

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Natthan Carlos de Oliveira Ribeiro

**PROJETO BÁSICO DE CABEÇOTE PARA EXTRUSÃO DE GEL NO
PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA**

Juiz de Fora

2021

Natthan Carlos de Oliveira Ribeiro

**PROJETO BÁSICO DE CABEÇOTE PARA EXTRUSÃO DE GEL NO
PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Moises Luiz Lagares Junior

Juiz de Fora

2021

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ribeiro, Natthan Carlos de Oliveira.

Projeto básico de cabeçote para extrusão de gel no processo de manufatura aditiva / Natthan Carlos de Oliveira Ribeiro. -- 2021.
49 f. : il.

Orientador: Moises Luiz Lagares Junior
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2021.

1. Manufatura Aditiva. 2. Impressão 3D. 3. Cabeçote. 4. Extrusão.
5. Gel. I. Junior, Moises Luiz Lagares , orient. II. Título.

Natthan Carlos de Oliveira Ribeiro

**PROJETO BÁSICO DE CABEÇOTE PARA EXTRUSÃO DE GEL NO
PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 12 de Março de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Moises Luiz Lagares Junior - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Raphael Fortes Marcomini
Universidade Federal de Juiz de Fora

Antonio Angelo Missiaggia Picorone
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Suely, por todo esforço, dedicação e apoio durante todos esses anos e pela excelente criação que me permitiu ser essa pessoa de caráter justo e honesto.

Às minhas tias, Cristina e Fátima, por terem me acolhido em Juiz de Fora – MG, por sempre me incentivarem nesta jornada da Engenharia Mecânica e por todo amor e carinho que compartilham até hoje comigo.

Ao meu irmão, Gustavo, por sempre me amparar, me incentivar a seguir realizando meus sonhos e pelo companheirismo de longa data.

Ao professor Moisés, pela oportunidade de me mostrar novas oportunidades e mudar a forma que eu vejo a Engenharia Mecânica. O seu profissionalismo me inspira!

Ao Grupo de Educação Tutorial (GET) de Engenharia Mecânica da UFJF, por ter me acolhido e permitido experimentar a prática de outros olhares dentro do curso.

Aos meus amigos de antes e os novos que fiz durante essa caminhada, que levarei comigo como exemplo de pessoas a serem seguidas, por todo apoio e motivação.

Ao restante da minha família, em especial ao meu pai, Antônio Carlos, ao meu tio Antônio Roberto, à minha avó, Neuza, e ao meu avô, Sebastião, por todos os ensinamentos e amor.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que passaram e que permanecem em minha vida, deixando significados que me constroem enquanto ser. Somos resultados das vivências e das pessoas.

“A vida me ensinou a nunca desistir. Nem ganhar, nem perder, mas procurar evoluir.”

Charlie Brown Jr.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a elaboração de um projeto de cabeçote adaptado para uma impressora 3D, Graber i3, modelo RepRap, a fim de permitir a impressão de objetos tridimensionais a partir do insumo em gel. Para isto, foram realizadas pesquisas no campo da literatura da manufatura aditiva e estudos sobre fluidos não newtonianos como insumo. Essa proposta do novo cabeçote se deu a partir da experiência com a montagem e uso de uma impressora 3D de filamentos. Além disso, foram analisadas possíveis alterações e adequações necessárias no equipamento para o funcionamento da extrusão de gel na impressão 3D. O resultado obtido neste trabalho sugere que é possível adaptar um caçote para impressão de gel em uma impressora Graber I3 usando materiais de baixo custo.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Impressão 3D. Cabeçote. Extrusão. Gel.

ABSTRACT

The present work has as objective the elaboration of a printhead design adapted for a 3D printer, Graber i3, model RepRap, in order to allow the printing of three-dimensional objects from the gel input. To this end, research was carried out in the field of literature on additive manufacturing and studies on non-Newtonian fluids as an input. This proposal for the new head came from the experience with the assembly and use of a 3D filament printer. In addition, possible changes and adaptations necessary in the equipment for the operation of the gel extrusion in 3D printing were analyzed. The result obtained in this work suggests that it is possible to adapt a container for gel printing on a Graber I3 printer using low-cost materials.

Keywords: Additive Manufacturing. 3D printing. Head. Extrusion. Gel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Processo de manufatura aditiva, Volpato 2007. | 16 |
| Figura 2 – Impressora RepRap 3D, modelo prusa i3. Fonte: RepRap3D. | 19 |
| Figura 3 – Versões preliminares e final do protótipo de cabeçote de PEREIRA, 2014. | 21 |
| Figura 4 – Processo 3DGP aplicado na impressão de aço inoxidável e TiC-316L, Zhenhui JI <i>et al.</i> (2018). | 22 |
| Figura 5 – Gráfico de velocidade de impressão x pressão de extrusão em diferentes diâmetros de bico, Zhenhui JI <i>et al.</i> (2018). | 23 |
| Figura 6 – Diagrama esquemático dos filamentos extrudados adjacentes, JI <i>et al.</i> (2018). | 24 |
| Figura 7 – Peça produzida pelo processo 3DGP aplicado na impressão de aço inoxidável e TiC-316L, JI <i>et al.</i> (2018). | 25 |
| Figura 8 – Protótipo de cabeçote aplicado na cromatografia planar, nas versões inicial e final, Fichou e Morlock (2008). | 26 |
| Figura 9 – Processo RLP, HAJASH <i>et al.</i> (2017) | 27 |
| Figura 10 – Protótipo de cabeçote aplicado na MA para deposição de biomateriais, MBULSKI e PINHEIRO (2017). | 29 |
| Figura 11 – Figura ilustrativa da Seringa Cirúrgica 20ml. | 34 |
| Figura 12 – Primeira versão do protótipo do novo cabeçote | 36 |
| Figura 13 – Versão final do pistão para acoplar os rolamentos lineares. | 37 |
| Figura 14 – Versão final do novo cabeçote. | 38 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| 3D | Tridimensional |
| 3DGP | 3D Gel Printer |
| ABS | Acrylonitrile Butadiene Styren |
| AM | Additive Manufacturing |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CNC | Computer Numerical Control |
| FDM | Fused Deposition Modeling |
| GET | Grupo de Educação Tutorial |
| IJP | Impressão a Jato de Tinta |
| LOM | Laminated Object Manufacturing |
| OSHW | Open Source Hardware |
| PCL | Policaprolactona |
| PDP | Processo de Desenvolvimento de Produtos |
| PLA | Polylactic Acid |
| RepRap | Replicating Rapid Prototyper |
| RLP | Rapid Liquid Printing |
| SLA | Stereolithography Apparatus |
| SLS | Selective Laser Sintering |
| SO | Sistema Operacional |
| STL | Stereolithography |
| TRS | Transverse Rupture Strength |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | Considerações iniciais | 12 |
| 1.2 | Motivação | 13 |
| 1.3 | Objetivo Geral | 14 |
| 1.3.1 | Objetivos Específicos | 14 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 15 |
| 2.1 | Manufatura Aditiva | 15 |
| 2.2 | Classificação dos Processo de Manufatura Aditiva | 16 |
| 2.2.1 | Líquido | 17 |
| 2.2.2 | Sólido | 17 |
| 2.2.3 | Pó | 18 |
| 2.3 | Máquinas de Código Aberto ou <i>Open Source Hardware</i> (OSHW) e o projeto RepRap 3D | 18 |
| 2.4 | Formato de arquivo .stl | 19 |
| 2.5 | Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) | 19 |
| 2.6 | Poliácido Láctico (PLA) | 20 |
| 2.7 | Projetos Relevantes | 20 |
| 2.7.1 | Projeto de Cabeçote para Extrusão de Filamento à Base de FDM | 20 |
| 2.7.2 | Processo 3D Gel Printer (3DGP) | 21 |
| 2.7.3 | Impressão 3D baseada em Código Aberto na Cromatografia Planar | 25 |
| 2.7.4 | Impressão Líquida Rápida em Larga Escala (Rapid Liquid Printing – RLP) | 26 |
| 2.7.5 | Adaptação de Máquina de Manufatura Aditiva de Baixo Custo para Deposição de Biomateriais | 27 |
| 3 | METODOLOGIA | 30 |
| 3.1 | Conhecimento em Engenharia Mecânica | 30 |
| 3.2 | A Impressora GRABER I3 | 30 |
| 3.3 | Matéria-prima: gel | 31 |
| 3.4 | Extrusor: Seringa Cirúrgica | 31 |
| 4 | DESENVOLVIMENTO DO CABEÇOTE | 32 |
| 4.1 | Montagem da impressora 3D, Graber I3 | 32 |
| 4.2 | O Novo Cabeçote | 33 |
| 4.3 | Seringa | 33 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.4 | Sistema de Acionamento | 34 |
| 4.5 | Sensor BLtouch | 35 |
| 4.6 | Mudanças no Software | 35 |
| 4.7 | Projetos | 36 |
| 4.8 | Orçamento do cabeçote | 38 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 40 |
| 5.1 | Direcionamentos futuros | 40 |
| | | |
| | REFERÊNCIAS | 41 |
| | | |
| | ANEXO A – COMPONENTES DA IMPRESSORA | 43 |
| | | |
| | ANEXO B – TERMO DE AUTENTICIDADE | 44 |
| | | |
| | ANEXO C – DESENHOS TÉCNICOS | 45 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A manufatura aditiva (*additive manufacturing – AM*) é um processo de fabricação em que a matéria-prima é colocada através de camadas subsequentes, resultando na produção de estruturas físicas tridimensionais (3D) com excelente qualidade e acabamento em um curto tempo, comparado aos métodos anteriores de fabricação (PEREIRA, 2014).

Historicamente, a construção de objetos físicos por meio de camadas não é uma ideia recente, sendo notada desde a sobreposição de blocos na edificação das pirâmides do Egito. Junto a isso, outras contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento da AM como as das áreas técnicas da topografia e da fotoescultura. Porém, somente em 1984, com a primeira patente de equipamentos comerciais registrada pelo engenheiro Charles W. Hull, fundador da empresa 3D Systems, que essa técnica se impulsionou no mercado. Inicialmente, baseava-se em estereolitografia (*stereolithography – STL*) para processo de impressão e, a partir de então, surgiram outras tecnologias similares.

Este trabalho adota a mesma nomenclatura de Volpato *et al.* (2017) que utiliza o termo impressão 3D como sinônimo de manufatura aditiva. A saber, essa impressão é tida como uma das tecnologias que é destaque na Era da Indústria 4.0.

Para Volpato um grande diferencial deste em relação aos demais processos de adição é a facilidade de sua automatização, dispensando moldes e ferramentas, minimizando consideravelmente a intervenção do operador durante o processo (VOLPATO ET AL, 2007).

Devido ao seu desenvolvimento, a impressão 3D está cada vez mais conquistando novas áreas de estudos e, conseqüentemente, de utilização. Tendo como pontos de destaque dessa tecnologia: a produção de objetos de estruturas geométricas complexas e a impressão de objetos acoplados, algo que era tido como impossível antes do surgimento desses equipamentos. Como exemplo, pode-se apontar, no campo da biomedicina, a sua utilização para fabricação de próteses; a presença de produtos de manufatura aditiva no âmbito automobilístico, no setor de joalheria, entre outros (VOLPATO ET AL, 2017).

Ainda, sob essa perspectiva teórica, tem-se a manufatura aditiva como sinônimo de dinamismo, pois utiliza em seu processo de fabricação as informações do objeto através de um sistema computacional que se comunica diretamente com a máquina e esta, por sua vez, imprime a peça sem o auxílio do operador. Tendo em vista esse marco dentro das tecnologias de manufatura, projeta-se o crescimento de oportunidades de pesquisa e aplicações.

Para além das etapas do projeto da AM, considera-se também a matéria-prima que será utilizada nesse modelo de processo de fabricação. Desse modo, tem-se insumos,

no estado líquido, sólido e em pó, usados de acordo com o que se deseja como produto final e, conseqüentemente, há a utilização de uma impressora 3D específica.

Considerando essa gama de insumos que pode ser usufruída nessa tecnologia, tem-se, por efeito, um leque de possibilidades de aplicações em manufatura aditiva, porém, de encontro aos seus avanços, ainda há limitações no campo teórico influenciando diretamente na práxis, em especial na impressão 3D com base em gel, tema que será abordado neste trabalho.

Essa lacuna de produção de conhecimento tornou ainda mais desafiadora esta elaboração científica ao passo que motiva a utilização desta como contribuição para novos trabalhos, pesquisas e aplicações dentro do campo da manufatura aditiva; da utilização de gel como insumo dessa tecnologia; da Engenharia Mecânica e de quaisquer áreas que perpassem esse tema.

1.2 Motivação

Ainda que o uso em geral da matéria-prima na manufatura aditiva, em estado líquido, sólido e em pó, seja significativo na Indústria da Tecnologia 4.0, até este momento há uma lacuna de publicações dessa área no Brasil.

Considerando os conhecimentos adquiridos durante a graduação em Engenharia Mecânica, em especial no Grupo de Educação Tutorial (GET), este trabalho tem como propósito a criação de um projeto de cabeçote para impressão de gel adaptado em uma impressora Graber I3. Portanto, tem-se como expectativa a possibilidade de se imprimir gel a partir das alterações sugeridas para esta impressora do grupo RepRap.

Espera-se que este projeto possa ser construído fisicamente, em breve, através de outros trabalhos e que sirva tanto para o enriquecimento e ampliação de estudos e pesquisas dessa temática quanto para o aumento de variedade de processos de fabricação, como, por exemplo, a impressão de biomateriais, de silicone em gel, etc.

Frisa-se que este trabalho não tem a preocupação com a qualidade da peça extrudada, mas sim em executar a impressão de gel a partir de uma impressora de filamentos. Também, é válido apontar que esse insumo, por ser um fluido não newtoniano, poderá apresentar algumas variações de viscosidade que poderão interferir na prática da impressão.

Outro ponto a se destacar é que a prototipagem desse novo cabeçote se pauta no baixo custo, quando comparado aos valores financeiros altos das máquinas para a impressão de líquidos.

1.3 Objetivo Geral

Projetar um cabeçote de baixo valor financeiro adaptado para uma impressora Graber I3, modelo RepRap, a fim de possibilitar a utilização de gel em impressão de peças tridimensionais em um equipamento que originalmente tem como finalidade a extrusão de filamentos.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Montar uma impressora Graber i3, modelo RepRap 3D;
- Levantar alterações que devem ser feitas no equipamento para impressão em gel;
- Servir-se de um extrusor de baixo custo e com funcionalidade para impressão em gel;
- Projetar adequações que devem ser feitas no equipamento Graber i3.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Manufatura Aditiva

De acordo com a norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM F2792-10), a manufatura aditiva é definida como o processo de fabricação de objetos tridimensionais projetados por softwares do tipo CAD (Computer Aided Design) e impressos, camada por camada, através de um extrusor ou outra tecnologia similar de impressão. Dentre as singularidades da AM, destaca-se a produção de objetos com geometria complexa e de peças conectadas indissociavelmente, ampliando assim a liberdade de projetos de construção de produtos.

Na linha do histórico desse processo de fabricação, Volpato *et al.* (2007) explica que o Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) tem sido uma área que se tornou intensa ao longo dos últimos anos. Isso se dá à medida que a competitividade do mercado convoca às empresas aceleração e fidedignidade dos projetos apresentados para os clientes. Desse modo, desenvolveram-se modelos computacionais que permitissem a criação de protótipos físicos para ajudar no andamento do produto.

Em meio à otimização da construção do PDP entre empresa e cliente, Volpato *et al.* (2007) aponta uma desvantagem do seu modelo convencional. Como os protótipos são criados baseados no desenho final das peças, por exemplo, caso seja notado algum erro, as correções deverão ser feitas e isso acarretará no aumento do custo financeiro, de tempo e, possivelmente, resultará no atraso do término do produto.

É importante ressaltar que na manufatura aditiva há um suporte necessário para verificar e efetuar as adaptações necessárias, diminuindo assim os riscos e as consequências negativas no processo. Para produzir um objeto tridimensional através da AM é necessário que o projeto seja feito em um software do tipo de CAD, desenho assistido por computador, e em seguida exportado em formato de arquivo “.stl” para um software de “fatiamento”, que divide o objeto em várias camadas bidimensionais e que permite ao projetista realizar ajustes e configurações de impressão. Após essas etapas, o arquivo é transferido por um cabo de dados ou um cartão de memória para a impressora e então o projeto se encontra em estágio final, pronto para iniciar o processo de fabricação, construindo fisicamente o objeto do empilhamento e aderência de suas camadas, começando da base até o topo do objeto (VOLPATO, 2007). Esse processo computacional e de manufatura podem ser vistos a seguir na *figura 1*:



Figura 1 – Processo de manufatura aditiva, Volpato 2007.

Essa tecnologia de impressão 3D é revolucionária e traz em sua base duas áreas técnicas: a topografia e a fotoescultura. No viés da topografia, Volpato *et al.* (2017) cita a contribuição de Blather, através da construção de modelos de mapas de relevos topográficos em 1890 e na fotoescultura, Frenchman François Willème com a criação de réplicas do objeto inicial. Esta última contribuição citada se deu através do experimento em que posicionou um objeto no centro de 24 câmeras fotográficas, que funcionaram simultaneamente e estavam distribuídas de modo igual no espaço entre elas. Após a combinação das fotos tiradas por cada câmera, um artista esculpiria a porção cilíndrica da figura.

Ao desenvolver dos anos, as combinações dessas técnicas, tidas como basilares para a AM, foram executadas e, desde então, se avançou em sistemas precursores à considerada estereolitografia atual. A execução a nível comercial só deu início em 1987, através do equipamento da 3D Systems chamado SLA-1 (*StereoLithography Apparatus*). (VOLPATO ET AL, 2007).

Percebe-se, então, segundo Volpato *et al.* (2017), que inicialmente a manufatura aditiva foi utilizada na produção rápida de conceitos, sem enfatizar a preocupação com a resistência e precisão das peças finais. Desse modo, a nomenclatura bastante utilizada pela literatura anterior foi a de prototipagem rápida.

Também, pode-se notar que nesta fase inicial a atuação do operador no processo é de modo mais participativo, aumentando o trabalho e a demora na execução da tarefa.

2.2 Classificação dos Processo de Manufatura Aditiva

Segundo Chua *et al.* (2003) existem vários tipos de manufatura aditiva no mercado e os mesmos podem ser classificados de acordo com o estado da forma inicial em que o material de insumo é encontrado. Essa classificação também é ratificada por Volpato *et al.* (2017), sendo assim, a partir dessa produção literária, os processos mais utilizados no

mercado são baseados em líquido, sólido e pó.

2.2.1 Líquido

Nesse processo, as resinas fotocuráveis são solidificadas por meio de uma fonte de luz, como é o exemplo da estereolitografia (*Stereolithography – STL*) ou por meio de um jato de tinta e exposto à radiação UV, como a impressão por jato de tinta – IJP.

Entre algumas das vantagens deste procedimento, pode-se citar a excelente precisão da resolução das camadas da peça e o acabamento superficial do produto final. Entretanto, essa manufatura aditiva apresenta algumas limitações como a necessidade de utilização de suporte em regiões ocas do objeto. Outros desses pontos são: necessidade de um processo de tratamento térmico de pós-cura para completar o procedimento de polimerização; restrita variedade de materiais de insumos e resina tóxica, normalmente agressiva ao operador.

A saber, é nesta classificação que se encontra o gel como matéria-prima da AM.

2.2.2 Sólido

Dentre os demais processos, esse é o que atualmente é mais difundido e utilizado nas indústrias, e, em sua maioria, usa filamentos poliméricos como matéria-prima. Como principal modelo de fabricação, opera-se à base de FDM (*Fused Deposition Modeling*) e geralmente se utiliza do ABS (*Acrilonitrila butadieno estireno*) ou do PLA (*Poliácido láctico*) como material de insumo. Ainda, outros modelos utilizam a manufatura laminar de objetos (*Laminated Object Manufacturing – LOM*) através da disposição sucessiva de folhas de materiais contendo adesivo em ambos os lados para construção da peça, camada por camada. Como vantagens, tem-se a utilização do equipamento em escritórios, pois o material inicial degrada menos o ambiente e não é nocivo ao operador; não há necessidade do uso de laser e do tratamento pós-cura; não há necessidade de construção de suporte para regiões não conectadas e há alta velocidade de fabricação. Pode-se apontar como ponto a ser desenvolvido a baixa variedade de material de insumo. Também, o modelo LOM não é recomendado para obtenção de paredes finas, pois a utilização sucessiva das folhas da matéria-prima não permite pequenos detalhes porque há dificuldade na etapa de remoção do material picotado no final do processo, ou seja, esse modelo não é indicado para a fabricação de peças complexas. Em relação ao processo FDM, esse modelo possui velocidade de fabricação lenta e limitada devido ao fluxo de deposição do extrusor, tem baixa precisão quando comparado aos demais equipamentos de AM e há necessidade de construção de um suporte em regiões não conectadas.

2.2.3 Pó

Tendo a matéria-prima em estado inicial de pó, utiliza-se um dos processos mais notórios na literatura: a sinterização seletiva a laser (*Selective Laser Sintering – SLS*). Nesse modelo, há o uso de alguma substância aglutinante de acordo com o metal utilizado juntamente com o pó metálico, coletado do reservatório. Essa substância é injetada por um jato e, em seguida, é espalhada e nivelada por um rolo sobre a superfície do pistão que irá refrear a peça a ser fabricada na impressão tridimensional. Dentre as vantagens desse modelo, destacam-se: a alta quantidade de material que pode ser utilizada como insumo; a possibilidade de fabricação de peças em metal e em cerâmica; a não necessidade de suporte de sustentação da peça em algumas dessa tecnologia e ótimo aproveitamento da matéria-prima, pois há também a sua reutilização. Apesar de tantos benefícios, os equipamentos de SLS apresentam um alto custo financeiro e elevado consumo de energia, pois requisitam lasers com alta potência.

2.3 Máquinas de Código Aberto ou *Open Source Hardware* (OSHW) e o projeto RepRap 3D

O projeto de máquinas de código aberto ou *Open Source Hardware* (OSHW), define-se como aquele equipamento ou hardware cujo o design é aberto ao usuário, permitindo que o mesmo faça alterações, estude e divulgue esta tecnologia. O projeto OSHW permite alterações tanto em sua programação quanto em sua estrutura com ferramentas acessíveis, além disso, o principal objetivo do projeto OSHW é incentivar a evolução e disseminação de conhecimento desta tecnologia (Open Source Hardware Association, 2020).

A partir das definições acima, podemos mencionar o projeto de AM, por Bowyer et al. (2005), na Universidade de Bath, no Reino Unido, que proporcionou a criação de uma impressora de baixo custo e de livre acesso, permitindo o uso tanto para fins acadêmicos, quanto para uso comum. O projeto recebeu o nome de RepRap (*Replicating Rapid Prototyper*) e atualmente está bastante popularizado tanto no meio acadêmico como para entusiastas da AM. Desde então, modificações foram feitas no projeto original trazendo melhorias estruturais, mecânicas e eletrônicas, por exemplo. O diferencial deste projeto se dá pela capacidade dessa impressora se auto replicar e a liberdade que o usuário possui para realizar alterações tanto no software, programação, quanto no hardware, equipamento.

A seguir, um exemplo de uma impressora do tipo RapRap, *fig. 2*:



Figura 2 – Impressora RepRap 3D, modelo prusa i3. Fonte: RepRap3D.

2.4 Formato de arquivo .stl

De acordo com Volpato *et al.* (2007) o formato de arquivo “.stl”, que significa estereolitografia, foi desenvolvido pela empresa Albert Consulting Group, em 1998, a pedido da empresa 3D Systems. Esse formato é baseado na triangulação de objetos tridimensionais, transcrevendo-os em um ponto flutuante utilizando coordenadas cartesianas (x, y e z) dos vértices de cada triângulo. Atualmente, todos os equipamentos de AM, juntamente com os softwares de fatiamento, são baseados na utilização do “.stl”, fazendo com que a maioria de softwares CAD ofereçam a opção de exportação do arquivo neste tipo de formato, além disso, existem até mesmo sistemas operacionais (SO) que já leem esse tipo de arquivo.

2.5 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)

O composto químico Acrilonitrila Butadieno Estireno é um material derivado do petróleo, constituído por três monômeros: acrilonitrila, butadieno e estireno. É um dos

termoplásticos mais utilizados no ramo da manufatura aditiva, segundo Portela (2020), e seu uso é empregado em tecnologias de FDM.

A razão por ele ser preferencialmente empregado na AM se dá pelas excelentes características, como resistência mecânica e térmica, pela sua flexibilidade e ótimo acabamento superficial, seja esse realizado através de uma lixa ou do tratamento com acetona. É importante ressaltar a necessidade de tomar os devidos cuidados ao utilizar a acetona e o ABS. O manuseio dessas substâncias deve ser feito em ambiente com atmosfera controlada e requer o uso de máscara, pois estas substâncias, em alta concentração, são tóxicas e podem causar danos à saúde humana.

A temperatura de fusão do ABS se encontra em torno de 225°C a 250°C e, entretanto, o material apresenta grande sensibilidade ao rápido resfriamento, causando o empenamento da estrutura da peça necessitando o uso de uma mesa aquecida que mantenha a temperatura entre 100°C a 120°C. Além disso, o aquecimento do ABS libera monóxido de carbono e cianeto de hidrogênio, como aponta Salinas (2014), e, em ambientes com significativa variação de temperatura, recomenda-se a impressão de ABS em uma câmara fechada a fim de evitar a contração da peça e a inalação de substâncias tóxicas prejudiciais ao organismo humano (3DLab, BR).

2.6 Poliacido Láctico (PLA)

Essa substância é biodegradável, portanto, é inofensiva ao meio ambiente por ser um biopolímero que faz parte da família dos poliésteres alifáticos, do tipo poli-hidróxiácido, e pode ser sintetizada quimicamente através do ácido láctico obtido de fontes renováveis como milho, trigo, arroz, etc (PORTELA, 2020).

O filamento de PLA tem como temperatura de fusão entre 160°C a 200°C, possui excelentes propriedades mecânicas e é de fácil impressão e moldagem. Além disso, pode ser utilizado em ambiente fechado ou aberto, por ser menos sensível à contração, devido ao seu rápido resfriamento. Dessa forma, a impressora dispensa mesa aquecida, entretanto o processo que utiliza esse controle tem melhor performance na qualidade da peça, sendo a temperatura recomendada de 70°C (MATTERHACKERS, 2013; ALBUQUERQUE, 2014).

2.7 Projetos Relevantes

2.7.1 Projeto de Cabeçote para Extrusão de Filamento à Base de FDM

Pereira (2014) desenvolveu um cabeçote para extrusão de filamento à base do processo de fusão e deposição. O autor verificou que o protótipo se mostrou funcional, quando aplicado em uma impressora RepRap, após fazer algumas alterações referentes à refrigeração do bico injetor, evitando, assim, o entupimento do mesmo. Após a validação

do cabeçote, o autor foi capaz de produzir peças com parâmetros de resolução de 0,3mm, visto que impressoras de uso profissional atingem um valor de 0,1mm.

As versões preliminares (A e B) e a final (C) podem ser visualizadas na figura seguinte:

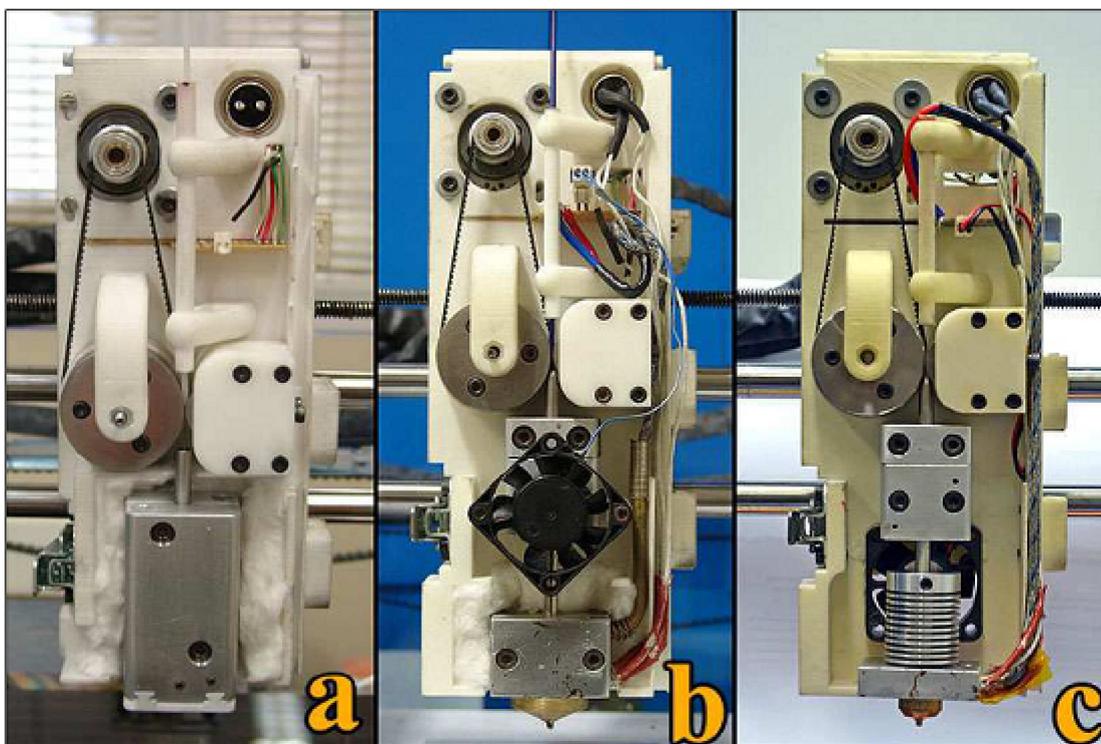


Figura 3 – Versões preliminares e final do protótipo de cabeçote de PEREIRA, 2014.

Além do notório resultado citado acima, o cabeçote completo obteve o peso de 1,2kg, não interferindo na capacidade do motor de passo utilizado na fabricação do extrusor. O cabeçote permite utilizar filamentos com diferentes tipos de polímeros e de materiais que possuem diferentes temperaturas de fusão como ABS, PLA e PCL (Policaprolactona). A relação de conexão entre as partes mecânica e eletrônica utilizadas na máquina foi compatível. Com o novo cabeçote permitiu-se que fossem feitas alterações em seu projeto, facilitando o aprimoramento e a manutenção do mesmo.

2.7.2 Processo 3D Gel Printer (3DGP)

No trabalho de Zhenhui Ji *et al.* (2018), os autores utilizaram o processo 3DGP, impressão em gel, e realizou modificações em uma impressora 3D, possibilitando que essa tivesse um sistema de injeção composto por um parafuso extrusor e um compressor de ar comprimido, cujo o mesmo transfere energia cinética suficiente para o processo de extrusão do gel. Ainda, foi usado o parafuso extrusor para realizar a mistura de forma homogênea e precisa dos compostos e para cumprir a função de injetar a pressão necessária para imprimir a substância. A sinterização e solidificação da amostra obtida nesse processo foram feitas

através de um forno à vácuo durante uma hora, usando uma taxa de aquecimento de 120°C/h.

Esse novo processo de manufatura aditiva permite ter mais possibilidades de realizações de projetos, pois há pluralidade de materiais que podem ser usados nessa tecnologia como vários tipos de cerâmica, de metais e de materiais compósitos. Além disso, o custo de produção dessa tecnologia é dos menores dentre outros processos, porque o equipamento é simples, não requer uma atmosfera protetora e não faz uso de laser para sinterização.

Nesse artigo, foi utilizado a tecnologia 3DGP para possibilitar a impressão do material compósito com matriz de aço inoxidável reforçado com TiC-316L com a adição de metacrilato2-hidroxieta (HEMA), o que causou a gelificação do composto. A gelificação é um processo baseado na polimerização radical de um monômero orgânico que forma uma rede macro polimérica para reter as partículas. O principal intuito do artigo é estabelecer a relação entre os parâmetros de impressão e a morfologia e rugosidade da superfície.

O esquema de projeto proposto por esse artigo pode ser visto na figura abaixo:

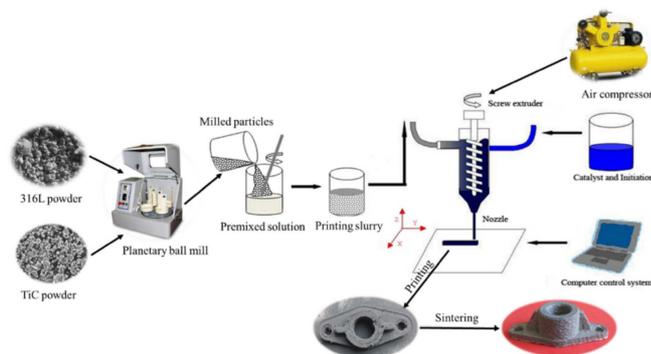


Figura 4 – Processo 3DGP aplicado na impressão de aço inoxidável e TiC-316L, Zhenhui JI *et al.* (2018).

Segundo o Zhenhui Ji *et al.* (2018), a velocidade de impressão, o tamanho do bico, a altura da camada e o valor da sobreposição da extrusão são fatores que influenciam diretamente na qualidade da impressão. Na impressão em gel 3D, a substância foi extrudada pelo parafuso para fora do bico e empilhada em camadas para formar uma entidade tridimensional. A velocidade de impressão dependeu principalmente do diâmetro do bico e da pressão da extrusão. Percebeu-se, então, que a continuidade dos processos de impressão deve à proporcionalidade entre a quantidade de extrusão e a velocidade de impressão.

Com base nas considerações acima, pode se afirmar que a velocidade de impressão (v) é determinada pela velocidade média da pasta (cm/s), definida pela seguinte fórmula:

Equação (2.1):

$$v = Q/\pi.R^2 \quad (2.1)$$

Em que:

- Q = taxa de volume da extrusão (cm^3/s);
- R = raio interno do bico(cm).

Após a análise experimental, utilizando bicos com diâmetro de 0,4mm; 0,5mm e 0,75mm, constatou-se que a velocidade de impressão aumentou rapidamente com o aumento da pressão de extrusão e a velocidade máxima de impressão foi de 20mm/s. A relação entre vazão volumétrica de impressão e pressão no extrusor nos diferentes diâmetros de bico foi determinada e pode ser vista nos gráficos da *fig. 5* (ZHENHUI JI, 2018):

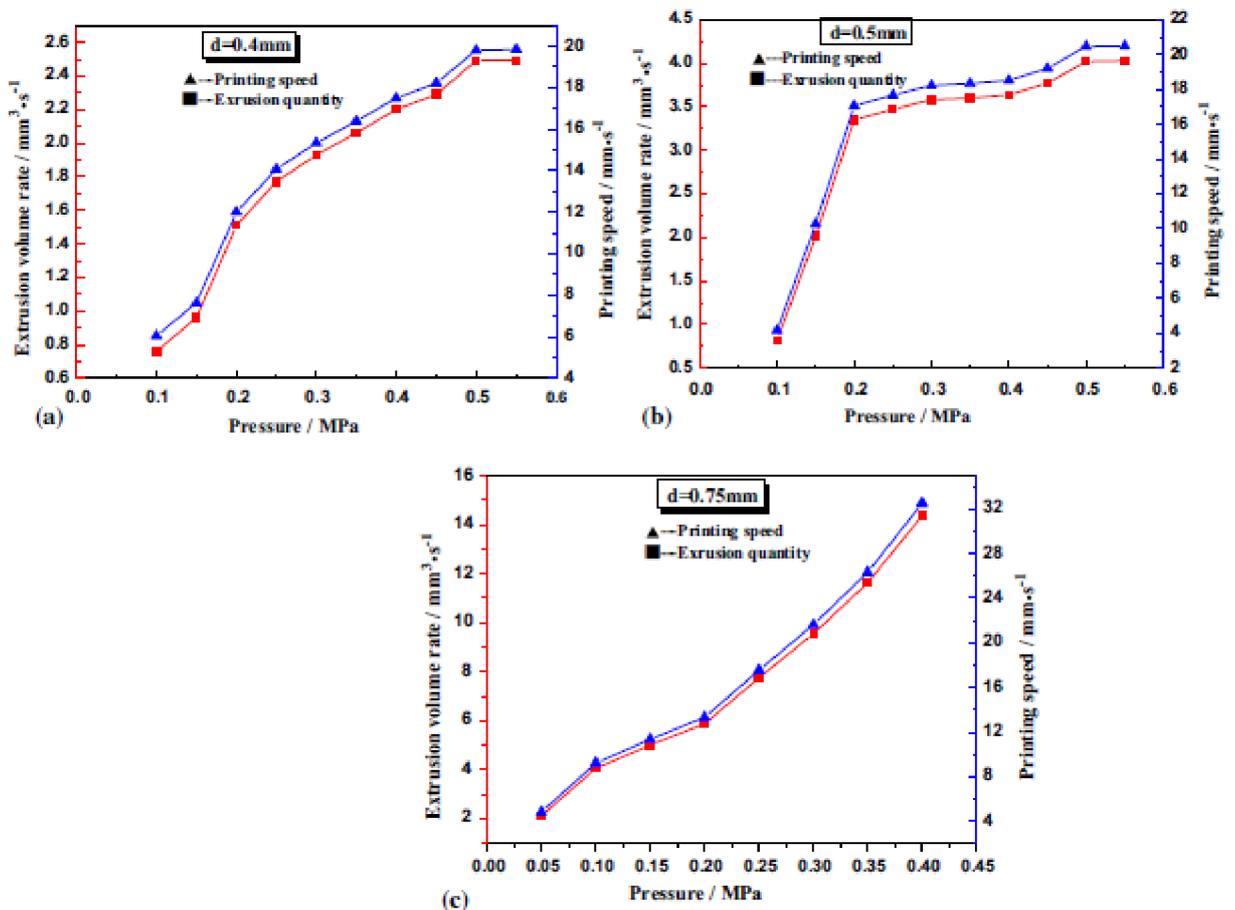


Figura 5 – Gráfico de velocidade de impressão x pressão de extrusão em diferentes diâmetros de bico, Zhenhui JI *et al.* (2018).

Zhenhui Ji *et al.* (2018) concluiu que a velocidade de impressão não aumentou significativamente com o aumento da pressão de extrusão e a principal razão para esse fenômeno é que, devido ao tamanho pequeno do bico, a taxa de vazão através do bico por unidade de tempo é limitada. A partir desses resultados, Zhenhui Ji *et al.* (2018) concluiu que maiores velocidades de impressão tendem a resultar em cura insuficiente das camadas impressas, dificultando a formação de filmes de impressão precisos e causando uma grande deformação sob o acúmulo de outros filmes de impressão.

Outro parâmetro analisado neste artigo foi a sobreposição que influenciou diretamente na rugosidade da superfície da amostra impressa e causou o “efeito etapa” entre os filmes de impressão adjacentes, o que significou que o espaço entre essas camadas não foi preenchido adequadamente.

Pode se ver na *figura 6* S1, que é a área sobreposta entre os filmes de impressão adjacentes, e S2, que representa o espaço entre esses filmes. Pode-se inferir que após o empilhamento, se a parte sobreposta da pasta S1 puder preencher completamente a lacuna S2 o “efeito etapa” da impressão 3D será bastante reduzido.

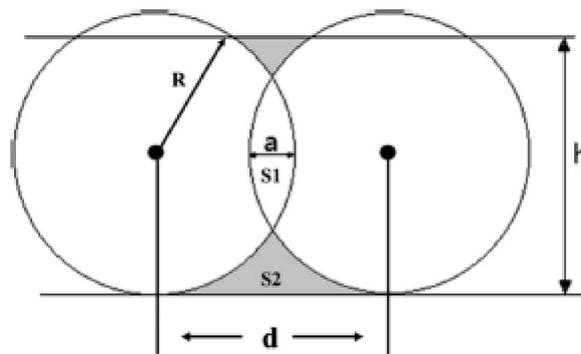


Figura 6 – Diagrama esquemático dos filamentos extrudados adjacentes, JI *et al.* (2018).

Levando em consideração esses fatores, estudou-se a influência dos parâmetros de sobreposição da extrusão na qualidade da amostra. Os autores utilizaram o bico com diâmetro de 0,5mm, projetando, que quando S1 for aproximadamente igual para S2, o “efeito etapa” na superfície da amostra impressa em 3D será mínimo e a rugosidade da superfície da amostra deverá atingir o valor mais baixo nesse momento. O parâmetro de sobreposição “a” atingiu o valor de aproximadamente de 0,08mm.

Por fim, pode-se ressaltar as seguintes conclusões alcançadas nesta pesquisa: o projeto se mostrou viável e de baixo custo quando comparado aos outros tipos de processos de manufatura aditiva em pó, como SLS e SLM; para a impressão de uma amostra à base composta por pasta de aço inoxidável e TiC-316L, os parâmetros ideais de sobreposição de extrusão de impressão foram de 0,08mm e a velocidade máxima de impressão foi de 20mm/s; para a amostra sinterizada, foi obtida uma densidade relativa de 97,9% e a dureza e o TRS (Transverse Rupture Strength) foram de 74,9HRA e 1230MPa, respectivamente.

Os desempenhos mecânicos foram semelhantes às amostras preparadas usando um processo convencional de metalurgia de pó, a amostra foi projetada com as seguintes dimensões tridimensionais (X, Y, Z) 120mm, 52,9mm e 38,2mm, respectivamente. Após a impressão, as dimensões tridimensionais do modelo foram de $120 \pm 5\text{mm}$, $52,96 \pm 5\text{mm}$, $38,24 \pm 4\text{mm}$, respectivamente. Após a sinterização, o modelo sofreu uma contração de aproximadamente 16% do seu volume inicial (ZHENHUI JI, 2018). A peça obtida neste processo pode ser visualizada na *figura 7*.

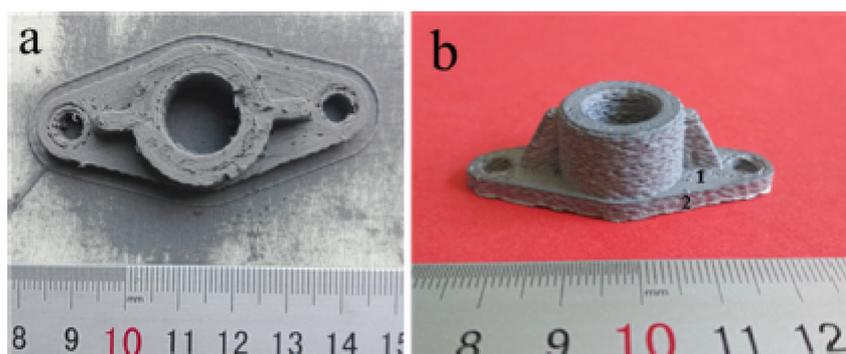


Figura 7 – Peça produzida pelo processo 3DGP aplicado na impressão de aço inoxidável e TiC-316L, JI *et al.* (2018).

2.7.3 Impressão 3D baseada em Código Aberto na Cromatografia Planar

O trabalho de Fichou e Morlock (2008), através de uma impressora 3D de código aberto, Prusa i3, realizou a substituição de um extrusor FDM por um cabeçote de baixo custo e de fácil fabricação. O projeto conta uma seringa de polipropileno de 10ml, com uma agulha de 1,2x50mm cortada horizontalmente a 25mm e com um motor de passo nema 17, que provoca o movimento do êmbolo da seringa, empurrando-o para baixo. Utilizou-se, também, parafuso e porca trapezoidal de 8mm, guiada por dois eixos lisos de 6mm de diâmetro e de 250mm de comprimento. Para controle do eixo Z foi utilizado um sensor indutivo. O novo cabeçote, já instalado na impressora, pode ser visto na *figura. 8*:

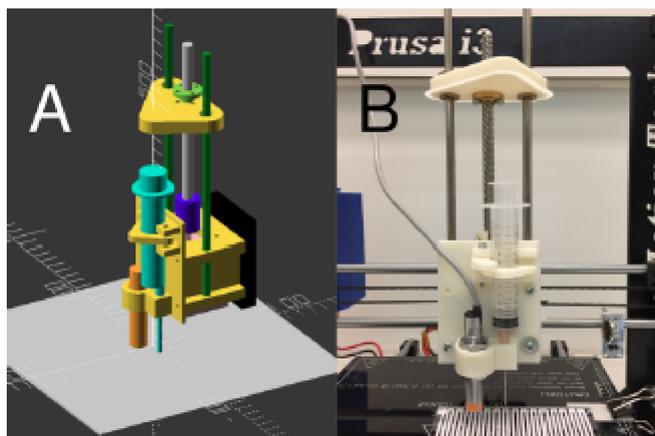


Figura 8 – Protótipo de cabeçote aplicado na cromatografia planar, nas versões inicial e final, Fichou e Morlock (2008).

A mudança de extrusor na máquina foi feita para que possibilitasse a impressão de finas camadas de gel de sílica (composto de 0,88g de sílica, de 0,12g de sulfato de cálcio e de 3,00g de água) aplicadas na cromatografia planar.

Esse processo, segundo Magalhães (2019), é uma técnica utilizada para separação e identificação de misturas heterogêneas ou substâncias em fases diferentes. Como resultado, pode-se citar que o protótipo se mostrou bastante promissor para aplicação da cromatografia planar, visto que o extrusor foi capaz de imprimir uma placa de 10x10cm e de camada 0,2mm, utilizando 4ml do gel, o que facilitou a identificação da mistura. Além disso, o projeto também se destaca pelo baixo custo de fabricação, que em média custa acima de 1000 euros, pois a impressora custou 550 euros e o novo cabeçote ficou em torno de 80 euros, totalizando 630 euros. Vale ressaltar que a viabilidade da mudança no hardware e software da impressora foi possibilitada devido a mesma fazer parte do grupo de impressoras RepRap, máquinas de código aberto (OS).

2.7.4 Impressão Líquida Rápida em Larga Escala (Rapid Liquid Printing – RLP)

Para Hajash *et al.* (2017), a manufatura aditiva ainda era vista como um processo de prototipagem rápida, devido às suas inúmeras limitações. Visando superar esses obstáculos, surgiu uma nova perspectiva, que tem o processo RLP, definido por Hajash *et al.* (2017), como de rápida impressão líquida. Essa nova tecnologia tem como objetivo aumentar a velocidade de impressão, a variedade de insumos e tornar desnecessário o uso de suportes em peças com lacunas vazias ou entidades não conectadas, por exemplo.

Para isso, o projeto sugere a adição de um sistema de deposição em um braço robô ou máquina CNC (Controle Numérico Computadorizado) que possua 03 eixos, estilo pórtico e a impressão do objeto é feita imersa a um reservatório de gel granular. Este gel foi produzido utilizando o carbômero 940, um polímero ácido poliacrílico reticulado

na forma de pó branco, que em seguida foi misturado com água em uma proporção de 50%. Entre os ensaios, os autores testaram diversos materiais, como por exemplo: gesso, concreto, espuma expansiva de uretano, epóxi, resina fotocurável, selantes marinhos, ligas de fundição, silicones e epóxi preenchidos com metais. Dentre esses, o silicone teve maior sucesso, superando a expectativa do uso de borracha de uretano, que possui propriedades mais rígidas, mas que reagiu com a água presente no gel, borbulhando e liberando CO₂.

Os pontos de destaques do trabalho de Hajash *et al.* (2017) são: o desuso do formato “.stl”, possibilitando que o novo tipo de arquivo produza linhas ou curvas que definem o percurso do bico, a reutilização do gel e o aproveitamento preciso do material de insumo, evitando o seu desperdício.

O experimento se mostrou bastante promissor, visto que atingiu resultados relevantes como a produção de peças em maior escala, por essa fabricação não estar limitada ao tamanho da máquina e por permitir movimentos omnidirecionais; o aumento significativo da variedade de insumos; a velocidade de impressão. (HAJASH ET AL, 2017).

Este processo pode ser visualizado na seguinte imagem, *fig. 9*:

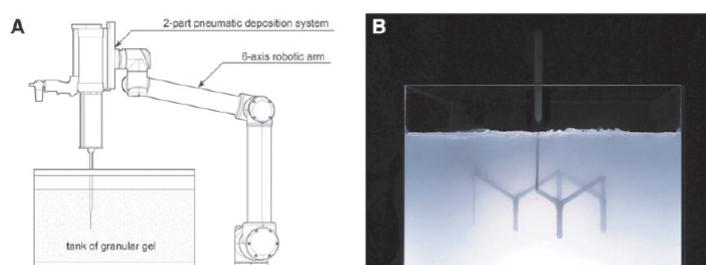


Figura 9 – Processo RLP, HAJASH *et al.* (2017)

2.7.5 Adaptação de Máquina de Manufatura Aditiva de Baixo Custo para Deposição de Biomateriais

O trabalho de Sambulski e Pinheiro (2017) propôs realizar a construção de um cabeçote para extrusão de biomateriais que possuem características de gel. Esse projeto, de baixo custo, foi adaptado para uma impressora, RepRap, Prusa i3.

Para a composição do cabeçote foi utilizado uma seringa de 20ml e a estrutura de suporte do extrusor foi impressa na própria impressora utilizando filamento de PLA, que, inclusive, reutilizou alguns componentes presentes no antigo cabeçote, como o motor de passo e sensores. Na figura abaixo pode ser conferido o projeto final do cabeçote:

Entre os materiais utilizados com destaque, pode-se citar o creme hidratante e o gel de cabelo, porém é válido citar que este apresentou alguns defeitos na geometria devido ao fato de ter bolhas de ar presentes em sua composição. Já o creme dental e o silicone

se mostraram inviáveis por serem substâncias que possuem alta viscosidade oferecendo resistência ao processo de extrusão.

Também, a velocidade de extrusão foi otimizada, visto que altas velocidades causam deformações geométricas na amostra.

O projeto de Sambulski e Pinheiro (2017), além de ter um orçamento baixo, atingiu resultados notórios: o novo cabeçote se mostrou funcional, viabilizando a produção de biomateriais e aumentou a utilização de variedade de insumos.

O projeto do cabeçote aplicado na extrusão de gel, pode ser visto na figura 10:

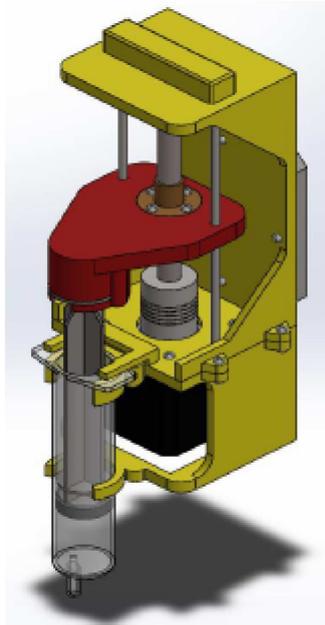


Figura 10 – Protótipo de cabeçote aplicado na MA para deposição de biomateriais, MBULSKI e PINHEIRO (2017).

3 METODOLOGIA

Esta produção científica é uma extensão de conhecimento desenvolvido no Grupo de Educação Tutorial (GET) de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), no Campus de Juiz de Fora - MG.

3.1 Conhecimento em Engenharia Mecânica

Tendo em vista que o GET tem como pilares básicos o ensino, a pesquisa e a extensão, entende-se que é de fundamental importância a produção de conhecimento através de projetos que, além de fomentar o aprendizado durante a graduação, podem ser aplicados em prol do benefício da sociedade.

Através da iniciação científica, foi proposto o estudo de desenvolvimento de um cabeçote específico para uma impressora 3D a fim de conseguir extrudar o insumo em gel. Portanto, para projetar esse protótipo, fez-se necessário a busca bibliográfica de manufatura aditiva, conseqüentemente, o estudo de impressoras 3D; pesquisa sobre possíveis materiais de baixo custo para funcionar como extrusor e sobre a matéria-prima, o gel.

3.2 A Impressora GRABER I3

Os critérios básicos para a escolha da impressora foram: o baixo custo de seu valor, a qualidade de sua performance e um sistema operacional aberto, permitindo alterações tanto no software quanto em sua estrutura, características relevantes para cumprir o objetivo deste trabalho científico. Partindo desse princípio, identificou-se a Graber i3, modelo pertencente ao grupo de impressoras RepRap.

Após a escolha e compra da Graber i3, realizou-se a etapa de sua montagem. A priori, essa máquina foi utilizada para a impressão de filamentos, em que se aplicou o método FDM.

O projeto contará com os seguintes componentes: motor de passo Nema 17; sensor BLtouch; suporte para o cabeçote fabricado em ABS; 01 pistão em ABS; 02 rolamentos lineares de 8mm; 01 eixo fuso de 8mm de diâmetro; 01 seringa cirúrgica de 20ml; 02 eixos guias aço 1045 de 8mm de diâmetro; 01 castanha de cobre de 8mm de diâmetro; 01 acoplador flexível; 06 parafusos e 06 porcas de 2mm de diâmetro e 12 parafusos e 08 porcas de 3mm.

Tendo em vista a necessidade de manter o projeto com o baixo custo financeiro, faz-se necessária a reutilização de componentes do cabeçote original da impressora. Sendo assim, reaproveitou-se o motor de passo e o sensor BLtouch, pois são essenciais para o funcionamento do novo cabeçote.

3.3 Matéria-prima: gel

Considerando o hiato literário com a utilização de gel como insumo da manufatura aditiva e a necessidade de produção de conhecimento na contribuição de desenvolvimento científico e de tecnologia, este projeto teórico se propõe a criar um cabeçote capaz de extrudar matéria-prima de fluido não newtoniano.

Sugere-se que, numa aplicação futura, se possa usar gel de cabelo, creme dental, silicone ou outros similares como material experimental da funcionalidade deste estudo.

3.4 Extrusor: Seringa Cirúrgica

Com base no foco orçamentário deste trabalho, aspira-se que a seringa cirúrgica tem funcionamento necessário para extrudar o gel. Isso se dá devido ao seu mecanismo em que a pressão exercida no êmbolo é transmitida imediatamente para o fluido. Sendo assim, este tende a sair da seringa na mesma pressão da força que foi exercida no êmbolo.

A saber, optou-se pela seringa cirúrgica de 20ml, de fácil acesso de compra.

4 DESENVOLVIMENTO DO CABEÇOTE

4.1 Montagem da impressora 3D, Graber I3

A GRABER I3 é uma impressora de estilo cartesiano, ou seja, conta com os eixos x, y e z, e imprime filamentos termoplásticos como ABS e PLA.

Realizou-se a montagem da máquina, no laboratório compartilhado entre áreas de manufatura aditiva e de metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Juiz de Fora - MG, através das orientações do manual de instruções fornecido pelo fabricante; a instalação do software foi feita baseada na cópia permitida de um código livre feito para impressoras 3D do tipo RepRap que utiliza arduino; alterações no código fonte foram feitas baseadas na montagem do equipamento a fim de regular os componentes mecânicos, eletrônicos e sensores.

Para o balanceamento e regulagem da mesa, além do uso do manual da máquina, contou-se com o auxílio de um paquímetro para a sua calibração.

Outro passo da montagem, foi a medição da distância entre o bico e o sensor BLtouch. Através da tela de LCD, ajustou-se a configuração de distância mínima de 4,75mm para impressão, entre o bico e o sensor, ou seja, quando o bico do extrusor atingir o ponto 0 em Z, ele se movimentará nesse eixo a -4,75mm para iniciar o processo de impressão. A máquina possui uma fonte bivolt e, na ocasião, se escolheu a tensão para o seu uso de 127V.

As velocidades de todos os motores, inclusive o de extrusão, foram reprogramadas, de acordo com a preparação da máquina, para maximizar a precisão e normalizar o processo de impressão. Notou-se algumas necessidades e, a partir de então, alguns comandos foram adicionados ao sistema da impressora. A saber: zerou-se os eixos no meio da mesa de 200x200mm; acionou-se o nivelamento automático da mesa antes de iniciar o processo de impressão; adicionou-se comando para elevar e retirar o cabeçote para posição inicial após a impressão, desta forma, evita que o extrusor aquecido permaneça na superfície da peça, impedindo a possibilidade de deformação e derretimento da estrutura.

Após a montagem da impressora, observou-se que as peças produzidas, utilizando o polímero ABS, apresentavam deformações significativas, o que levou às investigações para solucionar esse defeito.

Na pesquisa, concluiu-se que a causa dessa falha foi o uso do ar-condicionado em temperatura constante de 20°C. O polímero em questão é muito sensível à mudança repentina de temperatura, portanto sofreu retração logo após ser expelido pelo bico extrusor. A rápida e forçada refrigeração gerada pelo ar-condicionado foi o fator determinante para a contração do plástico que resultou baixa aderência sobre a mesa aquecida e deformações nas peças produzidas pela impressora.

A temperatura do laboratório em 20°C é justificada pelo fato de sua obrigatoriedade na manutenção de seus equipamentos, evitando alterações na calibração dos instrumentos de metrologia, como paquímetros, microscópio, equipamentos de medição de dureza, etc. Desta forma, realocou-se para outro laboratório, o de processos de soldagem, onde não havia equipamentos de refrigeração que interferissem no processo de impressão.

Devido a primeira camada ser um fator determinante para a qualidade da peça, já que promove a sustentação e fixação da estrutura, configurou-se a velocidade dessa para 30% da velocidade usual do processo de impressão.

A partir dessa experiência e da ausência de estudos voltados para o uso do gel como insumo da impressão 3D, percebeu-se a necessidade de construir um protótipo inovador com a finalidade, através de outros estudos práticos, possibilitar a impressão de peças tridimensionais a partir de fluidos não newtoniano. Para tal, entende-se que é preciso criar teoricamente um novo cabeçote para a impressora.

4.2 O Novo Cabeçote

Para desenvolver a proposta deste trabalho, realizaram-se pesquisas literárias sobre estudos em impressão 3D e, em especial, os que utilizaram o gel como matéria-prima. A partir de então, faz-se necessário o levantamento de pontos teóricos para a construção do novo cabeçote na impressora Graber I3. Também, para maximizar o aproveitamento de recursos, recomenda-se que a nova estrutura projetada utilize alguns componentes do antigo cabeçote como o motor de passo e sensor BLtouch.

Para atender todos os requisitos do projeto, o suporte fabricado em ABS deverá ser projetado para encaixar de forma exata no antigo suporte da impressora, sendo reservado local para os 03 rolamentos que permitem a movimentação do cabeçote pelo eixo X. O engate para a seringa deve ser projetado de forma a fixá-la, sem folgas para evitar absorção de vibração gerada pela máquina e o engate deverá prender a seringa permitindo apenas o movimento de seu êmbolo. O suporte do cabeçote, deverá ser projetado evitando peças separadas, mantendo o espaço mínimo entre elas, e, quando necessário, reservar orifícios de 3mm, para a passagem de parafusos e porcas, para montagem de componentes separados.

Com inspiração na pesquisa de Sambulski e Pinheiro (2017), este trabalho se utiliza de uma seringa como elemento extrusor capaz de expelir o gel. Essa escolha de extrusor se deu devido a facilidade de encontrar o equipamento e por seu baixo custo e versatilidade, possibilitando a realização de alterações.

4.3 Seringa

A princípio optou-se pela seringa cirúrgica de maior capacidade disponível no mercado, 20ml, visando uma maior reserva de material. Para outros estudos, aponta-se

que a seringa permite utilizar agulhas de diferentes diâmetros, viabilizando maior variedade de materiais com viscosidades distintas para futuras testagens. Ponto de modularidade deste projeto.

Espera-se, então, que a seringa exerça a função de expelir o gel e, portanto, o processo de impressão está limitado à capacidade de armazenamento da mesma. É necessário que a seringa seja instalada no cabeçote de modo que ambos se movimentem apenas nas direções X e Z, acionados pelos respectivos motores de cada eixo.

Este novo projeto de cabeçote permite a remoção da seringa para o reabastecimento de gel, propiciando a liberdade de colocar manualmente essa substância, uma vez que esse extrusor se acopla através de parafusos e porcas com diâmetros de 3mm, permitindo a remoção e entrada da seringa no cabeçote.

A seringa pode ser vista na figura abaixo, *fig. 11*:



Figura 11 – Figura ilustrativa da Seringa Cirúrgica 20ml.

4.4 Sistema de Acionamento

O sistema de acionamento é o responsável por movimentar e pressionar o êmbolo da seringa e, para isso, necessita-se de um sistema de transmissão que transfira o movimento de rotação do eixo do motor em movimento alternativo vertical.

Neste projeto, utilizar-se-á o acoplador flexível para juntar o motor de passo e eixo fuso de 8mm de diâmetro. Faz-se necessário que o eixo fuso e os eixos guias de aço 1045 possuam comprimento mínimo de 100mm para que permitam a movimentação total do curso do êmbolo da seringa, utilizando todo volume de gel inserido ou enquanto durar o processo de impressão. Outro ponto de construção é o acoplamento da castanha de cobre ao pistão, fabricado em ABS, inserindo o eixo fuso, e projetada para se movimentar na posição vertical. Os eixos guias de aço 1045 tem como funções o apoio estrutural, o

nivelamento e impedimento de rotação do pistão e, conseqüentemente, da castanha de cobre. Espera-se, então, que o pistão, ao descer, irá empurrar o êmbolo da seringa contra o gel e, assim, de forma precisa e controlada, iniciará o processo de impressão.

Os componentes deste sistema de acionamento, como acoplador flexível, eixos guias, o eixo fuso serão de diâmetro 8mm. A saber, a escolha desse diâmetro se deu ao fato dos sistemas de movimentação e de estruturação da impressora original serem baseados nessa medida.

4.5 Sensor BLtouch

O BLtouch é um sensor automático comumente utilizado em impressoras 3D para a realização do auto nivelamento da mesa. Em comparação aos sensores capacitivos e indutivos, o BLtouch apresenta uma alta precisão, eficiência e maior velocidade de informação. Além disso, ele também possui uma maior compatibilidade com a mesa independentemente do material que a compõe, seja metal, vidro, madeira etc.

Ao projetar o suporte para o novo extrusor, faz-se necessário reservar um local para instalação do sensor BLtouch, lateralmente à esquerda do bico da seringa, pois esse sensor será responsável pelo balanceamento da mesa e fim de curso do eixo Z, interrompendo de forma imediata o movimento vertical da máquina. Também, torna-se indispensável que o BLtouch esteja no mesmo nível que o bico injetor, que é o próprio bico da seringa, e ficar o mais próximo possível da mesa, evitando deformações e aumentando a fixação da primeira camada no processo de impressão.

4.6 Mudanças no Software

Para evitar que alterações de temperaturas causem eventualidades no produto final, necessita-se realizar alguns ajustes no software original da impressora. Inicialmente, recomenda-se desligar a mesa, que normalmente fica aquecida no processo de impressão de filamentos, e retirar a condição original que o motor do extrusor só poderá ser acionado após o hot end alcançar a temperatura de fusão do material, uma vez que o hot end é a resistência que aquece e derrete os polímeros.

Tem-se, por consequência, a alteração da velocidade do motor, convocando um novo cálculo de rotação do motor de passo, já que não haverá redução dessa rotação na transmissão para o sistema de acionamento e será feita através de um acoplador flexível, que juntará o eixo do motor com a barra roscada. Esse cálculo deve ser feito de forma manual, utilizando um aparelho de aferir comprimento, possibilitando alteração para que a velocidade do motor de passo seja ajustada para o novo processo de impressão.

Ainda que o gel seja um material não newtoniano, infere-se que o aquecimento da mesa possivelmente diminuirá a viscosidade dessa substância à medida do aumento da

temperatura, ocasionando possível mudança de estado físico da matéria-prima. Portanto, sugere-se que seja acionado o comando de desligamento da mesa para evitar danos na peça tridimensional.

4.7 Projetos

Após o levantamento de estudos para a formulação do protótipo do cabeçote, projetou-se uma expectativa positiva na sua funcionalidade, porém, percebeu-se também que o pistão de acionamento do êmbolo da seringa poderia apresentar dificuldade de movimentação, considerando o atrito entre os eixos guia e os orifícios do pistão, tendo em vista que o contato entre eles é de forma direta, entre o aço e o plástico.

A versão preliminar do cabeçote pode ser vista na *figura 12*:

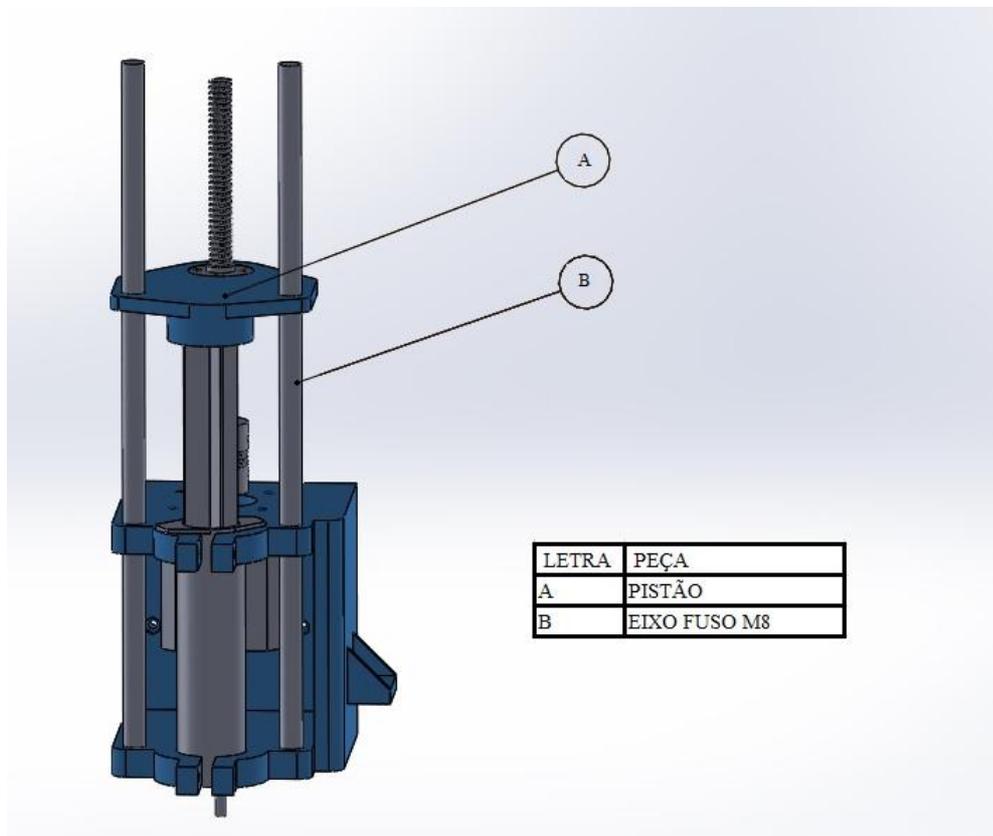


Figura 12 – Primeira versão do protótipo do novo cabeçote

A partir dessa consideração, reformulou-se o novo modelo do cabeçote com a utilização de equipamentos para reduzir o atrito na movimentação do pistão e, para isso, escolheu-se rolamentos lineares.

Considerando os benefícios desses auxiliares, projetou-se um novo pistão de acionamento com a utilização de 02 rolamentos lineares para a sua composição. Assim, dividiu-se, ao meio, o pistão para acoplar esses equipamentos, o projeto do novo pistão pode ser visualizado na figura 13.

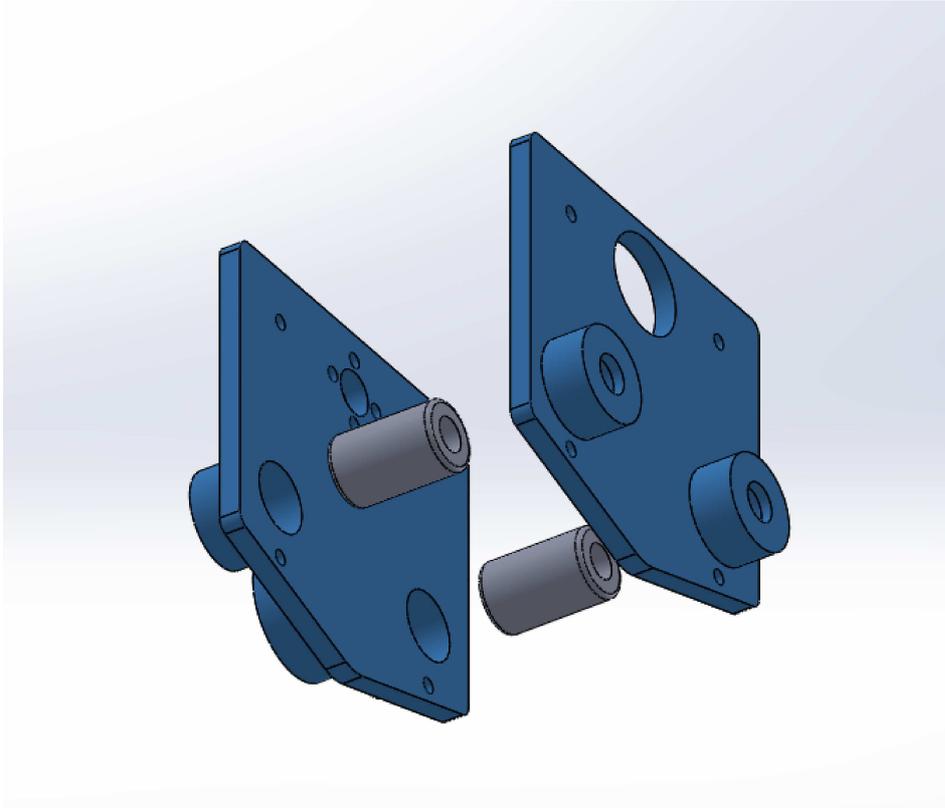


Figura 13 – Versão final do pistão para acoplar os rolamentos lineares.

Após a remodelação do pistão, com os rolamentos lineares, foi feita uma nova montagem do projeto, *fig. 14*:

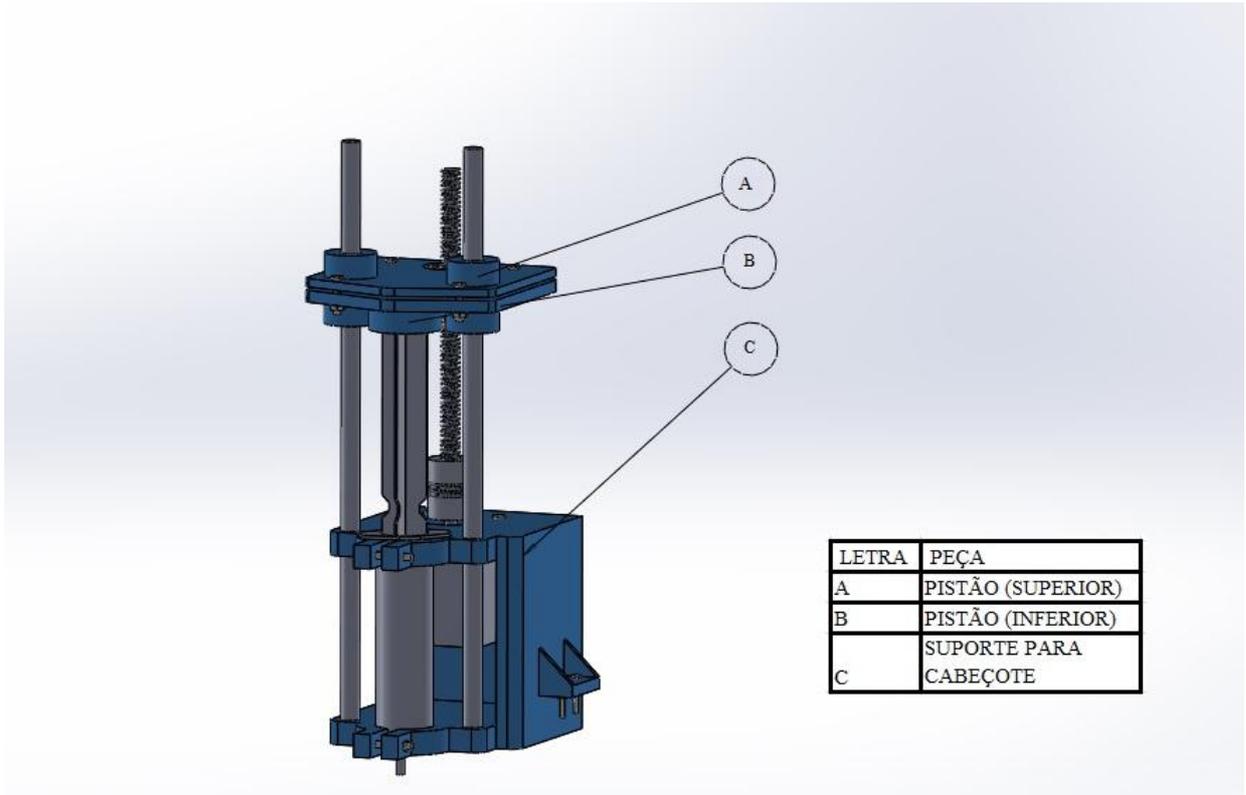


Figura 14 – Versão final do novo cabeçote.

Sugere-se que os componentes em azul, o suporte do extrusor, na parte inferior, e o pistão, na parte superior da figura, sejam fabricados através da própria impressora 3D, antes de sofrer as alterações para impressão em gel. O suporte para o cabeçote e os pistões inferior e superior serão fabricados pela impressora utilizando o filamento em ABS, visto que o ABS apresenta maior resistência dentre os filamentos disponíveis no mercado. O projeto detalhado deste cabeçote pode ser observado no anexo C.

4.8 Orçamento do cabeçote

Por fim, podemos notar na tabela 1, o valor total do projeto do cabeçote foi avaliado em R\$ 146,81 reais, sendo os elementos mecânicos, como eixo guia, eixo fuso, acoplador flexível, rolamentos lineares, seringa, parafuso e porcas foram avaliados se embasou no custo de cada produto disponível em sites comerciais. Já as peças fabricadas em ABS foram feitas as simulações de volume a ser fabricado, utilizando softwares de fatiamentos com preenchimento em 60%, e tomando como consideração o preço do quilo do ABS em R\$ 110,00 e as respectivas massas do suporte para o extrusor, do pistão inferior e do pistão superior 207g, 39g, 27g.

Tabela 1 – Tabela de materiais e custo

| Quantidade | Nome da peça | Preço |
|------------|-----------------------------|------------|
| 1 | Acoplador flexível | R\$ 16,50 |
| 1 | Eixo fuso Ø8mm | R\$ 49,90 |
| 2 | Eixo guia Ø8mm | R\$ 10,00 |
| 1 | Suporte para o extrusor ABS | R\$ 22,77 |
| 1 | Seringa cirúrgica | R\$ 0,98 |
| 1 | Pistão inferior ABS | R\$ 4,29 |
| 1 | Pistão superior ABS | R\$ 2,97 |
| 2 | Rolamento linear | R\$ 22,00 |
| 39 | Parafuso M3 | R\$ 7,80 |
| 15 | Parafuso M2 | R\$ 3,00 |
| 16 | Porca M3 | R\$ 3,20 |
| 17 | Porca M2 | R\$ 3,40 |
| | TOTAL | R\$ 146,81 |

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta produção científica permitiu ampliar os estudos de manufatura aditiva, perpassando pelo seu histórico, pelas formas mais comuns de utilização de suas matérias-primas e, também, pelas práticas de alguns autores dentro desse universo tão múltiplo, mas que ainda se limita à sua baixa produção em estudos e pesquisas.

Foi de fundamental importância esse levantamento literário agregado à experiência da vivência no Grupo de Educação Tutorial (GET) de Engenharia Mecânica da UFJF para o desenvolvimento do projeto do novo cabeçote na impressora GRABER I3.

A partir dessa prática com essa impressora 3D, em laboratório na Universidade Federal de Juiz de Fora – MG, percebeu-se a necessidade de ampliar estudos com o gel como insumo de manufatura aditiva. Para que isso fosse possível, verificou-se que essa máquina RepRap poderia ser modificada com a adaptação de um novo cabeçote para possibilitar a extrusão desse material.

Para atingir esse objetivo, de construção teórica desse protótipo, percebeu-se que poderiam ser reaproveitados elementos eletrônicos da impressora 3D de modo a contribuir, também, com outro foco deste projeto que é o seu baixo custo financeiro. Nesse viés, sugeriu-se ainda a utilização da Graber I3 original para imprimir o novo cabeçote.

Desta forma, foram levantadas possíveis alterações para a nova estrutura, como acoplamento de rolamentos lineares e a utilização da seringa cirúrgica de 20ml como elemento de extrusão.

Esta produção acadêmica não teve a pretensão de esgotar as possibilidades diante do viés do uso do gel como insumo e tão pouco no que tange a manufatura aditiva. Sugere-se que outras produções possam aprofundar ainda mais este assunto e fazer outros recortes, em especial, a partir da aplicação prática desta elaboração teórica.

5.1 Direcionamentos futuros

Este trabalho tem uma relevante contribuição na área de manufatura aditiva no Brasil e uma das intenções deste projeto é ampliar os estudos e pesquisa de modo a difundir cada vez mais esse processo de fabricação. Sugere-se que outros estudos se aprofundem ainda mais na área de géis e na viabilidade de outros cabeçotes com maiores capacidades de impressão 3D.

REFERÊNCIAS

- [1] ASTM F2792-10. *American Society for Testing and Materials* Standard terminology for additive manufacturing technologies, copyright ASTM International - 2010, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, 2010.
- [2] ALBURQUERQUE, Alberto Juan. *Optimización y Caracterización de Piezas de PLA Fabricadas Mediante Técnicas Aditivas*. 2014. 138 f. TCC (Graduação) - Curso de Ingeniería En Tecnologías Industriales, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2014.
- [3] CHUA, C. K., Leong, K. F., Lim, C. S., *Rapid prototyping: principles and applications*, 2nd edition, World Scientific, New Jersey, 2003.
- [4] FICHO, D.; MORLOCK, G. E. *Open-Source-Based 3D Printing of Thin Silica Gel Layers in Planar Chromatography, Analytical Chemistry*. Giessen, Alemanha, v. 89, nº3, p. 2116 - 2122, 2017.
- [5] HAJASH, K.; SPARRMAN, B.; GUBERAN, C.; LAUCKS, J.; TIBBIST, S. Large-Scale Rapid Liquid Printing, 3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING. Self-Assembly Lab, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts. v.4, p. 123-132, 2017.
- [6] MAGALHÃES, IANA *Cromatografia, artigo revisado em 31/10/2019* Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/cromatografia/>. Acessado em 19 de abril de 2020.
- [7] MATTERHACKERS. *HOW TO SUCCEED WHEN PRINTING IN PLA. 2013*. Disponível em: <http://www.matterhackers.com/articles/how-to-succeed-when-printing-in-pla>. Acesso em: 19 de abril de 2020.
- [8] OSHW. Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. *Open Source Hardware 1.0* Disponível em: <https://www.oshwa.org/definition/portuguese/>. Acesso em: 19 de abril de 2020.
- [9] PEREIRA F.D.A.S, 1983- Desenvolvimento de um cabeçote para extrusão de filamento fundido aplicado a manufatura aditiva / Frederico David Alencar de Sena Pereira. Campinas, SP : [s.n.], 2014
- [10] PORTELA, Sérgio. *Filamento PLA: como imprimir com esse filamento*. Disponível em: <https://3dlab.com.br/como-imprimir-com-filamento-pla/>. Acesso em 19 de abril de 2020.
- [11] PORTELA, Sérgio. *Filamento ABS: como imprimir com esse filamento*. Disponível em: <https://3dlab.com.br/como-imprimir-com-filamento-pla/>. Acesso em 19 de abril de 2020.
- [12] JONES, R.; HAUFE, P.; SELLS, E.; IRAVANI, P.; OLLIVER, V.; PALMER, C.; BOWYER, A.; *RepRap – the replicating rapid prototype*, Robotica v. 29, Cambridge University Press. p. 177–191, 2011.
- [13] REPRAP, *Impressora Impressora RepRap 3D*, Disponível em: <https://www.reprap3d.com.br/produto/kit-impressora-3d-graber>, Acesso em 19 de abril de 2020.

- [14] SALINAS, Richard. 3D Printing with RepRap Cookbook. Birmingham: Packt Publishing, 2014. 346 p.
- [15] SAMBULSKI, Rodrigo; PINHEIRO, Rodrigo. Adaptação de uma máquina de manufatura aditiva de baixo custo para deposição de biomateriais. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica) – Programa de graduação, Universidade tecnológica federal do Paraná. Curitiba, p. 1-68, 2017.
- [16] Volpato, Neri (Ed.). *Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações*. São Paulo: Blücher, p 4-10, 2007.
- [17] Volpato, Neri (Ed.). *Manufatura Aditiva - Tecnologias e aplicações da impressão 3D* São Paulo: Blücher, p 3-10, 2018.
- [18] 3D Systems. *Nossa História*, Disponível em: <https://br.3dsystems.com/our-story>. Acessado em 19 de abril de 2020.
- [19] JI, Z.; ZHAO, D.; HAO, J.; ZHANG, X.; WANG, J.; *3D Gel-Printing of TiC-Reinforced 316L Stainless Steel: Influence of the Printing Parameters*. Journal of Materials Engineering and Performance, Pequim - China, v. 27, n°10, p. 5500-5010, 2018.

ANEXO A – COMPONENTES DA IMPRESSORA

Componentes da impressora RepRap 3D, segundo o fabricante:

- Estrutura no material selecionado acrílico (polimetil-metacrilato, PMMA) ou mdf (medium-density fiberboard) - Modelo Graber i3 RepRap3D
- 5 Motores de Passo Nema 17 - 5 kgf de torque
- Eletrônica Ramps 1.4
- Arduino Mega
- 5 drivers para motor de passo.
- Kit de Nivelamento Automático da mesa
- Cooler para eletrônica (60x60 mm)
- Chaves fim de curso mecânica (microswitch)
- Bico Aquecido All Metal (hot end)
- Cooler para o bico com suporte em plástico injetado no estilo E3D
- Mesa aquecida MK2 com termistor já acoplado e com fios de ligação já soldados
- Suporte da mesa em alumínio
- Pillow blocks para o eixo Y
- Fiação: motores, end stops, bico, mesa
- Fiação: motores, end stops, bico, mesa
- Guias lineares em aço 1045 retificado e cromado - diâmetro 8 mm (total de 6 barras)
- Fusos trapezoidais TR-8 (para eixo Z)
- Castanha TR8
- Kit de porcas, parafusos e arruelas para montagem da: estrutura, mesa, eletrônica e fonte
- Molas de compressão (mesa + extrusor)
- Correia GT2
- Polias em alumínio GT2 - 20 dentes
- Acopladores flexíveis em alumínio para o eixo Z

ANEXO B – TERMO DE AUTENTICIDADE**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA****Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria**

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 12 de Março de 2021.

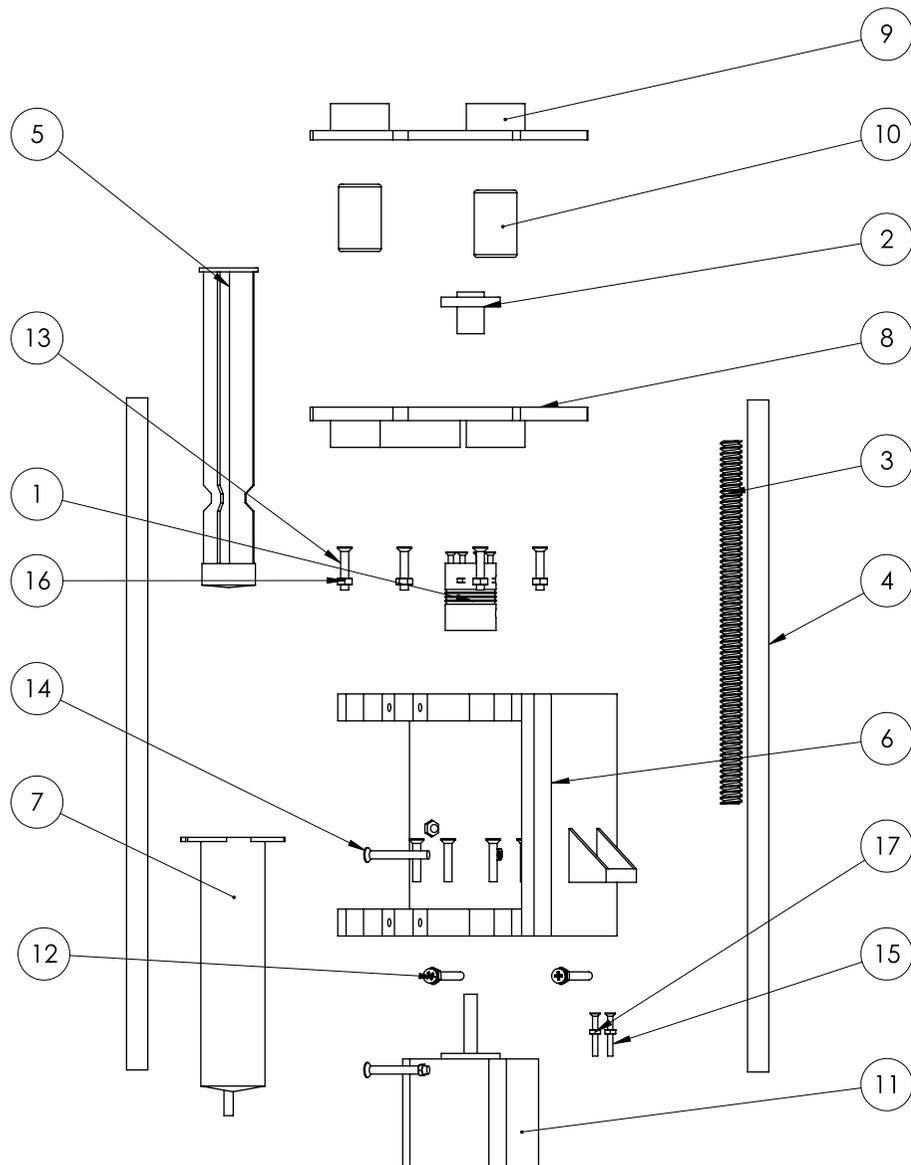
Assinatura manuscrita de Nathan Carlos de Oliveira Ribeiro.

Natthan Carlos de Oliveira Ribeiro – Discente
Matrícula: 201671031 – CPF: 11538512610:

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

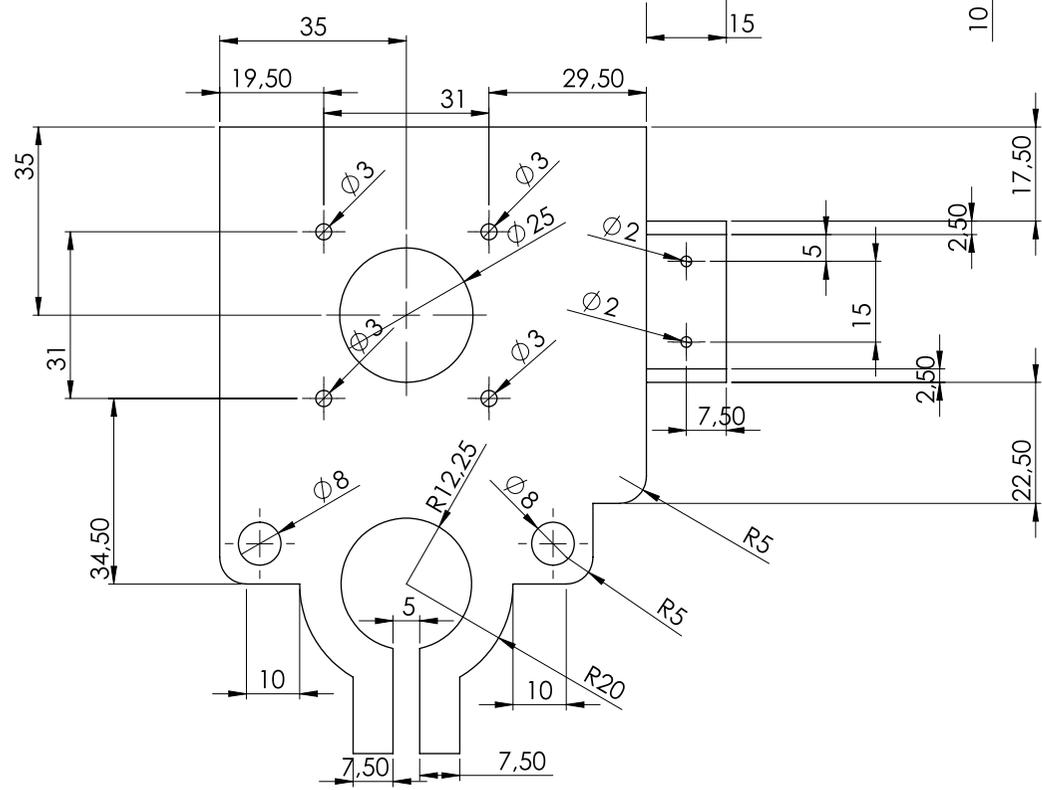
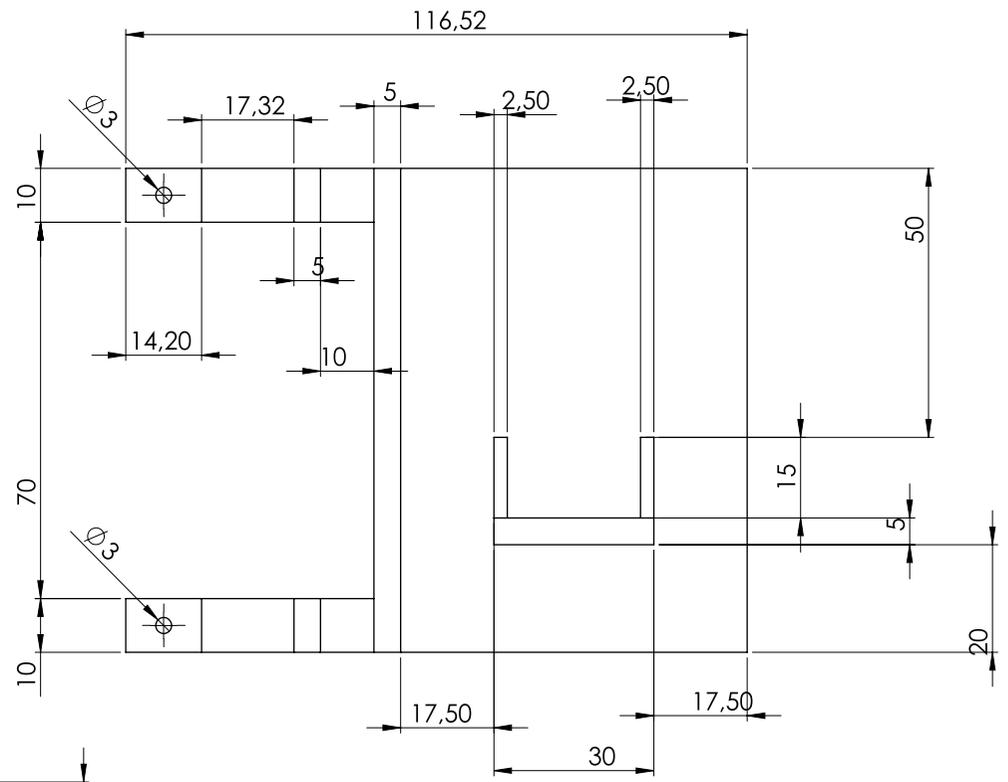
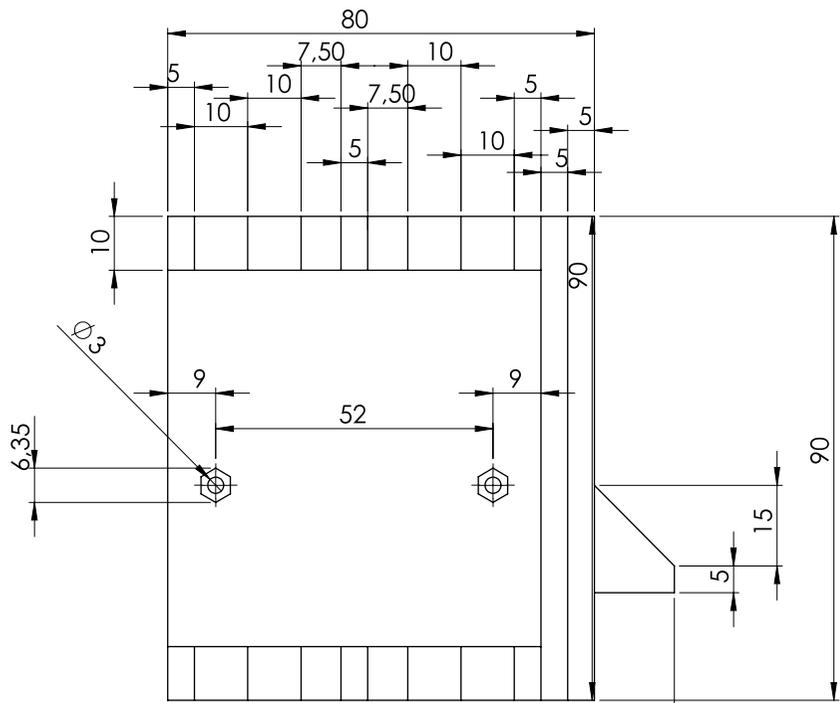
² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.

ANEXO C – DESENHOS TÉCNICOS

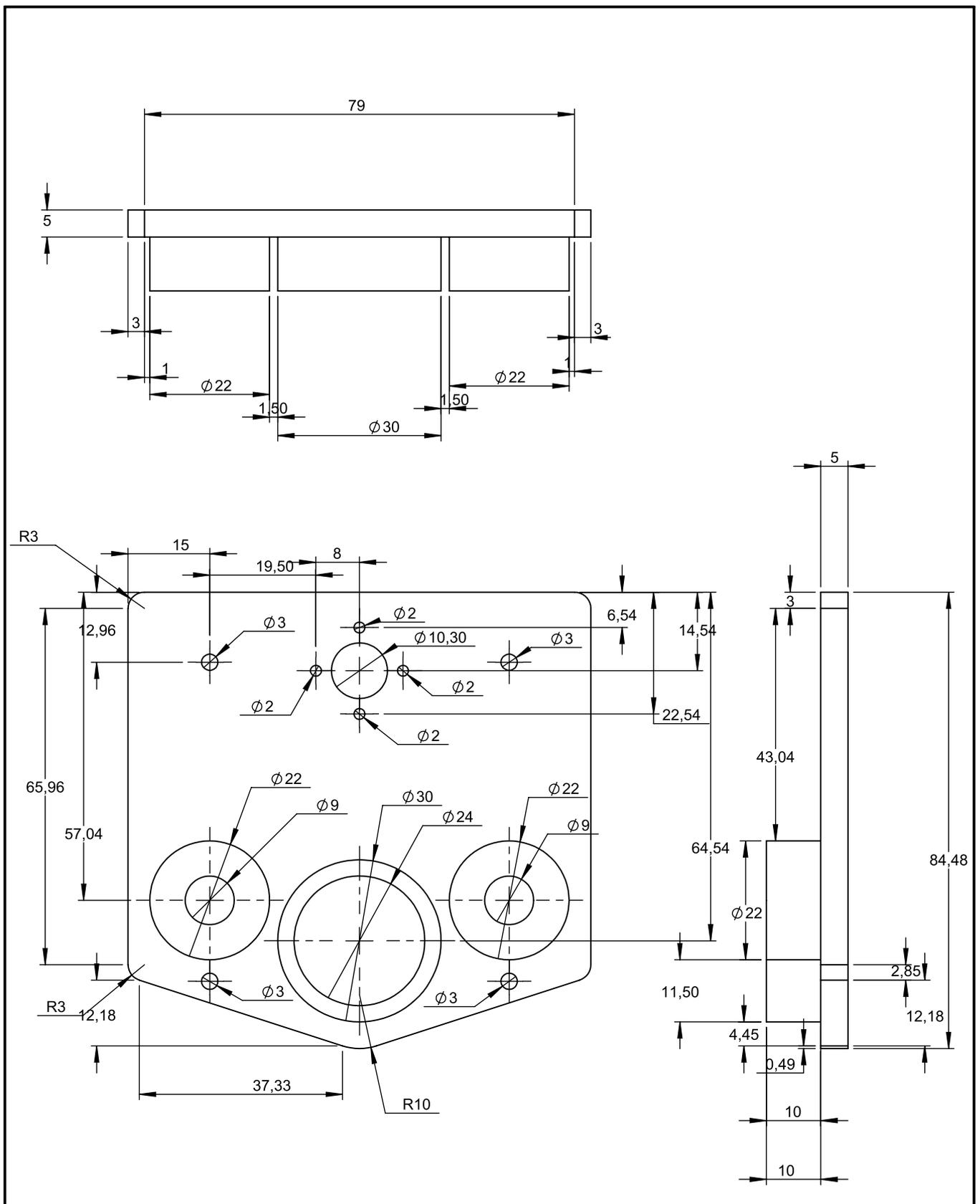


| | NOME DA PEÇA | QTD. |
|----|----------------------------|------|
| 1 | Acoplador Flexível Ø8-Ø5mm | 1 |
| 2 | Castanha Ø8mm | 1 |
| 3 | Eixo Fuso Ø8mm | 1 |
| 4 | Eixo Suporte Ø8mm | 2 |
| 5 | Êmbolo Seringa 20ml | 1 |
| 6 | Suporte para o extrusor | 1 |
| 7 | Seringa 20ml | 1 |
| 8 | Pistão Inferior | 1 |
| 9 | Pistão Superior | 1 |
| 10 | Rolamento Linear Ø8mm | 2 |
| 11 | Motor de passo Nema 17 | 1 |
| 12 | Parafuso M3 x 0.5 x 30mm | 2 |
| 13 | Parafuso M3 x 0.5 x 16mm | 8 |
| 14 | Parafuso M3 x 0.5 x 25mm | 2 |
| 15 | Parafuso M2 x 0.4 x 16mm | 6 |
| 16 | Porca M3 x 0.5mm | 6 |
| 17 | Porca M2 x 0.4mm | 8 |

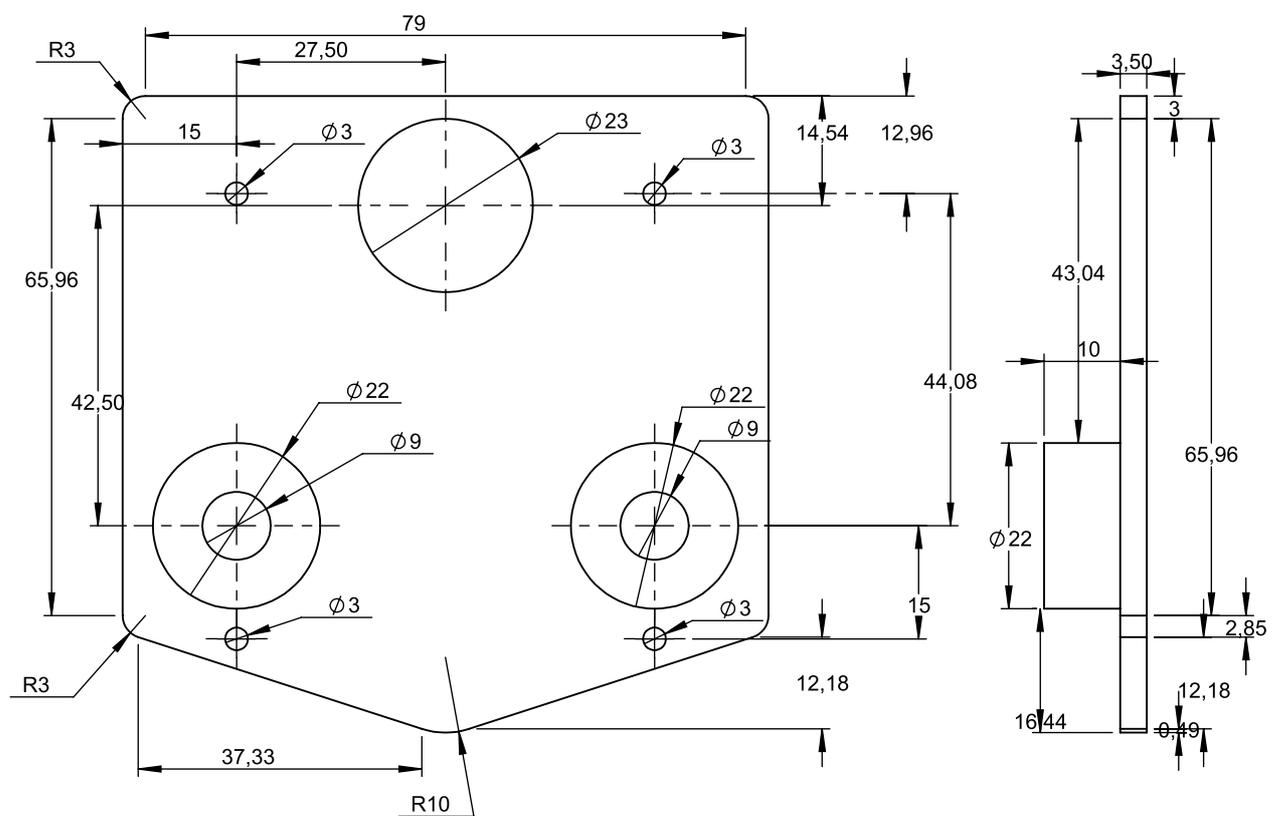
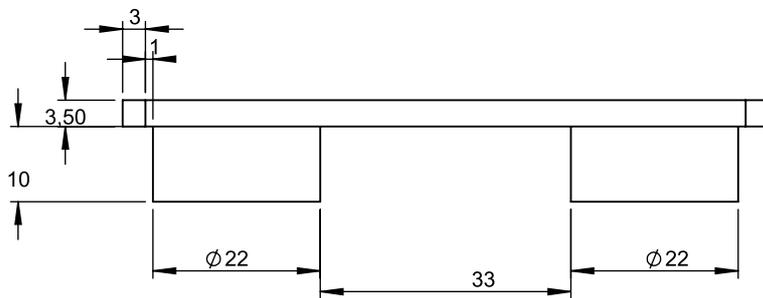
| | | | | |
|---------------------------------|--|---------------|---------------|-------------|
| | EMPRESA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA | | | |
| | NOME DO PROJETO CABEÇOTE PARA IMPRESSÃO A GEL | | | |
| | PROJETISTA NATHAN CARLOS DE OLIVEIRA RIBEIRO | | | |
| | ASSINATURA | | | |
| METODO DE PRODUÇÃO 1º DIEDRO | PEÇA VISTA EXPLODIDA | | ESCALA 1:2 | |
| LOCAL JUIZ DE FORA | DATA | UNIDADE mm | REVISÃO | Nº DA FOLHA |



| | | | | |
|---------------------------------|--|---------------|---------------|------------------|
| | EMPRESA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA | | | |
| | NOME DO PROJETO CABEÇOTE PARA IMPRESSÃO A GEL | | | |
| | PROJETISTA NATHAN CARLOS DE OLIVEIRA RIBEIRO | | | |
| | ASSINATURA | | | |
| METODO DE PRODUÇÃO 1º DIEDRO | PEÇA SUPORTE PARA O EXTRUSOR | | ESCALA 1:1 | |
| LOCAL JUIZ DE FORA | DATA 02/03/2021 | UNIDADE mm | REVISÃO 00 | Nº DA FOLHA 2 |



| | | | | |
|--|-----------------|---------|---------|--------------------------------------|
| <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA</p> | EMPRESA | | | UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA |
| | NOME DO PROJETO | | | CABEÇOTE PARA IMPRESSÃO A GEL |
| | PROJETISTA | | | NATHAN CARLOS DE OLIVEIRA RIBEIRO |
| | ASSINATURA | | | |
| METODO DE PRODUÇÃO | PEÇA | | ESCALA | |
| 1º DIEDRO | PISTÃO INFERIOR | | 1:1 | |
| LOCAL | DATA | UNIDADE | REVISAO | Nº DA FOLHA |
| JUIZ DE FORA | 02/03/2021 | mm | 00 | 3 |



| | | | |
|-----------------|--------------------------------------|--|--|
| EMPRESA | UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA | | |
| NOME DO PROJETO | CABEÇOTE PARA IMPRESSÃO A GEL | | |
| PROJETISTA | NATHAN CARLOS DE OLIVEIRA RIBEIRO | | |
| ASSINATURA | | | |

| | | | | | | | | | |
|--------------------|--------------|------|-----------------|---------|--------|---------|----|-------------|---|
| METODO DE PRODUÇÃO | 1º DIEDRO | PEÇA | PISTÃO SUPERIOR | | ESCALA | 1:1 | | | |
| LOCAL | JUIZ DE FORA | DATA | 02/03/2021 | UNIDADE | mm | REVISAO | 00 | Nº DA FOLHA | 4 |