham sido testadas em máquina, nenhum problema foi encontrado.

Ao realizar o último teste, onde a ventosa foi colocada e retirada de duas peças de cada modelo em ABS e PLA, todas as peças resistiram bem. Isso reforça que a união entre as camadas foi bem realizada e as peças atendem de forma adequada as condições de uso nas quais elas são submetidas.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, podemos concluir que a utilização da impressão FDM para a fabricação de peças de reposição na indústria de saúde e tecnologia se mostrou viável. Com base nas análises estatísticas o modelo A e o grau de confiança considerado todos os modelos estão aptos a serem utilizados.

A utilização de uma chave hexagonal para a retirada do parafuso facilitou o processo e reduziu a possibilidade de danos à peça devido a um mau acoplamento da chave fenda utilizada anteriormente. A obtenção do modelo CAD foi realizada de forma eficiente, utilizando instrumentos comuns disponíveis na indústria, sem a necessidade de um scanner.

Os objetivos do trabalho foram alcançados, uma vez que foi possível investigar as vantagens e desvantagens relacionadas ao processo de impressão FDM para fabricação de peças de reposição, avaliar as considerações técnicas a respeito do processo de impressão e materiais utilizado, compreendendo suas limitações, identificar e realizar melhorias na geometria da peça fabricada e por fim realizar a produção da peça de reposição e realizar a validação de seu uso em máquina.

5.1 Trabalhos Futuros

Para estudos posteriores, recomenda-se realizar uma análise econômica mais detalhada sobre a utilização desse processo de fabricação de peças de reposição, comparando os custos relacionados à impressão FDM com outros métodos de obtenção das peças. Além disso, seria interessante realizar uma análise mais aprofundada sobre o comportamento de diferentes materiais, visto a grande variedade que o processo FDM fornece.

Essas análises complementares podem fornecer informações adicionais relevantes para embasar a tomada de decisão sobre a utilização da impressão FDM na fabricação de peças de reposição na indústria de saúde e tecnologia.

REFERÊNCIAS

- 3DFila. *PLA: Tudo o que você precisa saber sobre esse Filamento*. 2023.
- 3DLab. *Qual a influência da temperatura na impressão 3D?* Ano de acesso.
- BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3d. **Gestão Tecnologia e Inovação**, v. 1, n. 3, p. 9–18, 2017.
- BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHRYSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 83, p. 389–405, 2015.
- CARDEAL, G. et al. Additive manufacturing in the process industry: A process-based cost model to study life cycle cost and the viability of additive manufacturing spare parts. In: **28th CIRP Conference on Life Cycle Engineering**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 211–216.
- FREITAS, L. C. S.; BOIND, D.; BLÖDORN, R. Avaliação dimensional de peças impressas em pla por impressoras de tecnologia fdm. **ABCM.CONEM2018.CON18-0548**, 2018.
- GARDAN, J. Additive manufacturing technologies: State of the art and trends. **International Journal of Production Research**, v. 54, p. 3118–3132, 2015.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER. **Additive Manufacturing Technologies**. [S.l.]: Springer, 2015. ISBN 9781493921126.
- HORN, T. J.; HARRYSSON, O. L. Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications. **Science Progress**, v. 95, n. 3, p. 255–282, 2012.
- KRISTIAWAN, R. B. et al. A review on the fused deposition modeling (fdm) 3d printing: Filament processing, materials, and printing parameters. **Open Engineering**, v. 11, p. 639–649, 2021.
- KUMAR, L. J.; PANDEY, P. M.; WIMPENNEY, D. I. (Ed.). **3D Printing and Additive Manufacturing Technologies**. Singapore: Springer, 2019.
- PAUL, S. Finite element analysis in fused deposition modeling research: A literature review. **Measurement**, v. 178, 2021.
- PAULIC, P. et al. Reverse engineering of parts with optical scanning and additive manufacturing. **Procedia Engineering**, v. 69, p. 795–802, 2014.
- PEREIRA, T.; KENNEDY, J. V.; POTGIETER, J. A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. **Procedia Manufacturing**, v. 30, p. 11–18, 2019.
- RAJAN, K. et al. Fused deposition modeling: Process, materials, parameters, properties, and applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 120, n. 3-4, p. 1531–1570, 2022.
- SANTANA, L. et al. Estudo comparativo entre petg e pla para impressão 3d através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, p. e12267, 2018.
- TRIVEDI, A. K.; GUPTA, M. K.; SINGH, H. Pla based biocomposites for sustainable products: A review. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, 2023.

WUTLZ. **ME.C.1329.000-418**. 2017. Figura retirada do desenho técnico.

YAO, T. et al. Tensile failure strength and separation angle of fdm 3d printing pla material: Experimental and theoretical analyses. **Composites Part B: Engineering**, v. 188, 2020.

ZAKERI, S.; VIPPOLA, M.; LEVÄNEN, E. A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography. **Additive Manufacturing**, Elsevier B.V., October 1 2020.

ZHANG, Y. et al. Additive manufacturing processes and equipment. In: **Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications**. [S.l.]: Elsevier, 2018. p. 39–51.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. [S.l.]: AMGH, 2012. ISBN 9788580550665.

ŁUKASZEWSKI, K.; BUCHWALD, T.; WICHNIAREK, R. The fdm technique in processes of prototyping spare parts for servicing and repairing agricultural machines: A general outline. **International Journal of Applied Mechanics and Engineering**, v. 26, p. 145–155, 2021.