

USP - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
EESC – Escola de Engenharia de São Carlos  
SEM – Departamento de Engenharia Mecânica

**Projeto customizado de uma plataforma experimental aplicado à fabricação  
aditiva por dupla rosca**

Aluno: Amir Ilkiu Sarout

Orientadora: Profa. Dra. Zilda de Castro Silveira

São Carlos, Janeiro de 2022.

USP - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
EESC – Escola de Engenharia de São Carlos  
SEM – Departamento de Engenharia Mecânica

**Projeto customizado de uma plataforma experimental aplicado à fabricação  
aditiva por dupla rosca**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade  
de São Paulo, como requisito para a obtenção do  
título de Bacharel em engenharia mecânica.

Aluno: Amir Ilkiu Sarout  
Orientadora: Profa. Zilda de Castro Silveira  
Coorientação: Joaquim Manoel Justino Netto

São Carlos, Janeiro de 2023.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

S516p Sarout, Amir ilkiu Projeto customizado de uma plataforma experimental  
aplicado à fabricação aditiva por dupla rosca / Amir  
ilkiu Sarout; orientadora Zilda de Castro Silveira;  
coorientador Joaquim Manoel Justino Netto. São Carlos,  
2023.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2023.

1. Manufatura aditiva. 2. Extrusão. 3. Deposição  
de partículas fundidas. 4. CoreXY. 5. Projeto aberto.  
I. Título.

## FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Amir Ilkiu Sarout

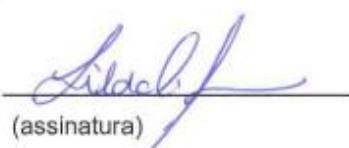
Título: Projeto customizado de uma plataforma experimental aplicado à fabricação aditiva por dupla rosca.

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de  
Engenharia de São Carlos, como  
parte dos requisitos para obtenção  
do título de B.Sc. Em Engenharia  
Mecânica pela Universidade de  
São Paulo.

### BANCA EXAMINADORA

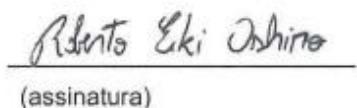
Profa. Dra. Zilda de Castro Silveira, SEM-EESC-USP

Nota atribuída: 9,0 (Nove)

  
(assinatura)

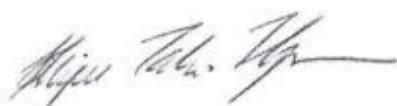
Prof. Dr. Roberto Eiki Oshiro, SEM-EESC-USP

Nota atribuída: 8,5 (Oito e meio)

  
(assinatura)

Prof. Dr. Henrique Takashi Idogava, Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF) Bahia

Nota atribuída: 8,2 (Oito e dois)

  
(assinatura)

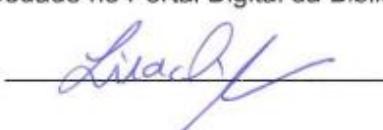
Média: 8,6 (Oito e seis)

Resultado: **Aprovado**

Data: 12/01/2023

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM  NÃO  Visto do orientador





Sarout, A. I. **Projeto customizado de uma plataforma experimental aplicado à fabricação aditiva por dupla rosca.** 62p. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

## RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento do projeto e construção do protótipo funcional de uma plataforma de movimentação em três coordenadas, para acoplar um cabeçote de extrusão dupla rosca, para aplicação em Manufatura Aditiva. O uso de matéria-prima em estado de pó possibilita a formulação e melhoria de novos materiais de engenharia com potenciais aplicações, como por exemplo, em Impressão 4D, engenharia tecidual, medicamentos personalizados e dispositivos biomecânicos. Devido à massa mais elevada do cabeçote e a necessidade da inserção de instrumentação para monitoramento de parâmetros de processo, uma nova plataforma com incorporação da movimentação completa foi concebida. Uma solução construtiva também foi concebida para manutenção do sistema barril-rosca. O projeto adotou conceitos de open manufacturing e open design de forma a contribuir para outros projetos de impressoras experimentais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Manufatura Aditiva; Extrusão; Deposição de partículas fundidas; CoreXY; Projeto aberto.

Sarout, A. I. **Customized design of an experimental platform applied to twin screw additive manufacturing.** 62p. Final paper – Department of Mechanical Engineering – São Carlos School of Engineering – University of São Paulo, São Carlos, 2023.

## ABSTRACT

This work proposes the design development and technical prototype of a three-coordinate movement platform, to support a twin-screw extrusion head, for application in additive manufacturing. The use of power feedstock enables the formulation and improvement of new engineering materials with potential applications, i.g. 4D printing, tissue engineering, personalized medicines and biomechanical devices. Due to the higher mass of the head and the need to insert instrumentation to monitor process parameters, a new platform incorporating complete movement was designed. A constructive solution was also thinking for maintaining the barrel-screw system. The design was based on open manufacturing and design concepts in order to contribute to other experimental printer design.

**KEY-WORDS:** Additive manufacturing; Extrusion; Fused particle deposition; CoreXY; open design.

## Abreviaturas e Siglas

FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FFF	<i>Fused Fabrication Filament</i>
MA	Manufatura Aditiva
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PLA	Poliácido Láctico

# **Lista de Figuras**

Figura 1 - Etapas do Processo de Manufatura Aditiva Fonte: Adaptado de (SIDAMBE, 2014) .....	19
Figura 2 - Princípios de técnicas aditivas: passo único e passos múltiplos para materialização do objeto. Fonte: Traduzido de (ISO/ASTM52921, 2019). .....	20
Figura 3 - Princípios de alimentação dos processos de MA por extrusão de material: (a) filamento contínuo; (b) varetas com perfil de cremalheira; (c) material em estado granulado; (d) injeção; (e) pressão com agulha controladora de vazão. Fonte: Adaptado de (Grupo: Projeto de Sistemas Mecânicos – SEM, 2019).....	21
Figura 4 – Esboços digitais dos cabeçotes de impressão baseados em rosca única, desenvolvidos por (a) Bellini (2002) e (b) Reddy et al. (2007). Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2021). .....	22
Figura 5 – Esquemático de um sistema CoreXY. Fonte: Adaptado de (Moyer, 2012). .....	24
Figura 6 – Exemplos de sistemas de movimentação. Fonte: Adaptado de (KAMPKER, 2019). .....	25
Figura 7 – Ender 3 Pro. Fonte: CREALITY Disponível em: <a href="https://www.creality.com/products/ender-3-pro-3d-printer">https://www.creality.com/products/ender-3-pro-3d-printer</a> . Acessado em 12 de jan. de 2022.....	26
Figura 8 - Aspecto físico de termistores com encapsulamento em vidro. Fonte: Adaptado de (Guadagnini P. et al., 2005).....	27
Figura 9 – Resistências utilizadas no aquecimento, instaladas no barril. Fonte: Próprio autor .....	28
Figura 10 – Motor de passo NEMA 17, 3.7 kg.cm de torque estático. Fonte: AUTOCORE ROBÓTIC Disponível em: <a href="https://www.impactocnc.com/Driver-Motor-de-Passo-4A-TB6600">https://www.impactocnc.com/Driver-Motor-de-Passo-4A-TB6600</a> . Acessado em 12/01/2022 .....	28
Figura 11 – Motor de passo NEMA 23, 19 kg.cm de torque estático. Fonte: KALATEC AUTOMAÇÃO Disponível em: <a href="https://www.kalatec.com.br/motor-de-passo-nema-23/">https://www.kalatec.com.br/motor-de-passo-nema-23/</a> . Acessado em 12/01/2022.....	29
Figura 12 – Arduino Mega. Fonte: Disponível em: <a href="https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us">https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us</a> . Acessado em 29/12/2022 .....	29
Figura 13 – Ramps 1.4. Fonte: Disponível em: <a href="https://reprap.org/wiki/File:RAMPS1-3_fin.JPG">https://reprap.org/wiki/File:RAMPS1-3_fin.JPG</a> . Acessado em 29/12/2022 .....	30
Figura 14 - Driver DRV8825. Fonte: Disponível em: <a href="https://www.pololu.com/product/2982#lightbox-picture0J5806;main-pictures">https://www.pololu.com/product/2982#lightbox-picture0J5806;main-pictures</a> . Acessado em 29/12/2022 .....	30
Figura 15 - Driver TB6600. Fonte: Disponível em: <a href="https://www.impactocnc.com/Driver-Motor-de-Passo-4A-TB6600">https://www.impactocnc.com/Driver-Motor-de-Passo-4A-TB6600</a> . Acessado em 29/12/2022 .....	30
Figura 16 – Fluxograma do desenvolvimento do projeto. Fonte: Adaptado de (Próprio autor) .....	32
Figura 17- Soluções propostas em função do número de eixos necessários e o tipo de transmissão. Fonte: Adaptado de (Justino Netto e autor, 2020).....	33
Figura 18- Solução proposta com três eixos e com polias. Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2020) .....	34
Figura 19 - Mecanismo de transmissão para dupla rosca corrotativa, com trem de engrenagens simples no primeiro estágio e transmissão por correia no segundo estágio. Fonte: Próprio autor.....	35
Figura 20 - Estojo aberto e componentes da transmissão em vista explodida. Fonte: Próprio autor.....	36

Figura 21- Estrutura da plataforma com o cabeçote na posição (a) de trabalho (vertical) e (b) de manutenção (horizontal). Fonte: Próprio autor .....	37
Figura 22- Mecanismo de movimentação da mesa em 3 eixos. Fonte: Adaptado de (Moyer, 2012).....	38
Figura 23 - Projeto final da plataforma formada pela estrutura em pórtico e sistema de movimentação da mesa em três eixos. Fonte: Próprio autor .....	39
Figura 24- (a) Circuito eletrônico de extrusão; (b) Circuito eletrônico de movimentação. Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2022).....	40
Figura 25- Peças fabricadas por Manufatura Aditiva. Fonte: Próprio autor .....	42
Figura 26- Montagem da estrutura e peças da máquina. Fonte: Próprio autor.....	43
Figura 27- Equipamento montado em funcionamento durante um dos testes de extrusão. Fonte: Próprio autor .....	44
Figura 28 – Teste de deposição para avaliar a velocidade de impressão. Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2022).....	50
Figura 29 – Largura e altura do cordão impresso em função da velocidade de movimentação da mesa. Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2022) .....	51
Figura 30 – Peças impressas em PP: (a) 90°/45° corpo de prova de tração, (b) 90°/90° corpo de prova de tração, c) scaffold, d) Caixa em modo vaso. Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2022) .....	52
Figura 31 – Corpos de prova impressos: a) 90PP/10PS blenda e b) somente PP. Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2022) .....	53

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 - Custo da matéria-prima da plataforma .....	45
---	----

# Sumário

<b>1.</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>14</b>
1.1.	Questão de pesquisa.....	16
1.2.	Objetivo .....	18
<b>2.</b>	<b>Embasamento teórico.....</b>	<b>19</b>
2.1.	Considerações sobre Manufatura Aditiva.....	19
2.2.	Processo aditivo FFF .....	21
2.3.	Sistemas de movimentação cartesiana em termos de GDL: vantagens e limitações .....	24
<b>3.</b>	<b>Materiais e Métodos.....</b>	<b>26</b>
3.1.	Materiais .....	27
3.1.1.	Termistor .....	27
3.1.2.	Resistência elétrica .....	27
3.1.3.	Motor de passo.....	28
3.1.4.	Arduino Mega.....	29
3.1.5.	Ramps 1.4 .....	29
3.1.6.	Driver DRV8825 e TB6600.....	30
3.2.	Métodos.....	31
<b>4.</b>	<b>Desenvolvimento do projeto do equipamento de suporte para dupla rosca: projeto mecânico, instrumentação, eletrônica.....</b>	<b>32</b>
4.1.	Desenvolvimento da solução conceitual.....	33
4.1.1.	Sistema de transmissão.....	33
4.1.2.	Estrutura da plataforma .....	36

4.1.3.	Sistema de movimentação do substrato de deposição .....	37
4.2.	Eletrônica.....	39
4.3.	Programação eletromecânica .....	40
5.	Montagem do protótipo .....	41
6.	Estimativa de Custo da matéria-prima da plataforma .....	45
7.	Teste de avaliação funcional: resultados .....	50
8.	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	54
	Referências .....	55
	Apêndice A – Código do sistema de extrusão (Arduino Uno).....	58
	Apêndice B – Dimensões básicas das peças impressas.....	64

# 1. Introdução

A Manufatura Aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D, abrange um conjunto de técnicas para fabricação de objetos diretamente a partir de arquivos digitais por meio da união de elementos volumétricos de material, geralmente camada por camada (Gibson et al., 2014, Thompson et al., 2016). Dentre as técnicas atualmente disponíveis, a MA por extrusão caracteriza-se pela liberação seletiva de materiais semissólidos sob a forma de cordões contínuos (ASTM, 2017), os quais devem solidificar prontamente e aderir ao substrato ou ao material previamente depositado de modo a formar uma estrutura consolidada (Costa et al., 2014).

Os equipamentos de MA por extrusão que utilizam matéria-prima em forma de filamento, conhecidos pela marca FDM (*Fused Deposition Modeling*) registrada pela empresa multinacional norte americana Stratasys ou pelo termo genérico FFF (Fused Filament Fabrication), são os mais utilizados em razão das soluções construtivas simples e baratas, além de fácil operação, favorecendo extensiva adoção na fabricação de modelos visuais e, mais recentemente, produtos finais para diversas áreas de aplicação (Gonzalez-Gutierrez et al., 2018, Zhang et al., 2020). Entretanto, apesar da ampla utilização, as impressoras 3D baseadas na técnica FFF apresentam limitações tais como a reduzida variedade de materiais disponíveis, a baixa velocidade de deposição e os custos associados à fabricação das matérias-primas filamentares, o que encarece os produtos resultantes quando comparados à itens semelhantes obtidos por processos de injeção ou extrusão convencionais (Justino Netto et al., 2021).

Sistemas alternativos de MA por extrusão baseados em pistão e rosca vêm sendo desenvolvidos (González-Gutierrez et al., 2018), o que tem permitido a impressão 3D de componentes com propriedades projetadas, estruturas inteligentes e objetos em grande escala, a custos e velocidade de produção mais viáveis, a partir de uma maior variedade de materiais (Volpato et al., 2015; Liu et al., 2017; Woern et al., 2018; Schimidt et al., 2018; Reich et al., 2019). A utilização de mecanismos de extrusão por rosca no processamento de materiais particulados, é promissora por associar a capacidade de alimentação contínua à maior capacidade de controle do processo e também à potencial capacidade de processar materiais múltiplos, sem necessidade de mistura prévia das matérias-primas (Justino Netto et al., 2021).

Diferentes sistemas de MA por extrusão com cabeçote de deposição baseado em rosca foram desenvolvidos e utilizados com sucesso para processar compósitos (Duty et al., 2017, Singamneni et al., 2018), biocompósitos (Dávila et al., 2015, Cunha et al., 2019) e blendas poliméricas (Harris et al., 2019). Embora os materiais citados exijam a mistura entre dois ou mais componentes, os sistemas desenvolvidos até o presente momento utilizaram exclusivamente rosca simples, cuja capacidade de mistura é limitada. De modo geral, a mistura obtida em extrusoras de rosca simples advém do rearranjo de partículas sólidas ou de segunda fase polimérica em fluxo de cisalhamento, que geralmente não gera tensões suficientes pelo período necessário para

fragmentar aglomerados ou diminuir significativamente o tamanho dos domínios de fase dispersa (Domingues et al., 2004).

A plataforma foi projetada para permitir a utilização de um cabeçote de extrusão com dupla rosca corrotativa, e inclui a estrutura principal e um sistema de movimentação em três eixos para o substrato de deposição. O cabeçote, desenvolvido por Justino Netto, Silveira (2018), apresenta dimensões reduzidas e construção modular, constituindo um miniextrusor adequado para alimentação de polímeros em grânulos, com alta capacidade de mistura e elevado controle sobre o processo. A partir da movimentação do substrato de deposição, o equipamento será capaz de estruturar pequenos objetos tridimensionais, com potencial aplicação em engenharia tecidual e na produção de medicamentos personalizados (Justino Netto et al., 2020). Além de adequar o equipamento para utilização sobre bancada, a plataforma deve facilitar a manutenção do cabeçote e permitir alterações futuras conforme a necessidade das pesquisas a serem desenvolvidas.

## **1.1. Questão de pesquisa**

O processo de extrusão consiste na conversão de matéria-prima em um produto com densidade e forma uniformes, realizado por meio da passagem forçada do material por uma matriz sob condições controladas (HALIM; FARRELL; KENNEDY, 2012; RAUWENDAAL, 2014). Diversos mecanismos podem ser utilizados para gerar a pressão necessária para a extrusão, os quais podem ser divididos em bombas de deslocamento positivo e bombas de arraste. Nas bombas de deslocamento positivo, o fluido confinado em câmaras é carregado pela movimentação de um componente sólido da máquina, como é o caso das extrusoras por pistão e das bombas rotativas. Nas bombas de arraste, o fluido é confinado entre duas superfícies das quais uma se move, arrastando o material como no caso das extrusoras por rosca.

As extrusoras por rosca são consideradas as máquinas mais importantes no processamento de polímeros, sendo usadas para bombear, misturar, realizar reações químicas e devolatilizar sistemas poliméricos (WHITE; POTENTE, 2012). Poucos são os equipamentos comerciais de Manufatura Aditiva com soluções construtivas baseadas no uso de roscas para processamento de termoplásticos. Parte dessa limitação pode ser atribuída à necessidade de entender os fenômenos associados ao processo como, por exemplo, o fluxo de material, mecanismos de plastificação e tempo de residência. Além deste, ainda há a dificuldade de projeto e fabricação de roscas nas dimensões adequadas ao volume de trabalho das impressoras 3D (VALKENAERS et al., 2013; VOLPATO et al., 2015; GIBSON, 2015; MANRICH, 2005; RAUWENDAAL, 2014).

Um dos primeiros cabeçotes de impressão 3D baseados em extrusão por rosca foi desenvolvido por Bellini, Shor e Guceri (2005), utilizando rosca de diâmetro e passo constante para o transporte de grânulos de cerâmica misturados com ligantes poliméricos até uma câmara de fusão. Também utilizava rosca transportadora o cabeçote de microextrusão desenvolvido por Ragaert et al. (2013), entretanto, neste equipamento os grânulos de polímeros biodegradáveis eram previamente fundidos e bombeados até a rosca, que por sua vez direcionava o fluido até uma agulha de deposição. A aplicação de conceitos de projeto de rosca para extrusão de termoplásticos no desenvolvimento de um cabeçote de impressão 3D foi originalmente relatada por Cheng et al. (2011), cujo objetivo era melhorar o controle do processo e a qualidade das peças produzidas com MA por extrusão. O projeto considerava uma vazão de  $0,5 \text{ cm}^3/\text{s}$  resultante da rotação de uma rosca de 12 mm de diâmetro e cerca de 86 mm de comprimento a uma velocidade de 400 rpm. Apesar de detalhar os cálculos de profundidade de canal, taxa de compressão e comprimento das zonas de processo, os autores não demonstraram a viabilidade do conceito por meio da construção de nenhum tipo de protótipo e a pesquisa parece ter sido interrompida.

Por meio de uma abordagem sistemática, Silveira et al. (2014) projetaram um cabeçote de impressão 3D miniaturizado e customizado baseado no processo de extrusão rosca simples com o objetivo flexibilizar uma plataforma experimental de MA e permitir maior controle de processo.

Nesse contexto, a proposta de um cabeçote de impressão 3D baseado em extrusão dupla rosca corrotativa apresenta-se como uma inovação com potencial disruptiva para o campo da MA por extrusão, uma vez que incorpora as capacidades de uma tecnologia bastante consolidada no processamento de polímeros, especialmente no que diz respeito à composição de concentrados, compósitos e blendas poliméricas (polymer compounding). O projeto, apresentado em Justino Netto, Silveira (2018) consiste em uma extrusora vertical com roscas corrotativas e interpenetrantes, de dimensões reduzidas e construção modular, que deverá constituir uma plataforma experimental para o processamento de materiais e estruturação de pequenos objetos tridimensionais (Justino Netto et al., 2020).

Tendo em vista a natureza altamente customizada do equipamento em desenvolvimento, faz-se necessário conceber soluções construtivas específicas para atender diferentes requisitos de projeto, principalmente no que diz respeito à necessidade de transmitir potência a dois eixos proximamente posicionados, mantendo a mesma velocidade e direção de rotação (corrotação), bem como à necessidade de permitir a movimentação lateral e vertical do substrato de deposição em uma estrutura de bancada adequada ao cabeçote.

Restrições de projeto que requerem um novo projeto de base:

- Massa elevada do subsistema de extrusão (aproximadamente 5 kg);
- Instrumentação do cabeçote (inclui resistências elétricas e sensores de temperatura);
- Alimentação do pó por um sistema independente (com configuração da taxa de alimentação de forma independente);
- Empacotamento e sustentação do cabeçote (rosca com 130 mm de comprimento);
- Proximidade entre os eixos das roscas (10,5 mm entre centros);

## **1.2. Objetivo**

O objetivo principal deste trabalho é apresentar o desenvolvimento do projeto de uma plataforma, bem como a construção e validação do protótipo funcional de uma impressora 3D baseada em extrusão dupla rosca.

Os objetivos específicos incluem:

- Desenvolvimento dos desenhos técnicos mecânicos para fabricação por técnicas convencionais e aditivas dos subsistemas cabeçote e plataforma de movimentação;
- Fabricação, montagem e instrumentação básica;
- Calibração do equipamento, com programas abertos de fatiamento e interface;
- Validação experimental com geração de filamentos e mesoestruturas.

## 2. Embasamento teórico

### 2.1. Considerações sobre Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva, também conhecida por prototipagem rápida, é definida como a técnica de fabricação fundamentada na adição de material, que ocorre de forma controlada, possibilitando a fabricação de peças com alta complexidade geométrica (GIBSON, 2015). Definida por cinco etapas básicas (VOLPATO, 2017), conforme mostrado na Figura 1, o processo de fabricação por Manufatura Aditiva se dá inicialmente pela geração de um modelo tridimensional digital da peça desejada através de programas ou plataformas CAD.

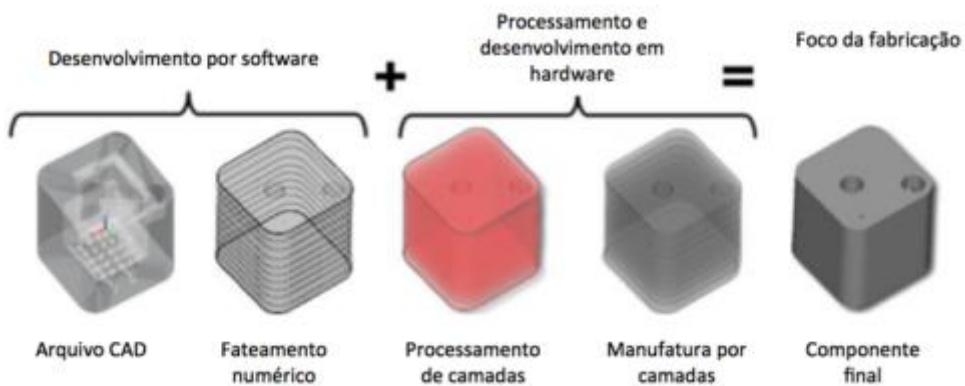


Figura 1 - Etapas do Processo de Manufatura Aditiva Fonte: Adaptado de (SIDAMBE, 2014)

Posteriormente, esse modelo tridimensional é discretizado em camadas de acordo com especificações fornecidas pelo usuário, ou de acordo com as dimensões mínimas requeridas pelo maquinário. Após a discretização, ainda via softwares o modelo geométrico da peça é traduzido para o formato de código, que dita a sequência de movimentos que devem ser executados de forma que tenha se como resultado final a peça almejada. Uma vez gerado o código com instruções para a máquina, também conhecido como G-Code, a máquina deve executar a deposição de material, camada a camada, até a conclusão do processo de fabricação. Fatores como a qualidade do equipamento (precisão da plataforma de construção, geometria do bico, entre outras) e os parâmetros do processo, como temperatura do bico, velocidade de translação e espessura da camada também têm influência direta nas propriedades finais do objeto. A geometria final do objeto é determinada pela trajetória das técnicas escolhidas (projeções ou deposição) ou ainda, uma combinação de ambas (THOMPSON et al., 2016).

A customização em massa conduz a produtos, serviços e dados inteligentes, adaptados para usuários e dependentes de tarefas específicas, localidades, situações e contextos, permitindo características de flexibilidade, adaptabilidade, agilidade, interfaces com a manufatura, serviços e processos criativos. Esse cenário, no qual os conceitos de *open design* e *open manufacturing* tornam-se cada vez mais presentes e o uso de equipamentos de fabricação desktop necessários, tanto para usuários domésticos, incluindo também

comunidades *open source*, como para empresas, em suas diversas atuais configurações, adotando projeto com formato de ecossistemas, utilizando *technoshops* ou mesmo tendo em sua planta industrial *makerspaces*, para discussões técnicas compartilhadas.

A Manufatura Aditiva como tecnologia surgiu na década de 1980 com o processo de estereolitografia conforme documentada na patente norte americana "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography" (HULL, 1986). A Figura 2 apresenta as categorias e os números de passos técnicos.

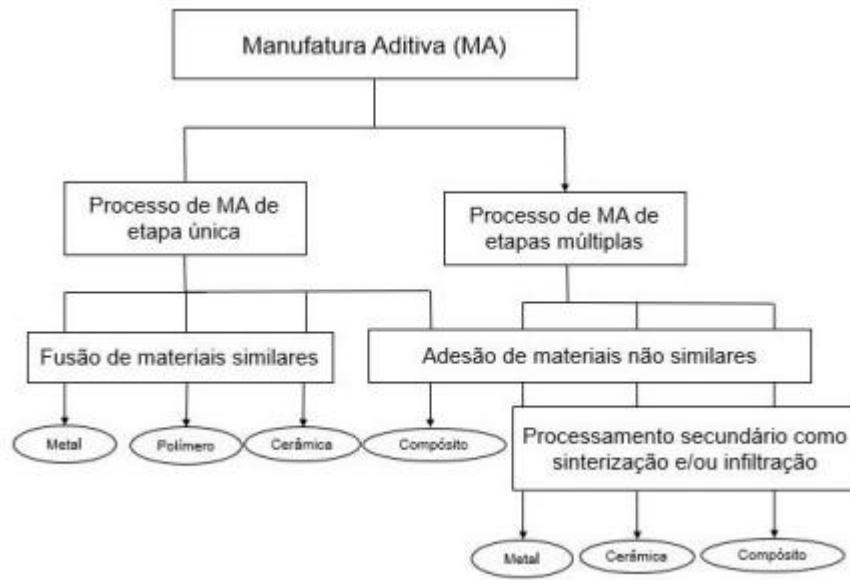


Figura 2 - Princípios de técnicas aditivas: passo único e passos múltiplos para materialização do objeto. Fonte: Traduzido de (ISO/ASTM52921, 2019).

## 2.2. Processo aditivo FFF

A técnica aditiva por extrusão ou FFF (Fused Filament Deposition), definida pela ISO-ASTM 52900;11961:2015 (E) é amplamente utilizada, a partir de matéria-prima termoplástica sob a forma sólida filamentar (THOMPSON et al., 2016; BALANI et al., 2019). Comercializada como Fused Deposition Modeling (FDM) ainda é o processo mais utilizado pela maioria das impressoras 3D do tipo low-end que são comercializadas em diversos países atualmente.

A Figura 3 apresenta os princípios físicos que podem ser utilizados para esse tipo de processo. Na Figura 3 (a), a matéria-prima é geralmente fornecida no estado sólido, sob a forma de filamentos, que são alimentados a uma câmara de liquefação com auxílio de um rolo de tracionamento. Na entrada da câmara, a porção sólida do filamento age como um pistão forçando a massa fundida através de um bocal responsável por depositar o material sobre o substrato (TURNER, STRONG e GOLD, 2014; ROCHA, TORRADO PEREZ e ROBERSON, 2014; ISO 17296-2:2015)

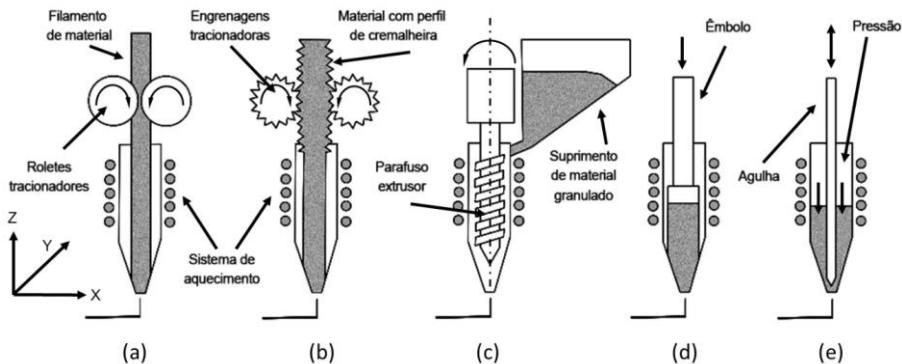


Figura 3 - Princípios de alimentação dos processos de MA por extrusão de material: (a) filamento contínuo; (b) varetas com perfil de cremalheira; (c) material em estado granulado; (d) injeção; (e) pressão com agulha controladora de vazão. Fonte: Adaptado de (Grupo: Projeto de Sistemas Mecânicos – SEM, 2019)

Nesse contexto, diferentes cabeçotes de impressão 3D baseados no processo de extrusão vêm sendo implementados, possibilitando o uso de polímeros previamente fundidos, granulados (pellets) ou em pó, combinados com materiais múltiplos (partículas metálicas, cerâmicas ou mesmo outros polímeros), para mistura e deposição direta do material resultante, evitando assim etapas precedentes associadas à fabricação de filamentos (BELLINI, SHOR e GUCERI, 2005; VOLPATO et al., 2015; CHENG et al., 2011; GONZALES-GUTIERREZ et al., 2018; LIU et al., 2018 TSENG et al., 2018; ZHOU et al., 2018). Amplamente utilizado na indústria de plásticos, o processo de extrusão consiste na conversão de matéria-prima em um produto com densidade e forma uniformes, realizada por meio da passagem forçada do material por uma matriz sob condições controladas (MANRICH, 2005; RAUWENDAAL, 2013). Além da conformação final do material em perfis contínuos, a extrusão por rosca é utilizada na mistura dos diferentes

compostos ou aditivos que constituem um produto plástico, como por exemplo, cargas de preenchimento, retardantes de chama, corantes e plastificantes (MANRICH, 2005; RAUWENDAAL, 2013).

Assim, a rosca pode ser considerada um dos elementos mecânicos de maior importância em uma extrusora, uma vez que sua movimentação e, consequente capacidade de gerar tensões de cisalhamento atuantes no polímero, gera parte da energia termomecânica necessária para promover sua plastificação. E ainda, por meio do movimento circular nos canais formados entre a rosca e o barril, gerado por fluxos de arraste e contrapressão, que as partículas sólidas das cargas e aditivos ou gotículas de material fundido, no caso de blendas, são distribuídas e dispersadas (MANRICH, 2005; KOHLGRÜBER, 2008; RAUWENDAAL, 2013).

Bellini (2002) apresenta uma das primeiras propostas na literatura apresentadas com extrusão por rosca: um parafuso ou fuso de extrusão (em língua inglesa denominada auger screw), com passo e profundidade constante, caracterizando a função inicial de transporte de material, ilustrado na Figura 4. A rosca de passo constante está inserida em um tubo aquecido, com uma matriz de extrusão na extremidade inferior, que pode ter vários diâmetros. O cabeçote de extrusão realiza a movimentação nos três eixos cartesianos e a superfície de deposição se mantém fixa.

O desempenho do sistema proposto foi avaliado preliminarmente, em relação à temperatura de processamento, geometria do bico e velocidade de deposição utilizando materiais cerâmicos com diferentes granulometrias. Em termos de avaliação da microscopia da estrutura, os autores relatam a identificação de algum grau de aglomeração, bem como aprisionamento de ar. O equipamento proposto por Bellini (2002) foi utilizado para gerar *scaffolds* com biopolímeros (Wang et al., 2004).

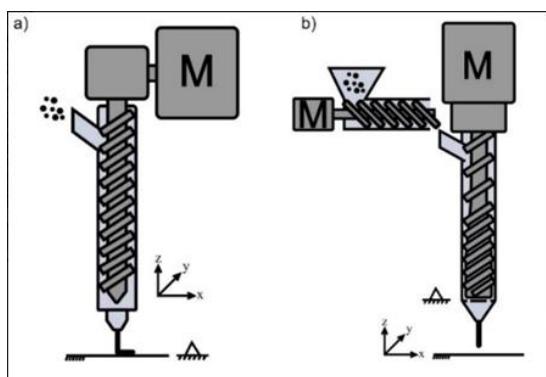


Figura 4 – Esboços digitais dos cabeçotes de impressão baseados em rosca única, desenvolvidos por (a) Bellini (2002) e (b) Reddy et al. (2007). Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2021).

Para superar os problemas de alimentação descritos por Bellini et al. (2002), o cabeçote de extrusão desenvolvido por Reddy et al. (2007) adicionou uma unidade de alimentação desacoplada para alimentação do material granulado e modificou a rosca de extrusão com profundidade de canal e passo variáveis (atribuindo um perfil de compressão). Um barril foi adicionado para evitar a deflexão lateral da rosca de extrusão devido à pressão radial variável.

O cabeçote de extrusão foi mantido fixo devido ao aumento do peso total, enquanto a superfície de deposição adquiriu a movimentação cartesiana nas três direções. Os espécimes de teste foram fabricados diretamente com polímeros granulados. Lam et al. (2008) propôs um cabeçote *in-house* para bioimpressão. A deposição é feita, a partir de uma pré-mistura de materiais, para gerar um biocompósito aparentemente em estado granular. Porém, não é apresentado uma figura esquemática ou foto do equipamento utilizado, principalmente o tipo de mecanismo de extrusão.

Considerando de forma temporal, a partir dos primeiros trabalhos publicados por Bellini (2002) e Reddy et al. (2007) novas propostas de cabeçotes de extrusão com aplicação em Manufatura Aditiva tem sido desenvolvida, sempre no aprimoramento do conceito: Silveira et al. (2014), Jackson et al. (2018); Singamneni et al. (2018), Tseng et al. (2018), Zhou et al. (2018), Leng et al. (2019), Alexandre et al. (2020) e Wang et al. (2020). Os biocompósitos também foram explorados por Singamneni et al. (2018) utilizando seus equipamentos, mas neste caso, os materiais foram previamente misturados e cortados em pellets. Nesse trabalho, os diâmetros dos bicos calibrados de deposição foram aumentados para que não houvesse obstrução durante o processo de deposição.

Com exceção do trabalho publicado por Jackson et al. (2018), todos os equipamentos propuseram diferentes configurações para sistemas de extrusão baseados em roscas com perfil de compressão.

Silveira et al. (2014), Jackson et al. (2018) e Alexandre et al. (2020) integraram os cabeçotes de extrusão a sistemas de movimentação cartesiana gerando impressoras 3D desktop, com conceito de *open manufacturing*. Tseng et al. (2018), Singamneni et al. (2018) e Wang et al. (2020) propuseram sistemas de movimentação mais customizados para posicionamento.

## 2.3. Sistemas de movimentação cartesiana em termos de GDL: vantagens e limitações

Os sistemas de movimento cartesiano possuem dois tipos principais sistemas de movimento: com fuso e com correia. Os sistemas com fuso consistem em dois atuadores lineares ortogonais, um montado no topo do outro, e são conhecidos por sua alta precisão e capacidade de lidar com cargas pesadas. No entanto, eles também têm uma massa móvel significativa e tendem a ser mais lentos. Em contraste, os sistemas com correia são mais eficientes em termos de energia, podem operar em velocidades mais altas e são relativamente baratos de fabricar devido ao seu design simples. Os sistemas com correia são frequentemente usados em impressão 3D em conjunto com um atuador linear vertical para fornecer movimento nos três eixos para o cabeçote.

Dentre os sistemas com correias, um que se destaca é o sistema core XY, pois além de fácil projeto e manufatura ele permite que a mesa tenha maior espaço útil de movimentação se comparado com outros métodos. Portanto, no mesmo volume de estrutura da máquina é possível se imprimir um volume maior.

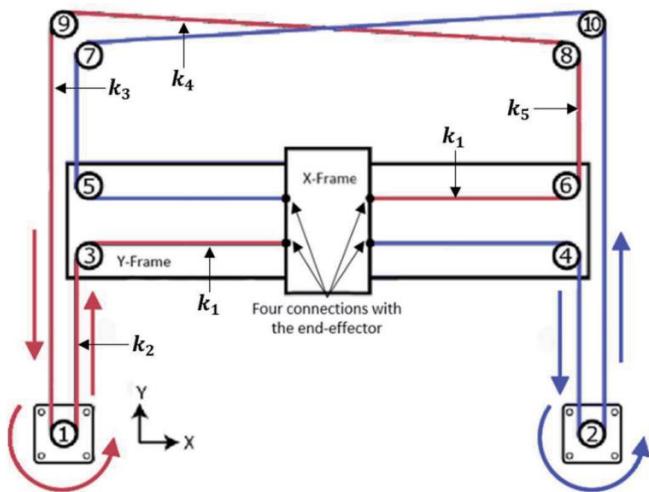


Figura 5 – Esquemático de um sistema CoreXY. Fonte: Adaptado de (Moyer, 2012).

Outros sistemas de movimentação são mostrados na Figura 6, sendo que o sistema cartesiano é o mais comum em impressoras FFF comerciais. É importante notar que pode haver variações desses sistemas, como: Concentrar toda a movimentação no cabeçote ou na mesa ou dividir os eixos de movimentação entre o cabeçote e a mesa, simplificando o projeto mecânico. Cada sistema de movimentação diferente terá características próprias de operação, incluindo o processamento necessário para movimentar o bico até a posição desejada, quantidade de motores utilizados para desenvolver o deslocamento, aceleração necessária desses motores e facilidade de manutenção de cada sistema.

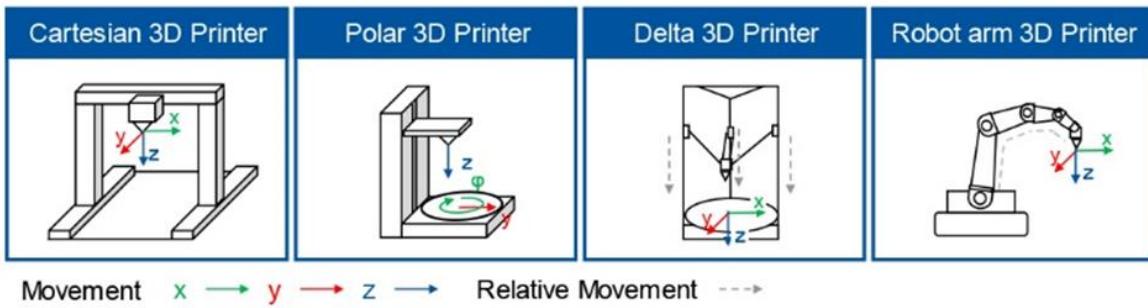


Figura 6 – Exemplos de sistemas de movimentação. Fonte: Adaptado de (KAMPKER, 2019).

Nos sistemas da Figura 6, temos o Cartesiano, que possui três graus de liberdade lineares de movimentação no cabeçote ou na mesa, o que permite o uso de um motor acoplado a um fuso por eixo e assim garantindo mais rigidez e precisão, ou utilizar um sistema de movimentação por correias e obter uma máquina mais veloz. Esse sistema é de fácil controle e é aplicado tanto para impressão de peças prismáticas como cilíndricas. O sistema Polar possui um grau de liberdade linear no cabeçote e um rotacional e um linear na mesa de impressão. A divisão de eixos de movimentação entre o cabeçote e a mesa permite um sistema mecânico de transmissão mais simples, pois facilita o empacotamento. Devido a característica de um dos eixos ser rotacional, esse sistema mais facilmente produz peças cilíndricas porém apresenta algumas dificuldades para impressão de peças prismáticas e no fatiamento das peças, pois requer um programa fatiador capaz de gerar caminhos favoráveis a esse tipo de movimentação.

Assim como o sistema Cartesiano, o sistema Delta apresenta três graus de liberdade lineares no cabeçote ou na mesa, porém ele obtém isso através do movimento conjunto de três movimentos lineares verticais, o que implica que o controle para o correto posicionamento do bico é mais complexo e requer mais processamento e precisão. Outra característica desse sistema é que apesar de possuir três graus de liberdade lineares de movimentação, seu volume útil de impressão é um cilindro, e isso reduz as dimensões máximas de uma peça prismática que pode ser fabricada por esse sistema.

A impressão por braço robótico pode variar desde três graus de liberdade lineares no cabeçote, até cinco graus de liberdade (sendo três lineares e dois rotacionais). Esse sistema é o qual permite a maior flexibilidade para impressão das peças, permitindo impressão em diferentes planos, porém seu controle é de altíssima complexidade e requer uma alta precisão nos cálculos e na manufatura, garantindo que há folga nos mecanismos de movimentação.

### 3. Materiais e Métodos

Para a estrutura mecânica, foi utilizado perfil estrutural de alumínio 30x30 mm, pois ele garante fácil montagem e desmontagem, além de alta rigidez. Para conectar os perfis, foram utilizadas cantoneiras 90° com parafusos M5 e porcas T. Para conectar os motores e os rolamentos a estrutura foi utilizada peças impressas em 3D, pois possuem baixo custo e tempo de manufatura. E para absorver vibrações foi utilizado um Vibra-Stop na base da máquina.

A matéria prima utilizada para as peças impressas foi o Poliácido Láctico ou (PLA), que é um polímero termoplástico e possui um alto módulo elástico, temperatura de transição vítreia relativamente baixa, entre 55-65°C e é amplamente utilizado em impressão 3D. Devido a essas características e à sua atoxidade, o PLA é de interesse para aplicações médicas (SENATOV et al., 2016). As peças foram impressas variando-se a porcentagem de preenchimento de 30 a 60%, em função da resistência mecânica requerida para cada peça de montagem.

Foi utilizada uma impressora comercial de FFF: Ender 3 Pro e as peças foram fatiadas no software Creality. O equipamento possui câmara aberta e possui base aquecida com área útil de impressão é de 320x210x400mm, com precisão de camada de 0,05 a 0,4mm.

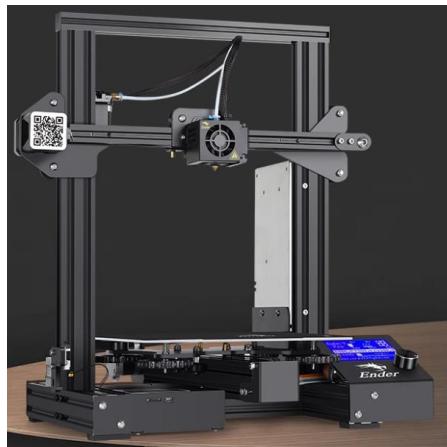


Figura 7 – Ender 3 Pro. Fonte: CREALITY Disponível em: <https://www.creality.com/products/ender-3-pro-3d-printer>.  
Acessado em 12 de jan. de 2022

O software de modelamento geométrico utilizado foi o Solid Edge 2020 student e o fatiamento digital pelo programa Simplify 3D.

Na eletrônica, foi utilizado um Arduino Uno para o controle das rosca e do alimentador. Um Arduino Mega com Ramps 1.4 foi utilizado para o controle dos motores da movimentação da mesa e do aquecimento da mesa e cabeçote. Um Nema 23 foi usado para atuar as rosca, devido a seu maior torque e o alimentador foi atuado com um Nema 17, assim como os eixos de movimentação da mesa também foram atuados por Nema

17. Os drivers para controlar os Nema 17 foram o DRV8825 e para o Nema 23 foi utilizado o T6600. A alimentação do Nema 23 e do Nema 17 do alimentador foi feita com uma fonte 24V e a alimentação dos outros componentes foi feita com uma fonte 12V.

Na programação foi utilizado o código aberto Marlin para a configuração do Arduino Mega, um código próprio desenvolvido para o controle independente do motor da rosca e do alimentador e o aplicativo Repetier para o controle da máquina.

Para os testes do cabeçote será utilizado PP à alimentação de 20g/h, rotação de 80 RPM nas roscas, bocal de 0,6 mm, com o bocal a 1,0 mm da mesa, mesa aquecida a 80°C e o barril aquecido em 180°C e 210°C na primeira e segunda região de aquecimento respectivamente.

### 3.1. Materiais

#### 3.1.1. Termistor

Termistor é o sensor responsável pela leitura da temperatura. Os termistores do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*) diminuem sua resistência com o aumento de temperatura e possuem uma faixa de temperatura de trabalho de -50 °C e +300 °C. Esses sensores são pequenos, o que facilita sua instalação e diminui seu tempo de resposta. (Paulo H. Guadagnini et al., 2005)

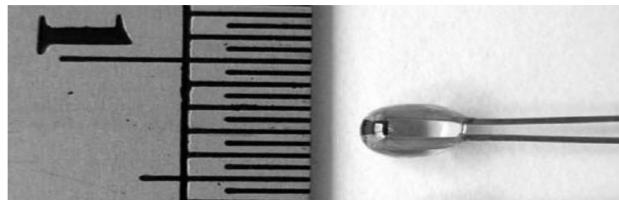


Figura 8 - Aspecto físico de termistores com encapsulamento em vidro. Fonte: Adaptado de (Guadagnini P. et al., 2005).

#### 3.1.2. Resistência elétrica

Utilizadas para o aquecimento do barril e da mesa de deposição, permitindo o aquecimento em diferentes temperaturas em diferentes regiões do barril e da mesa.



Figura 9 – Resistências utilizadas no aquecimento, instaladas no barril. Fonte: Próprio autor

### 3.1.3. Motor de passo

Os motores de passo são motores que se movimentam por incrementos angulares predeterminados, e portanto, possuem boa precisão. Outra vantagem desse tipo de motor é que o custo dos drivers, fonte elétrica e do próprio motor é baixo, permitindo de ser utilizado em projetos de baixo custo sem sacrificar a resolução da máquina final. Devido a movimentação em ângulos fixos, seu controle pode ser feito em malha aberta, em que o controlador somente deve enviar o número de pulsos necessários para que o motor alcance a posição final. (Pazos F. Automação de Sistemas e Robótica)

Geralmente os motores utilizados são do tipo NEMA 17 (3,7 kg.cm de torque estático) e NEMA 23 (19 kg.cm de torque estático) representados nas Figuras 10 e 11. A depender do sistema de coordenadas utilizada para movimentação, um número de motores é instalado, mas no geral, são três motores para movimentação nas direções X,Y e Z e um motor para movimentação dos componentes da extrusora.



Figura 10 – Motor de passo NEMA 17, 3.7 kg.cm de torque estático. Fonte: AUTOCORE ROBÓTIC Disponível em: <https://www.impactocnc.com/Driver-Motor-de-Passo-4A-TB6600>. Acessado em 12/01/2022



Figura 11 – Motor de passo NEMA 23, 19 kg.cm de torque estático. Fonte: KALATEC AUTOMAÇÃO Disponível em: <https://www.kalatec.com.br/motor-de-passo-nema-23/>. Acessado em 12/01/2022

### 3.1.4. Arduino Mega

Arduino é o micro controlador responsável pelo controle da movimentação e do aquecimento das resistências. Ele irá calcular o número de passos necessários para que o bico de impressão atinja as posições do código G e enviar esses pulsos para o driver DRV8825 através das conexões da Ramps 1.4.



Figura 12 – Arduino Mega. Fonte: Disponível em: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us>. Acessado em 29/12/2022

### 3.1.5. Ramps 1.4

Ramps é a placa eletrônica que irá conectar o Arduino aos drivers, e a fonte as resistências e aos próprios drivers. Sua maior vantagem é que por ser um *shield* do Arduino ela simplifica as conexões entre os componentes, promovendo um pequeno empacotamento e evitando conexões erradas.

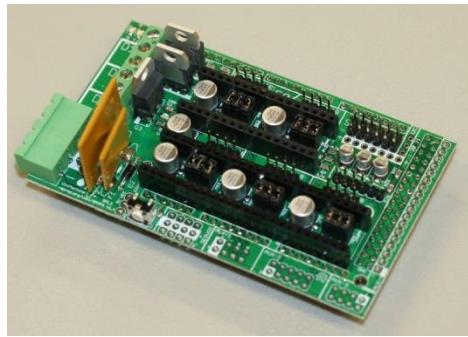


Figura 13 – Ramps 1.4. Fonte: Disponível em: [https://reprap.org/wiki/File:RAMPS1-3\\_fin.JPG](https://reprap.org/wiki/File:RAMPS1-3_fin.JPG). Acessado em 29/12/2022

### 3.1.6. Driver DRV8825 e TB6600

O driver é responsável por executar a troca de passos do motor de passo, além de subdividir cada passo e promover uma rotação mais precisa e silenciosa. Ele também permite configurar o limite de corrente para o motor e assim variar a potencia, consumo, aquecimento e, portanto, proteger o motor.

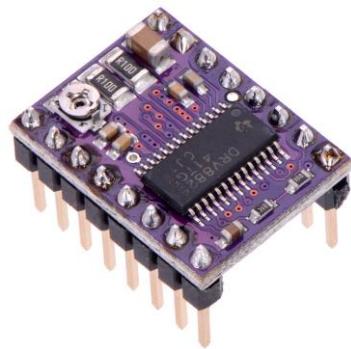


Figura 14 - Driver DRV8825. Fonte: Disponível em: <https://www.pololu.com/product/2982#lightbox-picture0J5806;main-pictures>. Acessado em 29/12/2022



Figura 15 - Driver TB6600. Fonte: Disponível em: <https://www.impactocnc.com/Driver-Motor-de-Passo-4A-TB6600>. Acessado em 29/12/2022

### **3.2. Métodos**

Para a definição dos mecanismos e soluções mecânicas, foram avaliadas varias opções a partir de uma coleção de ideias geradas pelos participantes do projeto e depois ponderadas para definir a que melhor se adequava ao projeto, levando em conta a experiência adquirida de protótipos de máquinas anteriores. Para o sistema eletrônico e a programação, foi decidido utilizar um sistema previamente já testado e open source, pois garante fácil utilização, com baixa manutenção e custo.

Para avaliação final da máquina foi decidido fazer testes de impressão para avaliar a configuração de parâmetros, como a velocidade de movimentação da mesa, largura da linha e altura de camada.

O teste para avaliação da velocidade de movimentação da mesa será feito com a impressão de varias linhas em diferentes velocidades e após isso, será avaliado a largura e espessura das linhas e junto com uma inspeção visual, será determinada a velocidade de impressão da mesa. Com esse resultado será impresso algumas geometrias e corpos de prova para validar a capacidade de impressão e de mistura da máquina. A mistura será avaliada visualmente com a impressão de PP (polipropileno) com a colocação de corantes dentro do cabeçote e a impressão de uma blenda de 90% PP/10% PS (poliestireno).

#### **4. Desenvolvimento do projeto do equipamento de suporte para dupla rosca: projeto mecânico, instrumentação, eletrônica.**

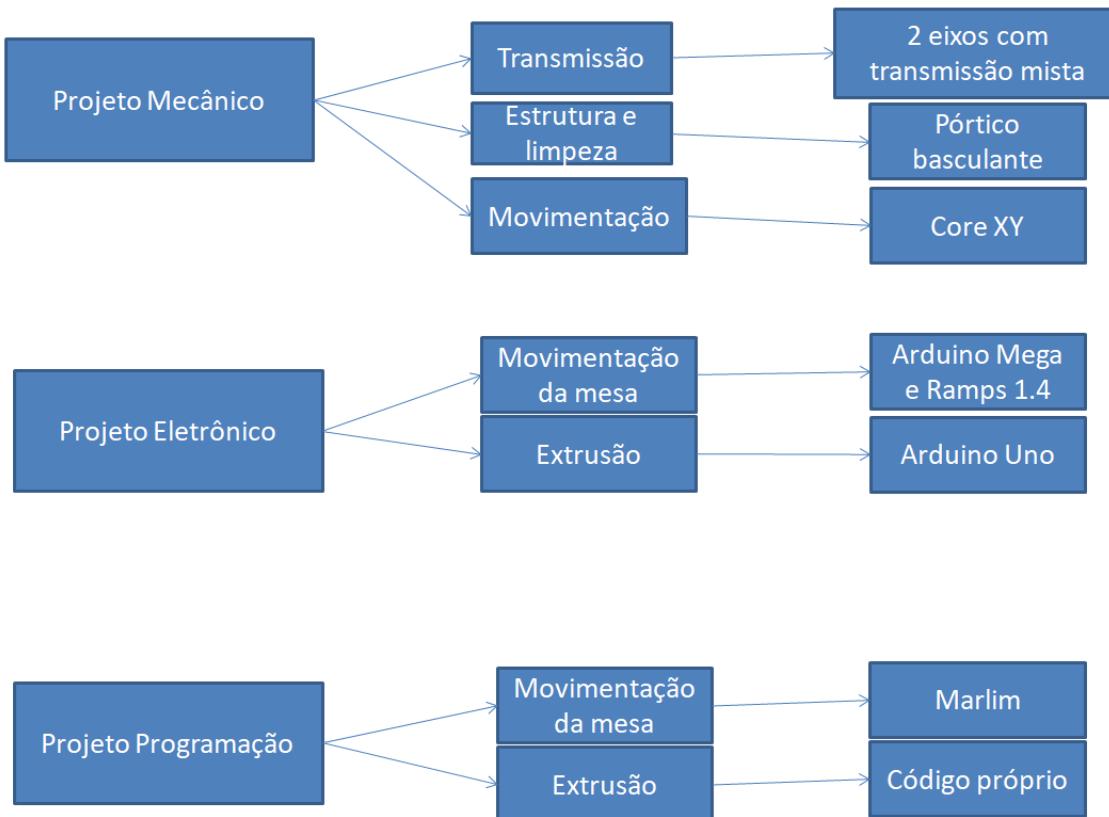


Figura 16 – Fluxograma do desenvolvimento do projeto. Fonte: Adaptado de (Próprio autor)

O sistema de impressão 3D baseado em extrusão dupla rosca em desenvolvimento é formado por um cabeçote extrusor e por uma plataforma de movimentação do substrato de deposição. O cabeçote extrusor, por sua vez, consiste em uma mini extrusora vertical composta por barril, dupla rosca corrotativa, alimentador volumétrico, e sistema de acionamento e transmissão. A plataforma é composta por uma estrutura simples do tipo pórtico e subsistemas de movimentação nos eixos x, y e z.

Com o projeto da mini extrusora suficientemente detalhado e tendo determinado os elementos usados para realizar o acionamento, torna-se possível iniciar o projeto do sistema de transmissão, que será feito a partir da elaboração de soluções conceituais seguido do detalhamento da solução mais adequada. Apesar da liberdade conceitual, é necessário atender às restrições de projeto impostas pelas dimensões da mini extrusora e dos componentes de acionamento, bem como aos requisitos mínimos de torque e velocidade de rotação das roscas.

Por fim, a plataforma deverá sustentar o cabeçote e permitir que a realização da deposição de material em três dimensões, em compromisso com os sistemas previamente projetados e de acordo com requisitos de tamanho e usabilidade definidos de acordo com o escopo de aplicação do equipamento.

## 4.1. Desenvolvimento da solução conceitual

### 4.1.1. Sistema de transmissão

A escolha do mecanismo de transmissão é de extrema importância, pois deve ser capaz de transmitir potência a partir de um ou dois motores, para dois eixos corrotativos afastados em apenas 10,5 mm entre seus centros. Diversos conceitos com base em mecanismos de transmissão rígidos (engrenagens) e/ou flexíveis (correias) foram explorados, conforme apresentado na Figura 17 que organiza as soluções propostas em função do número de eixos necessários e o tipo de transmissão.

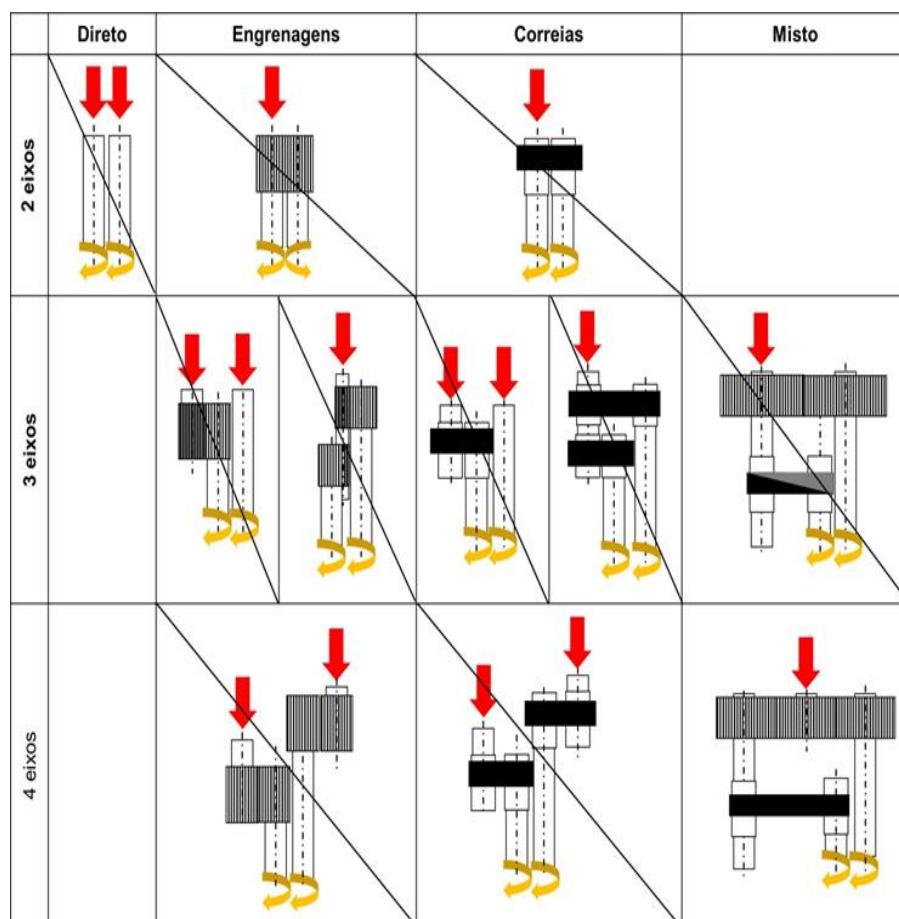


Figura 17- Soluções propostas em função do número de eixos necessários e o tipo de transmissão. Fonte: Adaptado de (Justino Netto e autor, 2020)

Os conceitos que utilizam dois motores foram descartados em razão do peso e da dificuldade em garantir a sincronização de rotação das rosas. O conceito mais simples com transmissão única por correia entre dois eixos de rosca foi descartado pela inexistência de correias sincronizadoras com comprimento adequado e polias que caibam entre os eixos. Já o conceito baseado no uso de três eixos e dois pares de engrenagens, foi descartado em razão da proximidade dos eixos e da faixa dos valores de torque a ser transmitido frente à limitada resistência das engrenagens nas dimensões necessárias. A última opção dentre os conceitos com apenas um tipo de transmissão, que utiliza dois pares de polias, foi construída e testada conforme a Figura 18, mas se mostrou inviável pela perda de passo entre as correias.

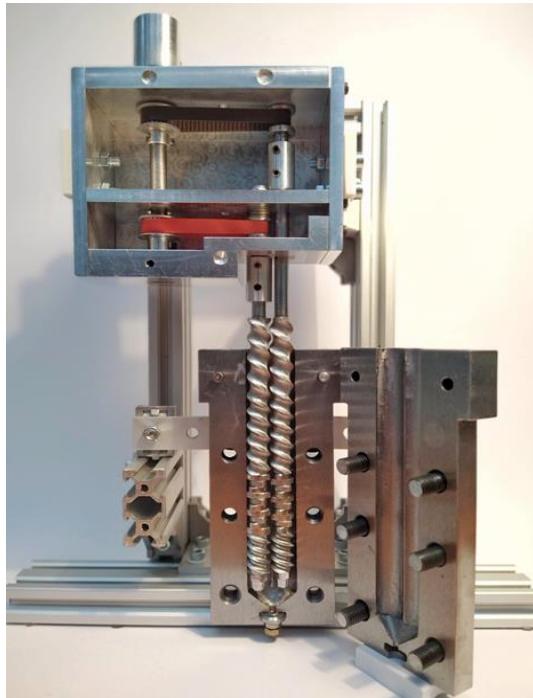


Figura 18- Solução proposta com três eixos e com polias. Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2020)

Os sistemas mistos, baseados no uso de engrenagens e polias, poderiam garantir mais facilmente a corrotação das rosas, pois em um primeiro estágio a transmissão seria feita por elementos rígidos com dimensões e resistência adequadas, deixando a transmissão por correia apenas para uma das rosas por limitação de espaço. A solução mais simples, com três eixos, um par de engrenagens e correia cruzada foi descartada pela dificuldade em encontrar correias dentadas em dupla-face e com o comprimento adequado.

Assim, o conceito selecionado baseia-se em uma transmissão mista, realizada por três engrenagens no primeiro estágio e por correia no segundo estágio, a partir de um motor, em razão do maior compromisso entre facilidade de fabricação, baixo custo e simplicidade. O primeiro estágio de transmissão foi projetado como um trem simples, formado por engrenagens idênticas de 25 dentes e módulo padronizado de 1.75 mm. No segundo estágio, polias sincronizadoras com 20 dentes e passo de 2 mm facilmente encontradas no

mercado foram utilizadas, o que permitiu a utilização de uma correia do tipo GT2, com 74 dentes e comprimento de 148 mm. A Figura 19 apresenta a solução projetada para o sistema de transmissão.



Figura 19 - Mecanismo de transmissão para dupla rosca corrotativa, com trem de engrenagens simples no primeiro estágio e transmissão por correia no segundo estágio. Fonte: Próprio autor

Para suportar e garantir o alinhamento dos componentes do sistema de transmissão, um estojo aberto foi projetado a partir de placas e espaçadores, como apresentado na Figura 20. Além dos componentes já citados, foram utilizados rolamentos de esferas, anéis elásticos e parafusos no sistema de transmissão.

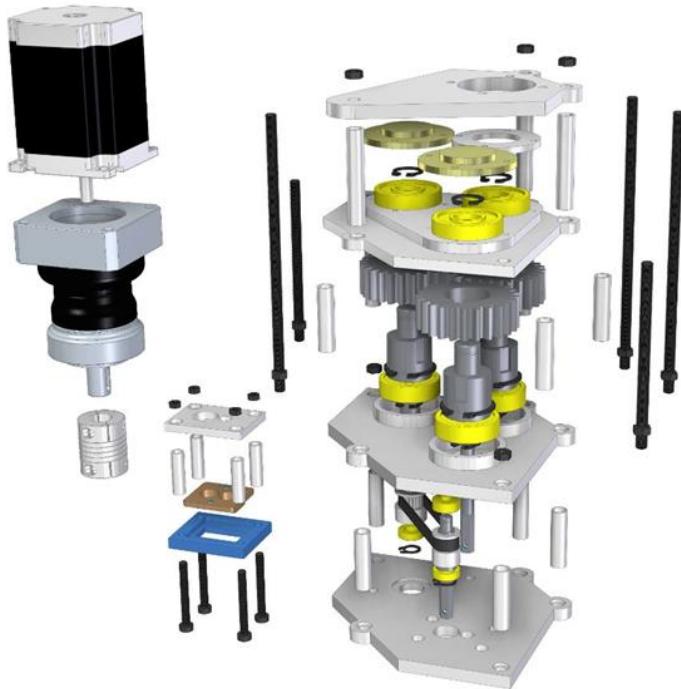


Figura 20 - Estojo aberto e componentes da transmissão em vista explodida. Fonte: Próprio autor

Os componentes do sistema de transmissão foram fabricados por métodos convencionais de usinagem, incluindo torneamento e fresamento. Para os elementos de transmissão foi utilizado aço estrutural (AISI 4340) e para o estojo aberto foram utilizadas placas de alumínio.

Com o objetivo de aumentar o torque fornecido à dupla rosca, foi adquirido um redutor de velocidades planetário, modelo PEII050 (ApexDynamics, USA), com redução de 10:1 entre a velocidade de entrada e saída. O motor de passo utilizado, NEMA 23 (Kalatec, Brasil), é capaz de fornecer um torque máximo de 2.5 N·m a 60 RPM. Considerando que não ocorram perdas na transmissão, o valor máximo de torque que é fornecido ao sistema é de 25 N·m, a ser dividido entre os dois engrenamentos, o que equivale a um torque máximo de 12.5 N·m em cada rosca. Na prática, porém, a dupla rosca deverá apresentar velocidades superiores a 50 RPM (500 RPM no eixo do motor), o que implica em níveis de torque inferiores a 2.5 N·m em cada rosca.

#### **4.1.2. Estrutura da plataforma**

O sistema de impressão 3D baseado em extrusão dupla rosca foi proposto para constituir um banco experimental para realização de pesquisas nas áreas de processamento de polímeros em escala laboratorial e Manufatura Aditiva de objetos de dimensões reduzidas, e.g. corpos-de-prova, scaffolds e, potencialmente, produtos farmacêuticos. Assim, além de adequar o equipamento para utilização sobre bancada, a plataforma

deve facilitar a manutenção dos sistemas e permitir alterações futuras conforme a necessidade das pesquisas a serem desenvolvidas.

A estrutura foi projetada como um pórtico simples, formado por perfis estruturais que servem como duas colunas e uma viga sobre a qual o cabeçote deverá ser afixado. Para permitir a retirada do barril para limpeza, a viga apresenta um mecanismo giratório manual. Conforme mostrado na Figura 21, a rotação da viga em 90° posiciona todo o conjunto do cabeçote (motor, transmissão, dupla rosca e barril) na horizontal, aumentando o espaço disponível para trabalho de manutenção. A rotação é limitada pelas cantoneiras da viga que encostam em parafusos posicionados nas colunas.

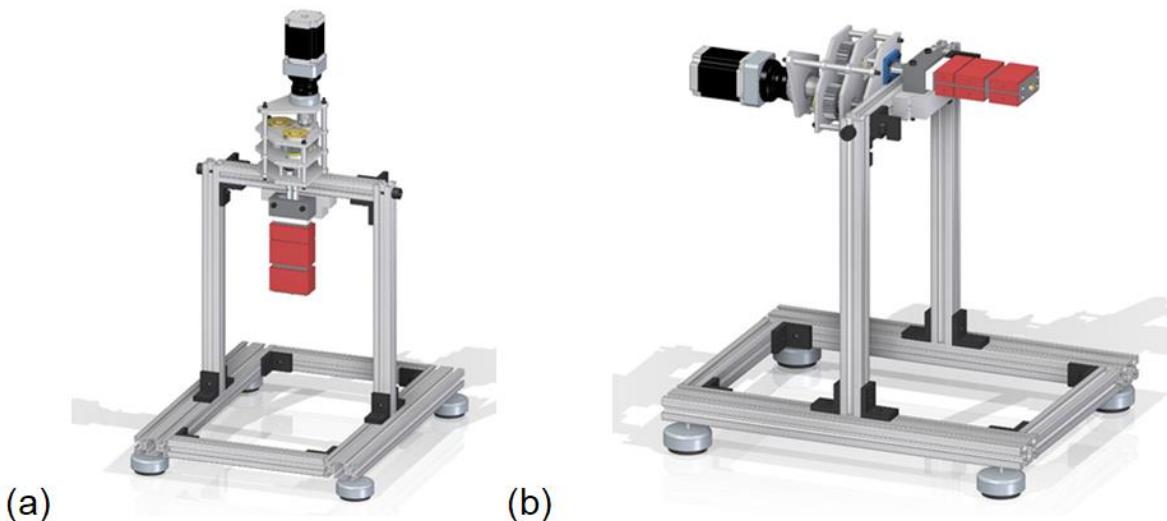


Figura 21- Estrutura da plataforma com o cabeçote na posição (a) de trabalho (vertical) e (b) de manutenção (horizontal).  
Fonte: Próprio autor

Para maior rigidez, o pórtico foi projetado sobre uma base formada por quatro perfis estruturais. Todas as uniões entre os perfis foram planejadas para serem feitas a partir de cantoneiras, parafusos e porcas do tipo T. No lado inferior da base, quatro pés reguláveis serão utilizados para ajustar o nível do equipamento e absorver vibrações. A ampla disponibilidade de perfis estruturais de alumínio no mercado e a facilidade de montagem deverão permitir futuras alterações no projeto da estrutura.

#### **4.1.3. Sistema de movimentação do substrato de deposição**

Em razão da massa significativa do cabeçote de impressão, de cerca de 5 kg, decidiu-se atribuir toda a movimentação nos três eixos ao substrato de deposição. A fim de reduzir as dimensões da plataforma e simplificar o conjunto, o sistema foi projetado de acordo com o conceito de princípio de movimentação Core XY, que funciona a partir de um par de correias movimentadas por dois motores de passo fixos como ilustrado na Figura 22.

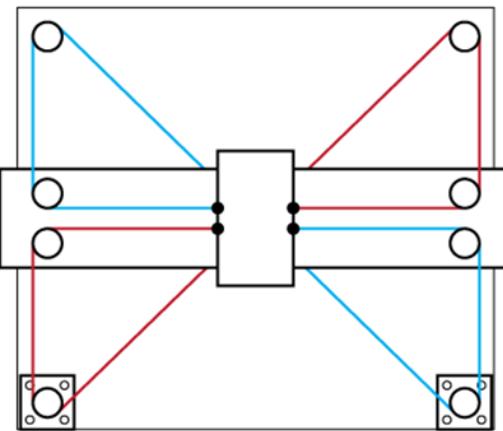


Figura 22- Mecanismo de movimentação da mesa em 3 eixos. Fonte: Adaptado de (Moyer, 2012).

Com o sistema Core XY, basta girar os dois motores na mesma direção para deslocar o substrato na direção x, ou então girar os dois motores em direções opostas para deslocar o substrato na direção y. Além de permitir deslocamentos em x e y com maior velocidade, a inércia das massas a serem movimentadas pode ser bastante reduzida, o que é essencial para a geração de objetos tridimensionais com precisão adequada. O sistema Core XY foi então montado numa estrutura de elevação presa a dois fusos, cada um acoplado a um motor, e a quatro guias lineares de suporte, o que permite a movimentação de todo o conjunto no eixo Z. A Figura 23 apresenta o projeto final da plataforma, na qual os componentes em azul representam peças que foram projetadas para fabricação por impressão 3D.

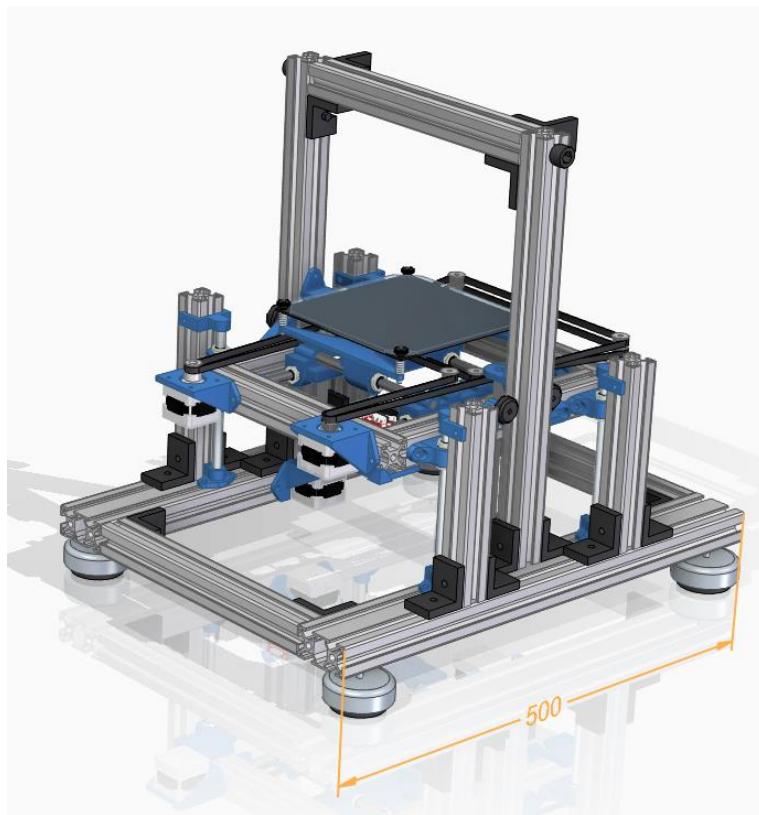


Figura 23 - Projeto final da plataforma formada pela estrutura em pórtico e sistema de movimentação da mesa em três eixos. Fonte: Próprio autor

## 4.2. Eletrônica

O circuito eletrônico de extrusão é demonstrado na Figura 24 (a). A fonte de 24 V alimenta ambos os motores que são controlados pelos seus respectivos drivers, DRV8825 (Nema 17) e TB6600 (Nema 23) que por sua vez são controlados pelo Arduino Uno.

O circuito eletrônico de movimentação é demonstrado na Figura 24 (b). A fonte 12 V alimenta a Ramps 1.4 (que irá distribuir essa energia para todos os componentes ligados a ela) e a mesa aquecida através de um rele. A Ramps 1.4 é conectada ao Arduino Mega, ele controla os drivers DRV8825 (Nema 17), e portanto os motores, e o aquecimento das resistências e da mesa aquecida

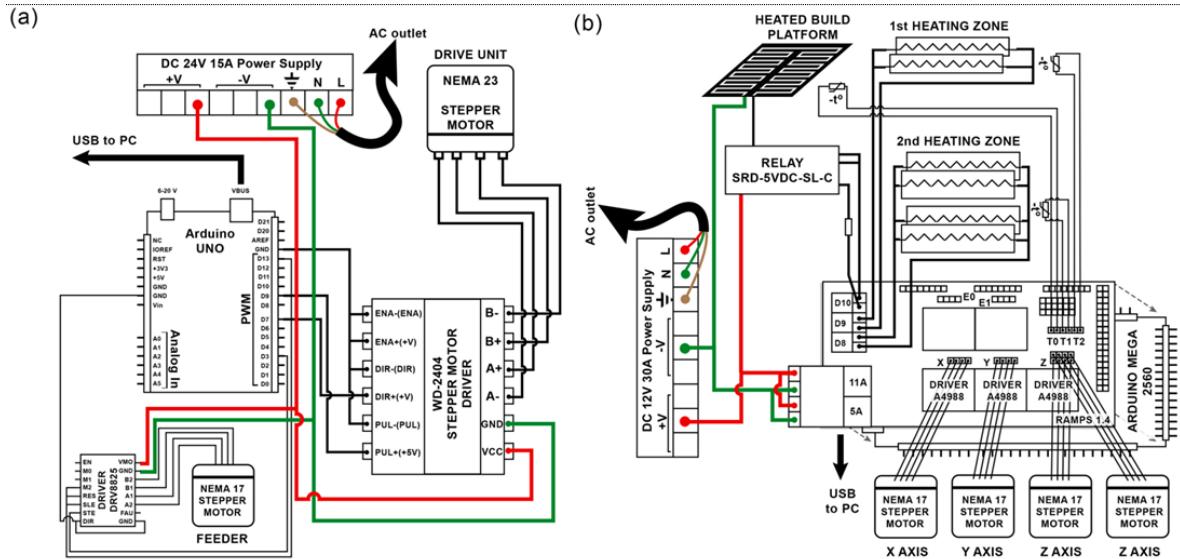


Figura 24- (a) Circuito eletrônico de extrusão; (b) Circuito eletrônico de movimentação. Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2022).

### 4.3. Programação eletromecânica

Para a programação da máquina foi utilizado programas diferentes em cada Arduino de cada sistema. O Arduino Mega recebeu o firmware open source Marlin, que é responsável pelos cálculos de números de passos, acelerações e velocidades de movimentação dos motores a partir das posições do código G, além do controle e manutenção da temperatura das resistências. Já o Arduino Uno recebeu um código próprio, apresentado no Apêndice A, para o controle independente dos dois motores e drivers, permitindo que o operador defina a velocidade de rotação das roscas e do alimentador separadamente.

## 5. Montagem do protótipo

Com o sistema da transmissão montado, pôde-se acoplar a dupla rosca e verificar a movimentação do conjunto. Foram realizados testes em diversas velocidades para detectar desalinhamentos e acomodar os elementos de transmissão. Além disso, foram necessárias adaptações na montagem para diminuir o movimento de precessão apresentado pela rosca acoplada diretamente ao primeiro estágio de transmissão.

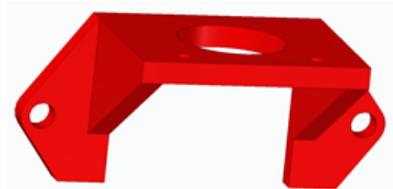
A estrutura foi montada a partir de perfis estruturais de alumínio com seção de 30x30 mm e 30x60 mm, com juntas formadas por cantoneiras de alumínio, porcas T e parafusos M5 do tipo allen. A maioria dos componentes do sistema Core XY foram fabricados por impressão 3D do tipo FFF (Fused Filament Fabrication), utilizando PLA (poliácido lático) por sua maior facilidade de impressão. As configurações de impressão foram de 210°C no bico, 60°C na mesa, velocidade de 50 mm/s de movimentação e altura de camada de 0,22 mm. Essas configurações e material foram escolhidas, pois provem a qualidade de acabamento superficial e resistência estrutural (a depender do preenchimento de cada peça) com uma velocidade de impressão adequada ao projeto.

A Figura 25 apresenta os componentes impressos e o Apêndice B apresenta as dimensões básicas das peças.

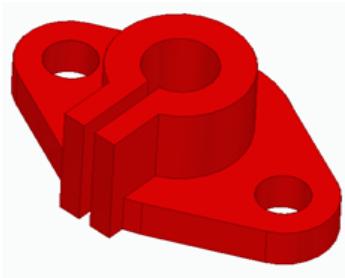
(a) Suporte motor core XY



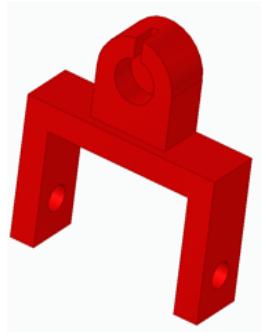
(b) Suporte motor eixo Z



(c) Base da guia linear



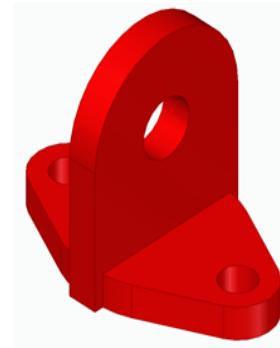
(d) Topo da guia linear



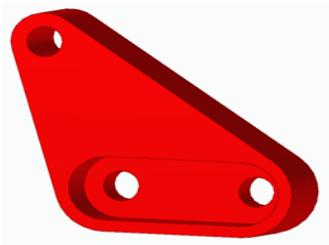
(e) Suporte rolamento linear



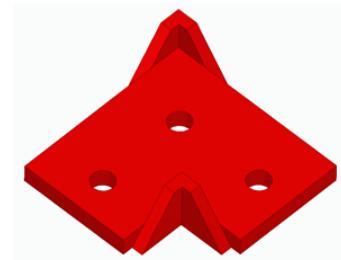
(f) Suporte superior do fuso



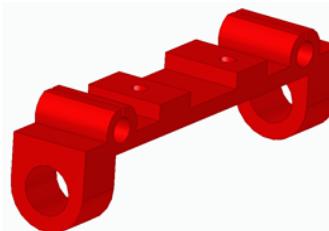
(g) Suporte rolamento da coluna



(h) Fixador da mesa core XY



(i) Suporte rolamento eixo Y



(j) Base da mesa

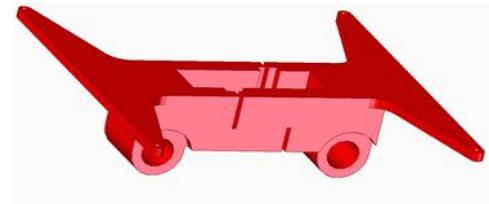


Figura 25- Peças fabricadas por Manufatura Aditiva. Fonte: Próprio autor

Além das peças impressas, foram utilizadas guias lineares de 8 mm de diâmetro, rolamentos lineares de 24 e 57 mm de comprimento, fusos trapezoidais de 8 mm de diâmetro e passo de 2 mm com castanhas de bronze,

acoplamentos flexíveis 5x8 mm, polias tensoras GT2 de 20 dentes, polias GT2 lisas e cerca de 2 m de correia sincronizadoras GT2 com passo de 2 mm.

A construção da plataforma procedeu inicialmente com a montagem da estrutura de pórtico, seguido da montagem do sistema Core XY e, por fim, da montagem do sistema de movimentação em z, como apresentado na Figura 26.

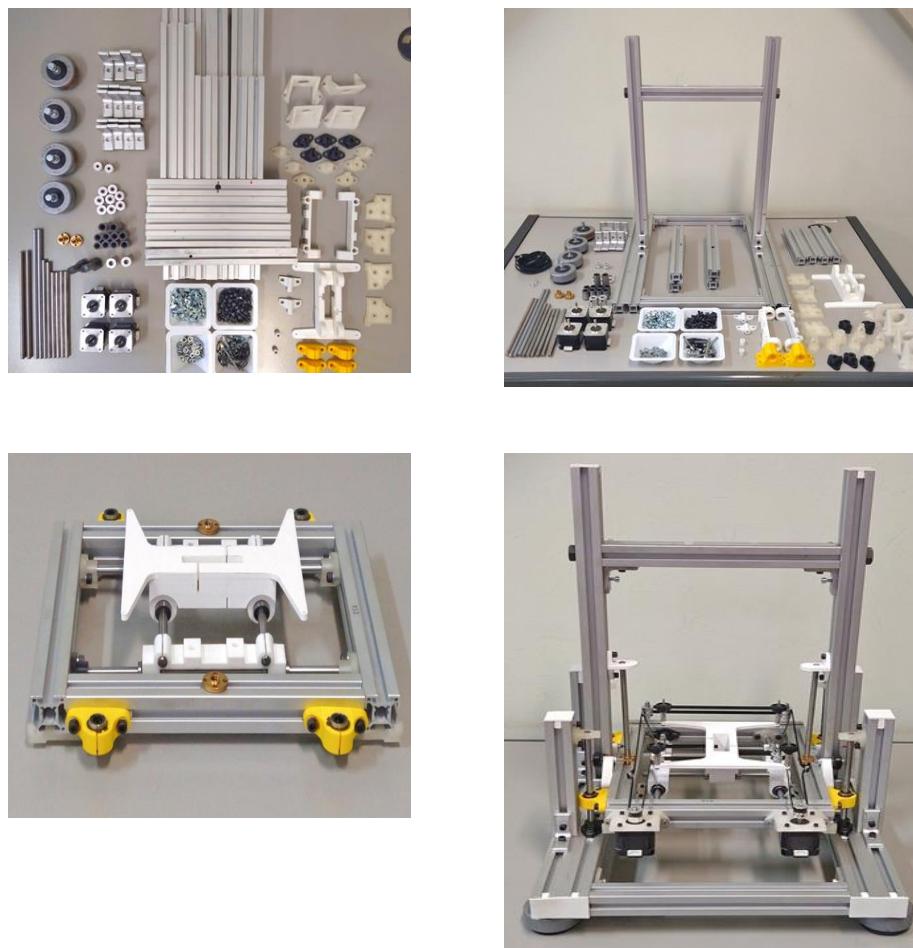


Figura 26- Montagem da estrutura e peças da máquina. Fonte: Próprio autor

Finalmente, o cabeçote foi fixado na viga rotativa, e o sistema foi testado com sucesso em relação à sua capacidade de extrusão bem como de movimentação do substrato de deposição. A Figura 27 apresenta o equipamento montado em funcionamento durante um dos testes de extrusão.

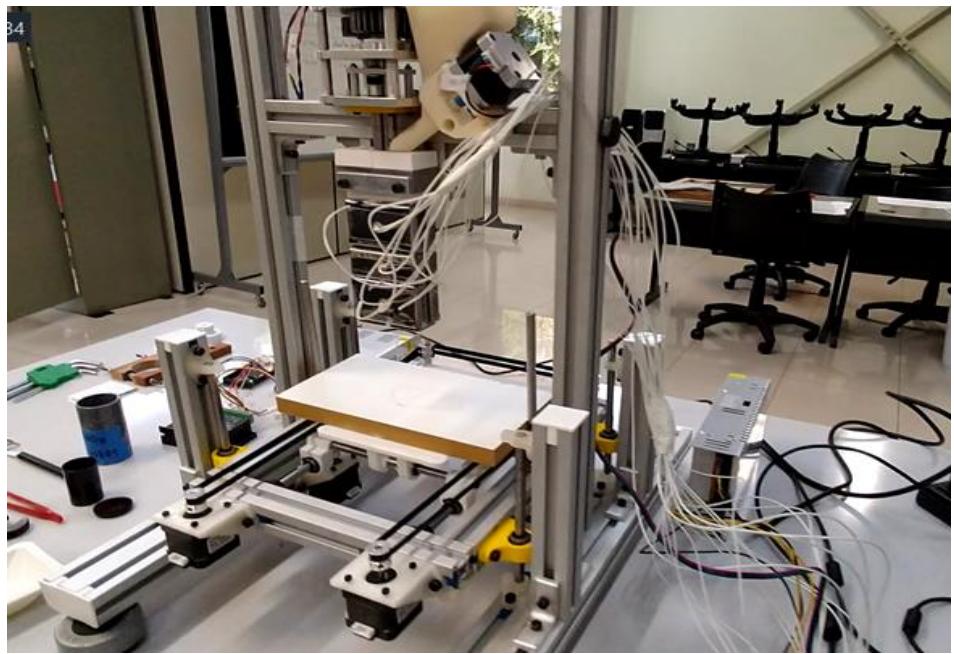


Figura 27- Equipamento montado em funcionamento durante um dos testes de extrusão. Fonte: Próprio autor

## 6. Estimativa de Custo da matéria-prima da plataforma

Estimativa de custo da plataforma de movimentação, sistema de transmissão e sistema eletrônico incluindo custos dos materiais e da manufatura subtrativa da transmissão. É importante ressaltar que os custos de mão de obra para a montagem da máquina, da operação e energia gasta pela impressora 3D para fabricação das peças não foram estimados.

Tabela 1 - Custo da matéria-prima da plataforma

Item	Quant	Preço unid	Preço total	Link
Perfil estrutural alumínio 30x30 mm [m]	4,5	R\$ 60,00	R\$ 270,00	<a href="https://loja.forsetisolucoes.com.br/perfil-estrutural-em-aluminio-30x30-basico-canal-8-t-slot-tslot">https://loja.forsetisolucoes.com.br/perfil-estrutural-em-aluminio-30x30-basico-canal-8-t-slot-tslot</a>
Parafuso M5x10 mm	104	R\$ 0,60	R\$ 62,40	<a href="https://www.impactocnc.com/parafuso-allen-cab-cilindrica-din-912-m5-080-x-10-aco-inox-a2">https://www.impactocnc.com/parafuso-allen-cab-cilindrica-din-912-m5-080-x-10-aco-inox-a2</a>
Parafuso M14x60 mm	2	R\$ 5,68	R\$ 11,36	<a href="https://www.jofepar.com.br/parafuso-sextavado-aco-8-8-ma-rosca-parcial-m-14-x-55-p3767">https://www.jofepar.com.br/parafuso-sextavado-aco-8-8-ma-rosca-parcial-m-14-x-55-p3767</a>
Barra rosada M5 [m]	1	R\$ 7,90	R\$ 7,90	<a href="https://www.impactocnc.com/barra-rosada-1 metro-m5-080-ferro-bicromatizado">https://www.impactocnc.com/barra-rosada-1 metro-m5-080-ferro-bicromatizado</a>
Porca T	104	R\$ 0,47	R\$ 48,88	<a href="https://www.impactocnc.com/porca-martelo-t-m5-serie-20">https://www.impactocnc.com/porca-martelo-t-m5-serie-20</a>
Pés vibrastop	4	R\$ 36,60	R\$ 146,40	<a href="https://www.anhanguerafeiramentas.com.br/produto/amortecedor-de-vibracao-3-8-200kg-mac3-8-vibrastop-114290?utm_source=google&amp;utm_medium=cpc&amp;utm_campaign=https://www">https://www.anhanguerafeiramentas.com.br/produto/amortecedor-de-vibracao-3-8-200kg-mac3-8-vibrastop-114290?utm_source=google&amp;utm_medium=cpc&amp;utm_campaign=https://www</a>

				<a href="http://anhangueraferramentas.com.br/produto/amortecedor-de-vibracao-3-8-200kg-mac3-8-vibrastop-114290?utm_source=google&amp;utm_medium=cpc&amp;utm_campaign=merchant">.anhangueraferramentas.com.br/produto/amortecedor-de-vibracao-3-8-200kg-mac3-8-vibrastop-114290?utm_source=google&amp;utm_medium=cpc&amp;utm_campaign=merchant</a>
Guia linear 8 mm [0,5 m]	3	R\$ 36,25	R\$ 108,75	<a href="https://www.impactocnc.com/guia-linear-sae1045-8x-500mm-h7-cromada">https://www.impactocnc.com/guia-linear-sae1045-8x-500mm-h7-cromada</a>
Rolamento linear lm8uu	8	R\$ 5,25	R\$ 42,00	<a href="https://www.impactocnc.com/lm8uu">https://www.impactocnc.com/lm8uu</a>
Rolamento linear lm8luu	2	R\$ 14,50	R\$ 29,00	<a href="https://www.impactocnc.com/nmmdiw8p0-rolamento-linear-longo-lm8luu">https://www.impactocnc.com/nmmdiw8p0-rolamento-linear-longo-lm8luu</a>
Roldana V	4	R\$ 10,50	R\$ 42,00	<a href="https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1871590500-4pcs-roda-polia-impresso-3d-rolamento-5mm-dimetro-JM#position=2&amp;search_layout=grid&amp;type=item&amp;tracking_id=bf1b03ff-bd9e-4b81-ab4c-4c76b13c2df4">https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1871590500-4pcs-roda-polia-impresso-3d-rolamento-5mm-dimetro-JM#position=2&amp;search_layout=grid&amp;type=item&amp;tracking_id=bf1b03ff-bd9e-4b81-ab4c-4c76b13c2df4</a>
Fuso Tr8x2 mm [m]	0,3	R\$ 30,30	R\$ 9,09	<a href="https://www.impactocnc.com/fuso-trapezoidal-tr8-passo-8mm-x-300mm-s-castanha">https://www.impactocnc.com/fuso-trapezoidal-tr8-passo-8mm-x-300mm-s-castanha</a>
Castanha Tr8x2 mm	2	R\$ 13,10	R\$ 26,20	<a href="https://www.impactocnc.com/castanha-tr8-passo-2mm">https://www.impactocnc.com/castanha-tr8-passo-2mm</a>
Cantoneira reta	20	R\$ 4,99	R\$ 99,80	<a href="https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2796317399-cantoneira-">https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2796317399-cantoneira-</a>

				<a href="https://www.impactocnc.com/produto/aluminio-para-perfil-estrutural-3030-90-kit-10-JM#position=2&amp;search_layout=stack&amp;type=item&amp;racking_id=60c17a4d-0f17-456e-adfd-19524e193d2c">aluminio-para-perfil-estrutural-3030-90-kit-10-JM#position=2&amp;search_layout=stack&amp;type=item&amp;racking_id=60c17a4d-0f17-456e-adfd-19524e193d2c</a>
Nema 17	5	R\$ 71,90	R\$ 359,50	<a href="https://www.impactocnc.com/produto/motor-de-passo-nema-17-52-kgfcm-17hs8401-18a.html">https://www.impactocnc.com/produto/motor-de-passo-nema-17-52-kgfcm-17hs8401-18a.html</a>
Nema 23	1	R\$ 125,20	R\$ 125,20	<a href="https://www.impactocnc.com/produto/motor-de-passo-nema-23-hs5628s-28a-12-kgfcm">https://www.impactocnc.com/produto/motor-de-passo-nema-23-hs5628s-28a-12-kgfcm</a>
Redutor 10:1	1	R\$ 1600,00	R\$ 1600,00	<a href="https://neoyama.com.br/d/produtos/redutores-apex/">https://neoyama.com.br/d/produtos/redutores-apex/</a>
Correia GT2x6mm [2 m]	0,5	R\$ 8,80	R\$ 4,40	<a href="https://www.impactocnc.com/Correia-GT2-6mm-passo-2mm">https://www.impactocnc.com/Correia-GT2-6mm-passo-2mm</a>
Arduino Uno	1	R\$ 83,40	R\$ 83,40	<a href="https://www.impactocnc.com/arduino-uno-r3">https://www.impactocnc.com/arduino-uno-r3</a>
Arduino Mega	1	R\$ 129,90	R\$ 129,90	<a href="https://www.impactocnc.com/arduino-mega-2560-r3">https://www.impactocnc.com/arduino-mega-2560-r3</a>
Ramps 1.4	1	R\$ 49,90	R\$ 49,90	<a href="https://www.impactocnc.com/shield-ramps-v1-4-52001">https://www.impactocnc.com/shield-ramps-v1-4-52001</a>
Driver Drv8825	5	R\$ 19,34	R\$ 96,70	<a href="https://www.impactocnc.com/Driver-DVR8825-para-Motor-de-Passo-Nema-de-2.5a">https://www.impactocnc.com/Driver-DVR8825-para-Motor-de-Passo-Nema-de-2.5a</a>
Driver Tb6600	1	R\$ 154,90	R\$ 154,90	<a href="https://www.impactocnc.com/Driver-Motor-de-Passo-4A-TB6600">https://www.impactocnc.com/Driver-Motor-de-Passo-4A-TB6600</a>

Fonte 12V 30A	1	R\$ 107,90	R\$ 107,90	<a href="https://www.impactocnc.com/fonte-chaveada-12v-30a-360w-110220v">https://www.impactocnc.com/fonte-chaveada-12v-30a-360w-110220v</a>
Fonte 24V 15A	1	R\$ 156,60	R\$ 156,60	<a href="https://www.impactocnc.com/fonte-chaveada-24v-15a-360w-110220v">https://www.impactocnc.com/fonte-chaveada-24v-15a-360w-110220v</a>
Acoplamento elástico	3	R\$ 9,90	R\$ 29,70	<a href="https://www.impactocnc.com/Acoplamento-flexivel-5x8">https://www.impactocnc.com/Acoplamento-flexivel-5x8</a>
Polia motora GT2	2	R\$ 7,90	R\$ 15,80	<a href="https://www.impactocnc.com/polia-gt2-20-dentes-furo-635mm-p-correia-6mm">https://www.impactocnc.com/polia-gt2-20-dentes-furo-635mm-p-correia-6mm</a>
Polia movida GT2	8	R\$ 7,90	R\$ 63,20	<a href="https://www.impactocnc.com/Polia-Esticadora-GT2-20-Dentes">https://www.impactocnc.com/Polia-Esticadora-GT2-20-Dentes</a>
Rolamento 30x10x9 mm	6	R\$ 30,00	R\$ 180,00	<a href="https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-778259352-rolamento-6200zz-30x10x9-para-alternador-diversos-_JM">https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-778259352-rolamento-6200zz-30x10x9-para-alternador-diversos-_JM</a>
Rolamento 13x7x4 mm	2	R\$ 15,83	R\$ 31,66	<a href="https://pt.aliexpress.com/w/wholesale-13x7x4.html">https://pt.aliexpress.com/w/wholesale-13x7x4.html</a>
Rolamento 13x6x5 mm	1	R\$ 25,00	R\$ 25,00	<a href="https://www.acovillaca.com.br/MLB-1924422979-rolamento-de-esfera-686-2rs-13x6x5-mm-kit-2pc-_JM">https://www.acovillaca.com.br/MLB-1924422979-rolamento-de-esfera-686-2rs-13x6x5-mm-kit-2pc-_JM</a>
Rolos de PLA para impressão	3	R\$ 107,50	R\$ 322,50	<a href="https://www.gtmax3d.com.br/filamentos/pla/175mm-gtmax3d-preto-1kg">https://www.gtmax3d.com.br/filamentos/pla/175mm-gtmax3d-preto-1kg</a>
Usinagem da transmissão	1	R\$ 4.200,00	R\$ 4.200,00	

	Total	R\$ 8.640,04
--	-------	--------------

Fonte: Próprio autor

## 7. Teste de avaliação funcional: resultados

Para avaliar a velocidade máxima de impressão da máquina foi feito um teste de deposição de linhas em varias velocidades de movimentação da mesa de deposição. O teste foi feito com PP à alimentação de 20g/h, rotação de 80 RPM nas roscas, bocal de 0,6 mm, com o bocal a 1,0 mm da mesa, mesa aquecida a 80°C e o barril aquecido em 180°C e 210°C na primeira e segunda região de aquecimento respectivamente.

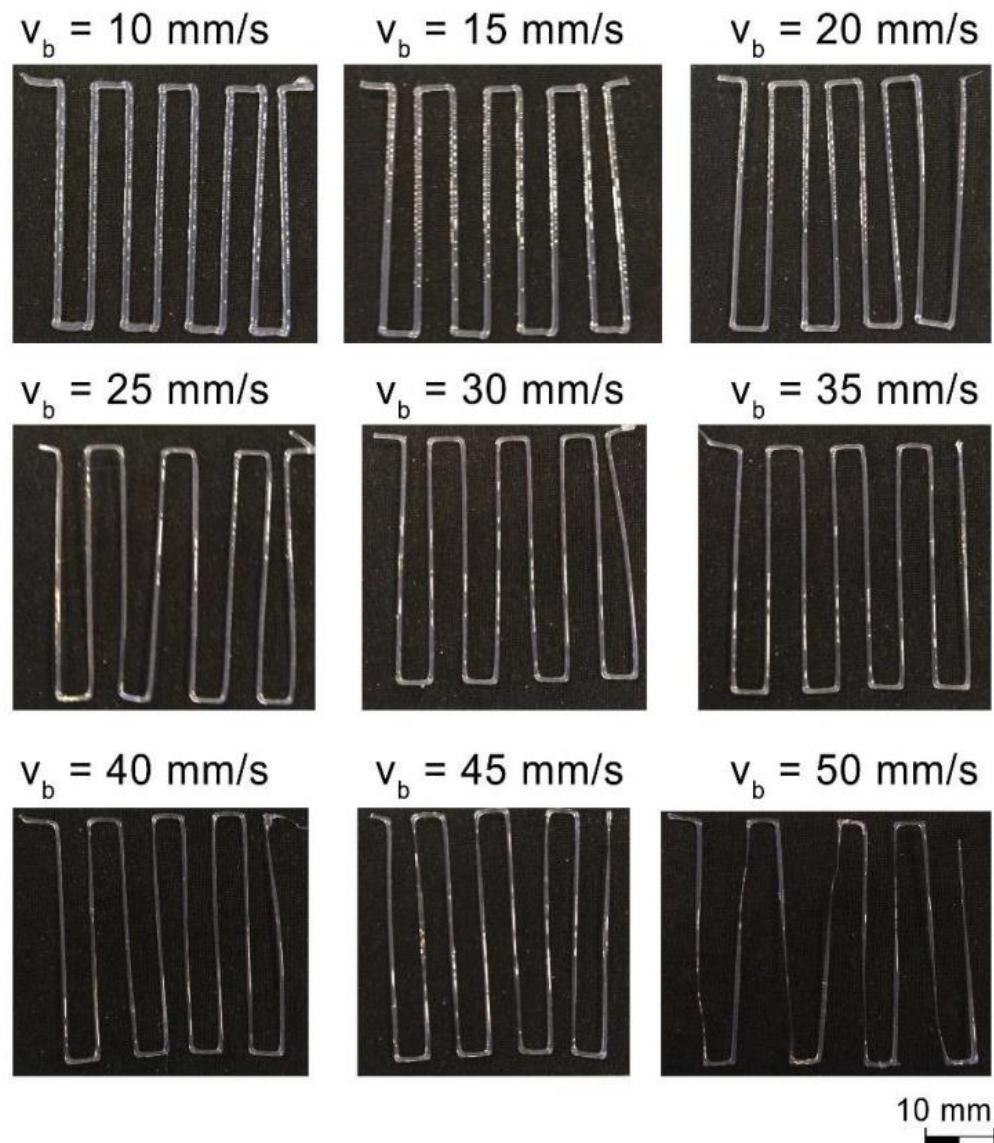


Figura 28 – Teste de deposição para avaliar a velocidade de impressão. Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2022)

Como já observado em sistemas de extrusão de FDM, é esperado que com o aumento da velocidade o cordão impresso se estica e, portanto, diminui sua secção transversal, isso pode ser verificado que ocorre pelas medidas de largura e altura dos cordões que são apresentadas na Figura 28.

A largura foi medida utilizando o software ImageJ e a altura dos cordões foi medida através de um micrômetro. A partir das medidas e da inspeção visual, foi definido que a velocidade máxima de impressão da máquina é em torno de 45 mm/s.

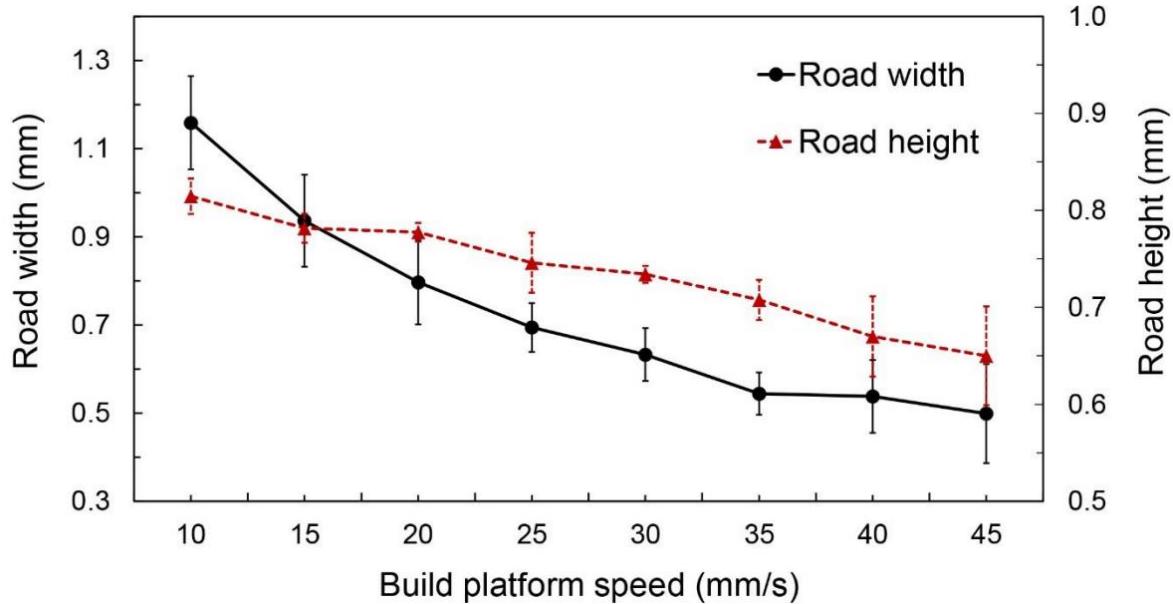


Figura 29 – Largura e altura do cordão impresso em função da velocidade de movimentação da mesa. Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2022)

Apesar da velocidade máxima de impressão ser em torno de 45 mm/s foi observado um bom compromisso entre velocidade e qualidade de impressão próxima a 20 mm/s, e essa será a velocidade utilizada para a impressão dos corpos de prova para avaliar a capacidade de impressão e mistura do projeto.

Nesse teste foram impressos dois corpos de prova de tração (ASTM D638), ambos com 100% de preenchimento, um com ângulo de preenchimento 90°/45° e outro com 90°/90° (na orientação XY), um *scaffold* e uma caixa retangular em modo vaso também foram impressos. As peças foram impressas com a velocidade de 20 mm/s, largura de linha 0,8 mm, altura de camada de 0,6 mm, alimentação de 20g/h e 80 RPM nas roscas. Devido ao modo vaso da caixa, foi reduzida a velocidade de movimentação para 15 mm/s e a altura de camada para 0,4 mm, isso garante que o extrudado consiga aderir à camada inferior da impressão e obtermos a geometria desejada da impressão. Nessa impressão da caixa também foi adicionado partículas de *masterbatches* PP amarelo e posteriormente vermelho para visualizar a capacidade de mistura da extrusora. Pelas mesmas razões da caixa foi reduzida altura de camada para 0,4 mm para a impressão do *scaffold*. A Figura 30 apresenta a qualidade das peças impressas.

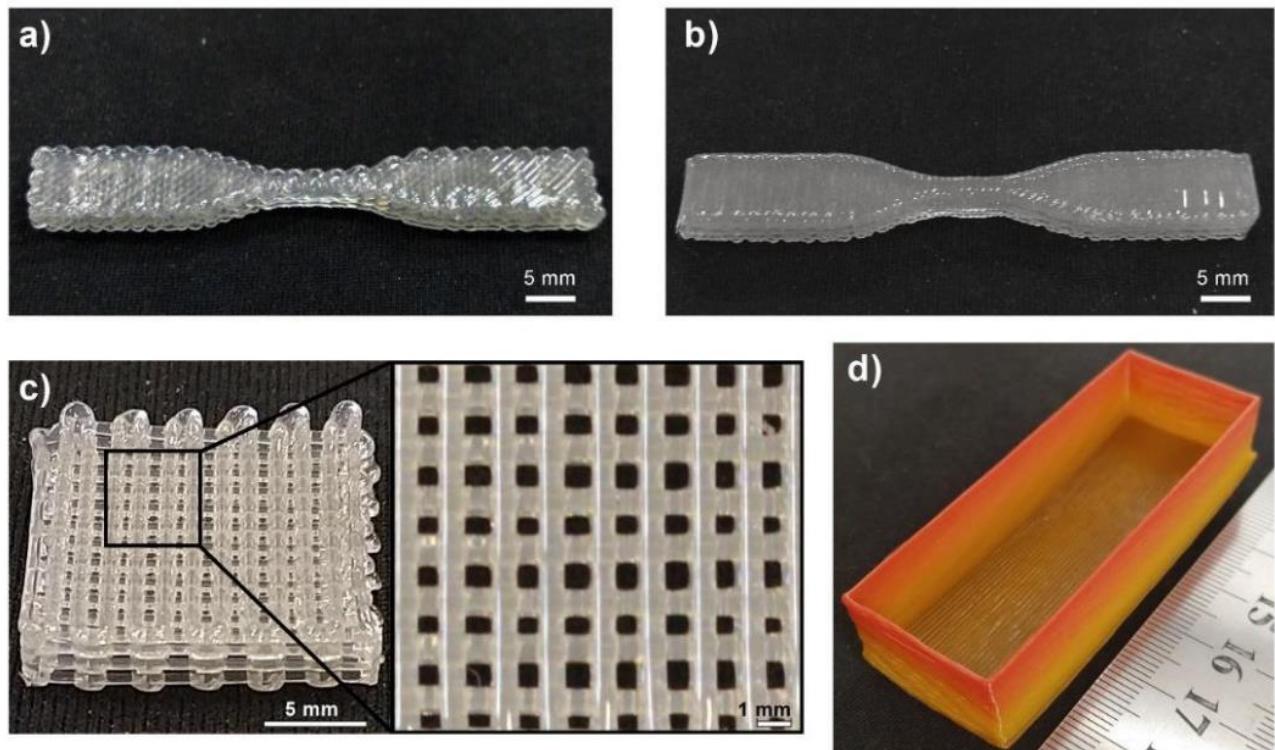


Figura 30 – Peças impressas em PP: (a) 90°/45° corpo de prova de tração, (b) 90°/90° corpo de prova de tração, c) scaffold, d) Caixa em modo vaso. Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2022)

Para avaliar a mistura entre dois materiais e a repetibilidade da máquina foi impresso seis corpos de prova de 90PP/10PS e seis corpos de prova de PP, ambos com ângulo de preenchimento 90°/90°, na orientação XY (ASTM F2971–13). As configurações utilizadas foram de 20 g/h, 80 RPM nas roscas, 20 mm/s de velocidade de movimentação, 0,8 mm de largura de linha, 0,6 mm de altura de camada e 100% de preenchimento. A Figura 31 apresenta as peças impressas.

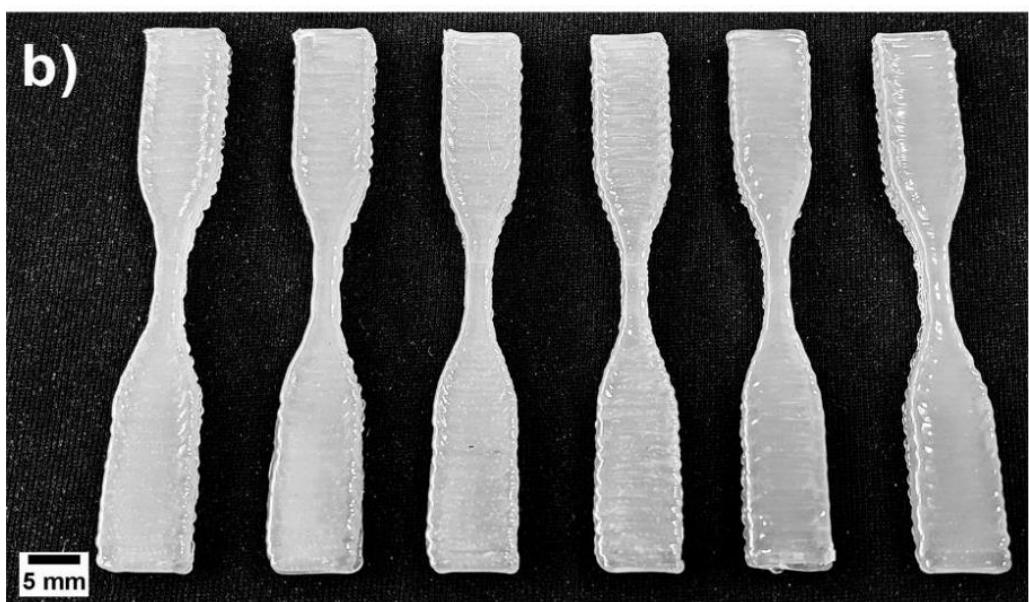
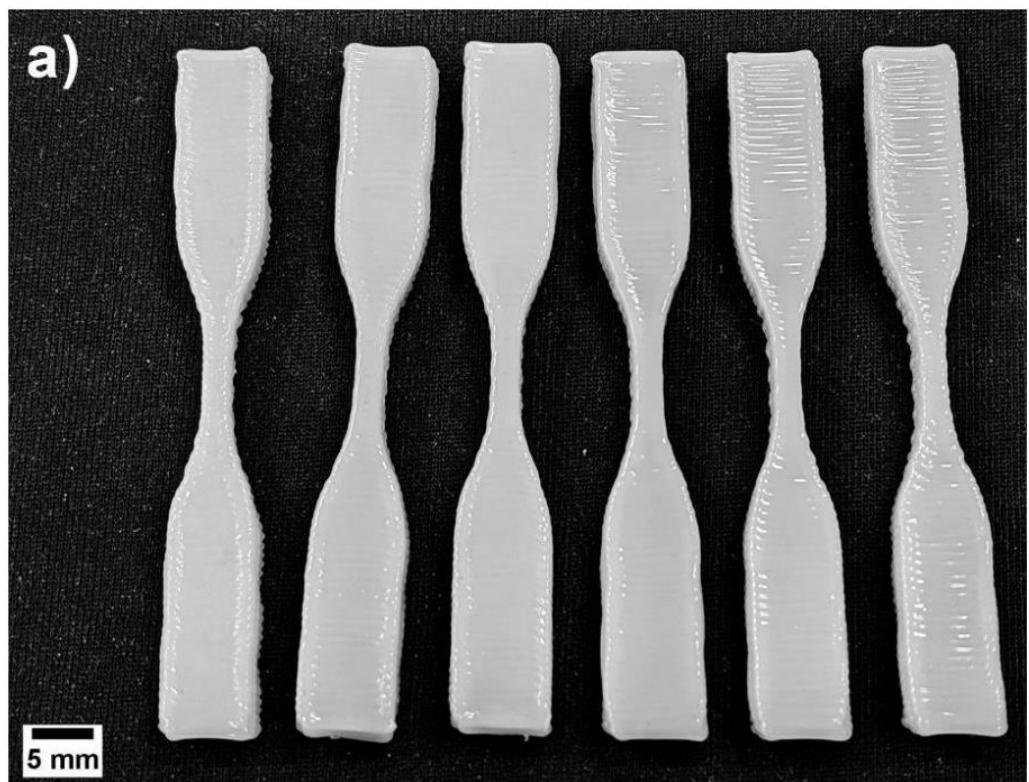


Figura 31 – Corpos de prova impressos: a) 90PP/10PS blenda e b) somente PP. Fonte: Adaptado de (Justino Netto et al., 2022)

## **8. Conclusões e Trabalhos Futuros**

Esse trabalho apresentou o desenvolvimento, fabricação e montagem de uma impressora 3D baseada em extrusão dupla rosca. O protótipo foi validado por meio de testes funcionais e verificou que a máquina é capaz de extrudar e imprimir.

O projeto da máquina foi feito em CAD (SolidEdge) e envolveu a concepção de soluções, o dimensionamento e a documentação dos componentes para posterior fabricação e montagem do protótipo. As peças foram fabricadas por métodos subtrativos tradicionais e também por meio de técnicas aditivas. A montagem envolveu a utilização de peças adquiridas no mercado e ajustes mecânicos. Ao final, o sistema proposto foi construído e pôde ser validado com sucesso com relação à sua capacidade de processar material e movimentar o substrato de deposição, permitindo concluir que as decisões de projeto foram adequadas.

Os sistemas eletrônicos, de monitoramento e a programação também foram validados pelos testes de impressão e repetibilidade, garantindo que a máquina é capaz de variar seus parâmetros de impressão ou mantê-los constantes e garantindo assim impressões repetidas.

Para trabalhos futuros algumas melhorias podem ser feitas, nos sistemas mecânicos pode se manufaturar uma mesa de aquecimento no tamanho customizado da máquina, aumentando assim o seu volume de impressão. No sistema eletrônico, pode-se substituir o rele que controla a alimentação a mesa de aquecimento por um SSR e calibrar seu novo PID para aumentar a longevidade dos componentes e garantir uma estabilidade de temperatura da mesa ainda maior. Na programação pode-se integrar os dois sistemas, o de extrusão e o de movimentação, permitindo assim a máquina a ter acesso a outras funções de impressão, como retração, ou variar o volume de extrusão durante uma impressão.

## Referências

- BALANI, S. et al. **Influence of printing parameters on the stability of deposited beads in fused filament fabrication of poly(lactic) acid.** Additive Manufacturing, v. 25, p. 112 – 121, 2019. ISSN 2214-8604.
- BELLINI, A.; SHOR, L.; GUCERI, S. I. **New developments in fused deposition modeling of ceramics.** Rapid Prototyping Journal, Emerald Group Publishing Limited, 2005.
- CHENG, X. M. et al. **The design of screw extrusion mechanism based on melted extrusion modeling.** In: TRANS TECH PUBL. Applied Mechanics and Materials. [S.l.], 2011. v. 44, p. 1455–1459
- Costa S.F., Duarte FM, Covas J.A. (2014) **Thermal conditions affecting heat transfer in FDM/FFE: a contribution towards the numerical modelling of the process.** Virt Phys Prototyp 10:1-12.
- Cunha DALV, Inforçatti Neto P, Micocci KC, Bellani CF, Araujo HSS, Silveira ZC, Branciforti MC (2019) **Fabrication and characterization of scaffolds of poly ( $\epsilon$ -caprolactone)/Biosilicate® biocomposites prepared by generative manufacturing process.** Int J Biomaterials 2019:1-11.
- Dávila JL, Freitas MS, Inforçatti Neto P, Silveira ZC, Silva JVL, D'Ávila MA (2016) **Fabrication of PCL/ $\beta$ -TCP scaffolds by 3D mini-screw extrusion printing.** J Appl Polym Sci 133(15):43031.
- Domingues N, Gaspar-Cunha A, Covas JA (2004) **Modelling of mixing in single screw extruders.** MSF, 514-516:1409-1413.
- Duty CE, Kunc V, Compton B, Post B, Erdman D, Smith R, Lind R, Lloyd P, Love L (2017) **Structure and mechanical behavior of BigArea Additive Manufacturing (BAAM) materials.** Rapid Prototyp J 23(1): 181–189.
- Guadagnini P. et al. **Um termômetro eletrônico de leitura direta com termistor.** Rev. Bras. Ensino Fís. 27 (3), Set 2005
- Gibson I, Rosen DW, Stucker B (2014) **Additive Manufacturing Technologies**, 2nd edition, Springer, Boston, MA.
- Gonzalez-Gutierrez J, Cano S, Schuschnigg S, Kukla C, Sapkota J, Holzer C (2018) **Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: a review and future perspectives.** Materials 11(5):840.
- HALIM, K. A.; FARRELL, J. B.; KENNEDY, J. E. **Optimisation of a twin screw extrusion process for enhanced short-term mechanical properties of polyamide 11 nanocomposites using design of experiment (doe) approach.** In: Conference paper, June. [S.l.: s.n.], 2012.
- Harris M, Potgieter J, Ray S, Archer R, Arif KM (2019) **Acrylonitrile butadiene styrene and polypropylene blend with enhanced thermal and mechanical properties for fused filament fabrication.** Materials 12(24):4167.
- HULL, C. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography.** 1986. US4575330
- ISO/ASTM (2017) ISO/ASTM 52900:2017-02 Additive manufacturing - general principles terminology.
- ISO/ASTM52921. **Standard Terminology for Additive Manufacturing - Coordinate Systems and Test Methodologies.** [S.l.], 2019
- Joaquim Manoel Justino Netto (2022) **Development of an innovative additive manufacturing equipment containing a corotating twin screw extrusion unit.**
- Joaquim Manoel Justino Netto, Amir Ilkiu Sarout, Andre Luiz Grando Santos, Alessandra de Almeida Lucas, Marcelo Aparecido Chinelatto, Jorge Lino Alves, António Gaspar-Cunha, José António Covas, Zilda de Castro Silveira (2022) **Design and validation of an innovative 3D printer containing a co-rotating twin screw extrusion unit.** Additive Manufacturing 59 (2022) 103192.

Justino Netto JM, Idogava HT, Frezzatto Santos LE, Silveira ZC, Romio P, Alves JL (2021) **Screw assisted 3D printing with granulated materials: a systematic review**. Int J Adv Manuf Technol.

Justino Netto JM, Silveira ZC (2018) **Design of an innovative three-dimensional print head based on twin-screw extrusion**. J Mech Design, 140:125002-125008

Justino Netto JM, Silveira ZC, Santos ALG, Lucas AA, Gaspar-Cunha A, Covas JA, Alves JL (2020) **Mini-extrusor de duplo fuso para aplicação em fabrico aditivo**. Tecnometal, Maio-Junho:4-11.

Kampker A, Triebs J, Kawollek S, Ayvaz P, Hohenstein S. (2019) **Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems**, Procedia CIRP, v. 81, p. 815-819.

Liu F, Hinduja S, Bartolo P (2017) **Design, fabrication and initial evaluation of a novel hybrid system for tissue engineering applications**. Proc CIRP 65:213-218.

Mingzhou Yin, Yue Chen, Kit-Hang Lee, Denny K.C. Fu, Zion Tsz Ho Tse, Ka-Wai Kwok, Member, IEEE (2018) **Dynamic Modeling and Characterization of the Core-XY Cartesian Motion System**. The 2018 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics

Moyer IE (2012) **CoreXY theory**. <http://corexy.com/theory.html>. Acesso em 05/11/2022.

Paulo H. Guadagnini, Vania E. Barlette (2005) **Um termômetro eletrônico de leitura direta com termistor**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 3, p. 369 - 375

Pazos F. **Automação de Sistemas e Robótica**, pag 141.

RAGAERT, K. et al. **Design and thermoregulation of a new microextrusion dispense head for 3d-plotting of thermally sensitive thermoplastics**. Polymer Engineering & Science, Wiley Online Library, v. 53, n. 2, p. 273–282, 2013.

RAUWENDAAL, C. **Polymer extrusion**. [S.l.]: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014.

Schmidt L, Schricker K, Bergmann JP, Hussenöder F, Eiber M (2018) **Characterization of a granulate-based strand deposition process in the FLM-method for definition of material-dependent process strategies**. Rapid Prototyp J 25(1):104–116.

Shigley J, Mischke C, Budynas R (2005) **Mechanical Engineering Design**. McGraw-Hill, USA.

SIDAMBE, A. T. **Biocompatibility of advanced manufactured titanium implants—a review**. Materials, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 12, p. 8168–8188, 2014.

SILVEIRA, Z. d. C. et al. **Design development and functional validation of an interchangeable head based on mini screw extrusion applied in an experimental desktop 3-d printer**. International Journal of Rapid Manufacturing, Inderscience Publishers Ltd, v. 4, n. 1, p. 49–65, 2014.

Singamneni S, Smith D, Le Guen MJ, Truong D (2018) **Extrusion 3D printing of polybutyrate-adipate-terephthalate-polymer composites in the pellet form**. Polymers 10(8):922.

SLIC3R - **Open source 3D printing toolbox**. 2011. Disponivel: Slic3r - Open source 3D printing toolbox.

Thompson MK, Moroni G, Vaneker T, Fadel G, Campbell I, Gibson I, Bernard A, Schulz J, Graf P, Ahuja B, Martina F (2016) **Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations and constraints**. CIRP Annals - Manuf Technol 65 (2):737-760.

THOMPSON, M. K. et al. **Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints**. CIRP annals, Elsevier, v. 65, n. 2, p. 737–760, 2016.

TORRADO, A. R., SHEMELYA, C. M., ENGLISH, J. D., LIN, Y., WICKER, R. B., ROBERSON, D. A. **Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing**. Additive Manufacturing, 6: 16-29. 2015.

TURNER, B. N., STRONG, R., GOLD, S. A. **A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modelling.** Rapid Prototyping Journal, 20/3: 192-204. 2014

VALKENAERS, H. et al. **A novel approach to additive manufacturing: screw extrusion 3d-printing.** In: RESEARCH PUBLISHING; SINGAPORE. Proceedings of the 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture. [S.l.], 2013. p. 235–238.

Volpato N, Kretschek D, Foggiatto JA, Gomez da Silva Cruz CM (2015) **Experimental analysis of an extrusion system for additive manufacturing based on polymer pellets.** Addit Manufac, 81(9-12):1519-1531.

VOLPATO, N. et al. **Experimental analysis of an extrusion system for additive manufacturing based on polymer pellets.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer, v. 81, n. 9-12, p. 1519–1531, 2015. WHITE, J. L.; POTENTE, H. Screw extrusion. [S.l.]: Hanser, Carl, 2012.

VOLPATO, Neri. **Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3d.** São Paulo: Blucher, 2017. 400 p.

Woern AL, Byard DJ, Oakley RB, Fiedler MJ, Snabes SL, Pearce JM (2018) **Fused particle fabrication 3-D printing: recycled materials' optimization and mechanical properties.** Materials 11(8): 1413.

Zhang P, Wang Z, Li J, Li X, Cheng L (2020) **From materials to devices using fused deposition modeling: A state-of-art review.** Nanotechnol Rev 9(1):1594–1609.

## Apêndice A – Código do sistema de extrusão (Arduino Uno)

Fonte: (Justino Netto et al., 2022)

```
1 #include "PWM.h"
2 // no uno os pinos sao: STEP 9 DIR 7 STEPa 3
3 #define MICROSTEP 13 //define o pino de alimentacao do MICROSTEP da impressao
4 //#define DIR 3
5 #define STEP 9 //define o pino de pulso do motor das roscas
6 #define DIR 7 //define o pino de pulso do motor das roscas
7 //#define DIRa 2
8 #define STEPa 3 //define o pino de pulso do motor do alimentador
9
10 // Variaveis globais auxiliares
11 float freq; //frequencia das roscas
12 float freqa; //frequencia do alimentador
13 float i; //contador da frequencia pra aceleracao e desaceleracao
14 float aux = 1333.3; //salva a frequencia atual das roscas
15 float rpm = 200; //salva a velocidade das roscas
16 float auxa = 0; //salva a frequencia atual do alimentador
17 float rpma = 0; //salva a velocidade do alimentador
18 String cmd_string; //salva o texto que foi inserido no
19 void ramp(float freq) //funcao de aceleracao e desaceleracao das roscas
20 {
21 if(aux < freq) //acelera as roscas
22 {
23 for(i=aux ; i<=freq ; i+=0.66) //3.33 em 1/2 microstep da precisao de 0,1
```

```
24 {  
25 SetPinFrequencySafe(STEP,i); //seta a frequencia das roscas  
26 pwmWrite(STEP,128); //envia o pwm setado pras roscas com 1/2 duty cicle  
27 Serial.print("ROSCAS = "); //escreve na serial  
28 Serial.println(i*60/400, 1); //escreve na serial o valor do rpm pra a frequênci instantanea  
29 delay(20); //delay para controlar a aceleracao e o motor nao perder passo  
30 }  
31 }  
32 if(aux > freq) //desacelera as roscas  
33 {  
34 for(i = aux ; i>=freq ; i-=0.66) //3.33 em 1/2 microstep da precisao de 0,1  
35 {  
36 SetPinFrequencySafe(STEP,i); //seta a frequencia das roscas  
37 pwmWrite(STEP,128); //envia o pwm setado pras roscas com 1/2 duty cicle  
38 Serial.print("ROSCAS = "); //escreve na serial  
39 Serial.println(i*60/400, 1); //escreve na serial o valor do rpm pra a frequênci instantanea  
40 delay(20); //delay para controlar a desaceleracao e o motor nao perder passo  
41 }  
42 }  
43 aux = freq; //salva a frequncia atual das roscas  
44 }  
45 void ramp2(float freqa) //funcao de aceleracao e desaceleracao do alimentador  
46 {  
47 if(auxa < freqa) //acelera o alimentador  
48 {  
49 for(i=auxa ; i<=freqa ; i+=2.66) //2.66 em 1/16 microstep da precisao de 0,05
```

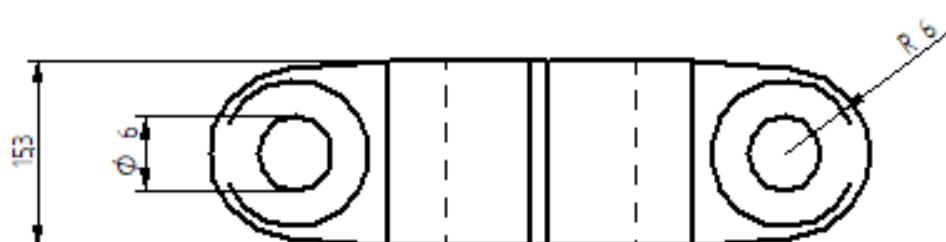
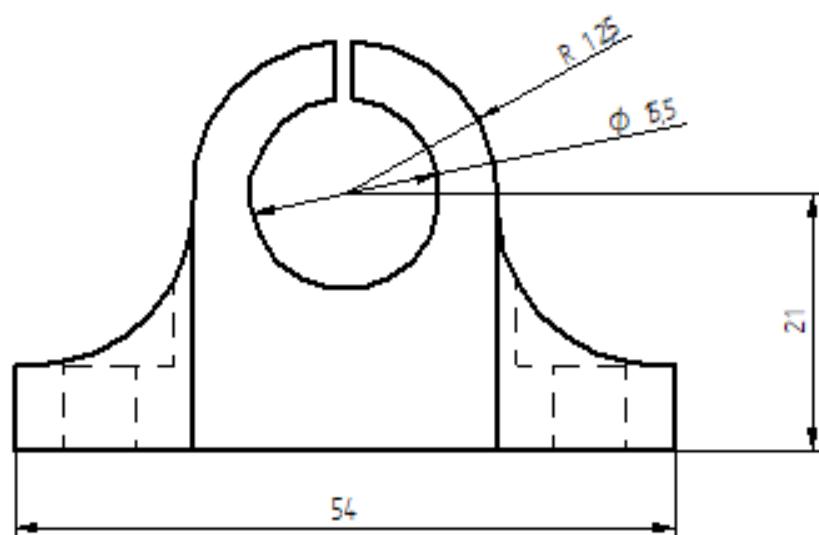
```
50 {
51 SetPinFrequencySafe(STEPa,i); //seta a frequencia do alimentador
52 pwmWrite(STEPa,128); //envia o pwm setado pro alimentador com 1/2 duty cicle
53 Serial.print("ALIMENTADOR = "); //escreve na serial
54 Serial.println(i*60/3200); //escreve na serial o valor do rpm pra a frequênci instantanea
55 delay(10); //delay para controlar a aceleracao e o motor nao perder passo
56 }
57 }
58 if(auxa > freqa)
59 {
60 for(i = auxa ; i>=freqa ; i-=2.66) //2.66 em 1/16 microstep da precisao de 0,05
61 {
62 SetPinFrequencySafe(STEPa,i); //seta a frequencia do alimentador
63 pwmWrite(STEPa,128); //envia o pwm setado pro alimentador com 1/2 duty cicle
64 Serial.print("ALIMENTADOR = "); //escreve na serial
65 Serial.println(i*60/3200); //escreve na serial o valor do rpm pra a frequênci instantanea
66 delay(5); //delay para controlar a aceleracao e o motor nao perder passo
67 }
68 }
69 auxa = freqa; //salva a frequencia atual do alimentador
70 }
71 void setup() //funcao de setup das portas e roda 1 vez assim que o arduino e ligado
72 {
73 InitTimersSafe(); //inicializa os timers
74 pinMode(MICROSTEP,OUTPUT); //seta a porta do MICROSTEP como saida
75 digitalWrite(MICROSTEP,HIGH); //seta 5V na saida do MICROSTEP
```

```
76 //SET das portas do Driver  
77 pinMode(DIR,OUTPUT); //seta a porta de dir como saida  
78 pinMode(STEP,OUTPUT); //seta a porta de step do motor das roscas como saida  
79 // pinMode(DIRa,OUTPUT);  
80 pinMode(STEPa,OUTPUT); //seta a porta de step do motor do alimentador como saida  
81 // Definindo os niveis logicos das portas do Driver  
82 digitalWrite(DIR,HIGH); //Direção do motor: HIGH = CW ; LOW = CCW  
83 // digitalWrite(DIRa,HIGH);  
84 Serial.begin(9600); //liga a porta serial  
85 Serial.println("Inicializando..."); //escreve na serial  
86 for(freq=0 ; freq<=1333.3 ; freq+=3.33) //acelera as roscas ate 200 rpm  
87 {  
88 SetPinFrequencySafe(STEP,freq); //seta a frequencia das roscas  
89 pwmWrite(STEP,128); //envia o pwm setado pras roscas com 1/2 duty cicle  
90 delay(10); //delay para controlar a aceleracao e o motor nao perder passo  
91 }  
92 Serial.println("Pronto."); //escreve na serial  
93 }  
94 void loop() //funcao de loop que o arduino ira rodar em loop infinitamente apos rodar  
a setup  
95 {  
96 if(Serial.available() > 0) // Verifica e aguarda algum input na Serial  
97 {  
98 cmd_string = Serial.readString(); //salva o texto escrito na porta serial  
99 if ((cmd_string[0] == 'R') || (cmd_string[0] == 'r')) //verifica se a primeira letra escrita na serial e "R" ou "r"  
100 {
```

```
101 Serial.println("ROSCAS ROSCAS ROSCAS ROSCAS ROSCAS ROSCAS  
ROSCAS ROSCAS ROSCAS ROSCAS ROSCAS"); //escreve na serial  
  
102 cmd_string.remove(0,1); //apaga a letra da serial (para sobrar somente os números)  
  
103 if(cmd_string.toInt() > 0) //verifica se o valor escrito foi maior que 0  
  
104 {  
  
105 freq = cmd_string.toFloat()*400/60; // Conversao de valor RPM para frequenica para o Driver em 1/2  
microstep  
  
106 ramp(freq); // Rotina de rampa de aceleração ou desaceleração do motor das roscas  
  
107 }  
  
108 else //caso o valor escrito foi 0  
  
109 {  
  
110 digitalWrite(STEP, LOW); //seta a porta de pulso para 0V (portanto nao mandando nenhum pulso)  
  
111 aux = 0; //salva a frequencia pra 0 das roscas  
  
112 freq = 0;  
  
113 }  
  
114 }  
  
115 if ((cmd_string[0] == 'A') || (cmd_string[0] == 'a')) //verifica se a primeira letra escrita na serial e "A" ou  
"a"  
  
116 {  
  
117 Serial.println("ALIMENTADOR ALIMENTADOR ALIMENTADOR  
ALIMENTADOR ALIMENTADOR ALIMENTADOR"); //escreve na serial  
  
118 cmd_string.remove(0,1); //apaga a letra da serial (para sobrar somente os números)  
  
119 if(cmd_string.toInt() > 0) //verifica se o valor escrito foi maior que 0  
  
120 {  
  
121 freqa = cmd_string.toFloat()*3200/60; // Conversão de valor RPM para frequenica  
para o Driver
```

```
122 ramp2(freqa); // Rotina de rampa de aceleração ou desaceleração do motor
123 }
124 else //caso o valor escrito foi 0
125 {
126 digitalWrite(STEPa, LOW); //seta a porta de pulso para 0V (portanto nao mandando nenhum pulso)
127 auxa = 0; //salva a frequencia pra 0 do alimentador
128 freqa = 0;
129 }
130 }
131 }
132 rpm = freq*60/400; //calcula o rpm das roscas
133 rpma = freqa*60/3200; //calcula o rpm do alimentador
134 Serial.print("ROSCAS = "); //escreve na serial
135 Serial.print(rpm, 1); //escreve na serial o rpm das roscas com 1 casa decimal
136 Serial.print(" ALIMENTADOR = "); //escreve na serial
137 Serial.println(rpma); //escreve na serial o rpm do alimentador
138 }
```

## Apêndice B – Dimensões básicas das peças impressas.



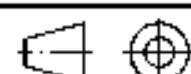
EESC • USP

Título: Encaixe rolamento linear

Material: PLA

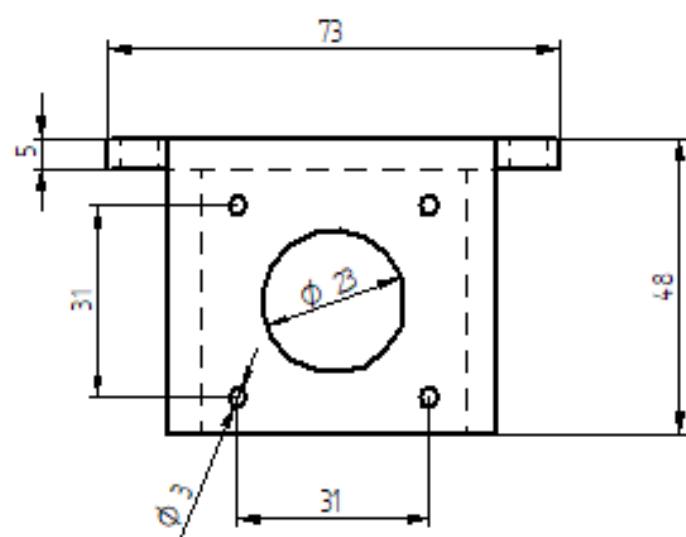
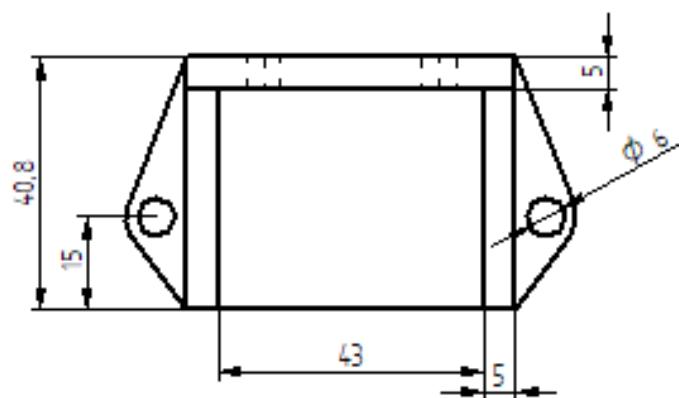
Autor: Amir Ilkiu Sarout

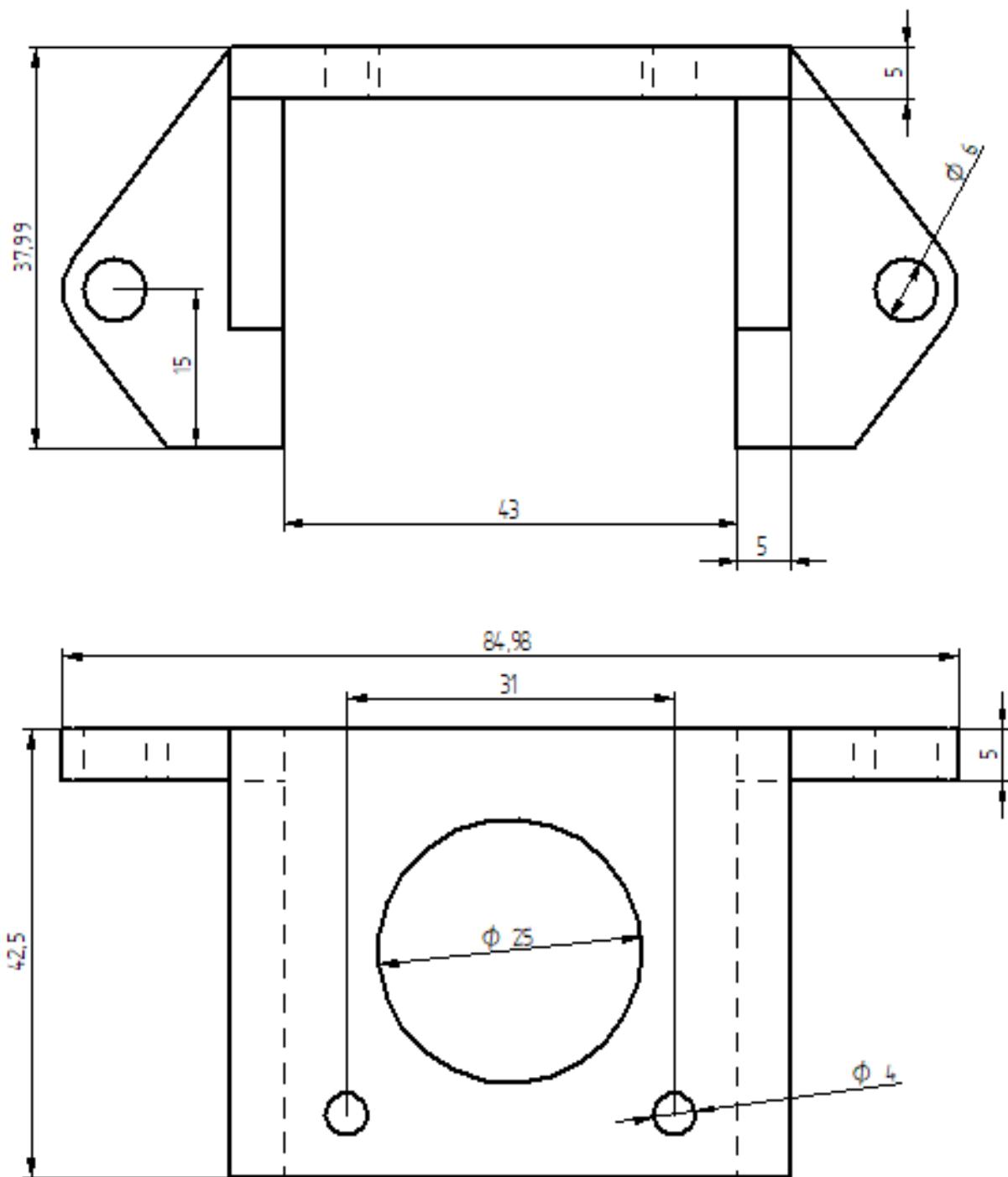
Quant: 4 un

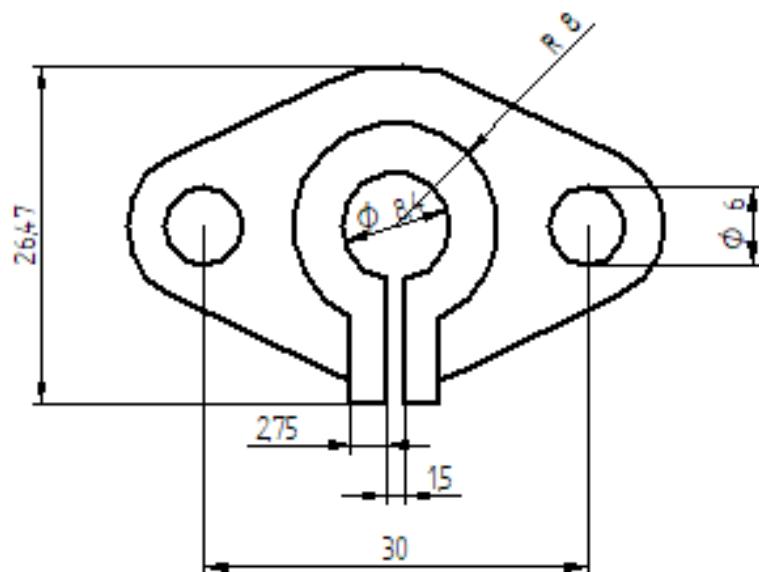
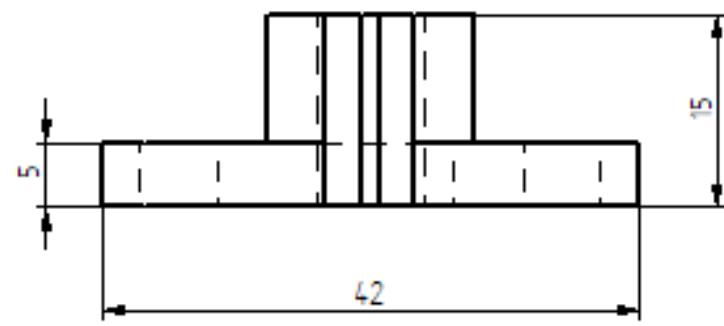


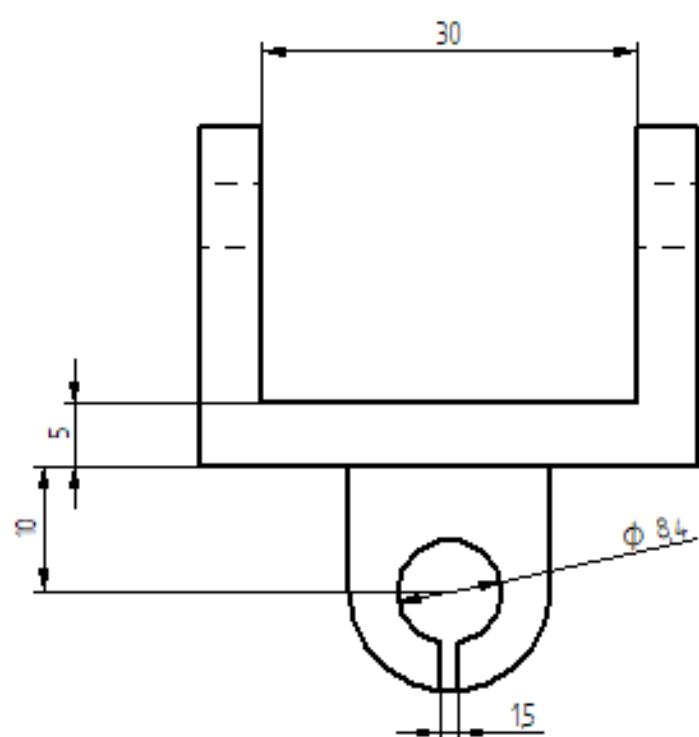
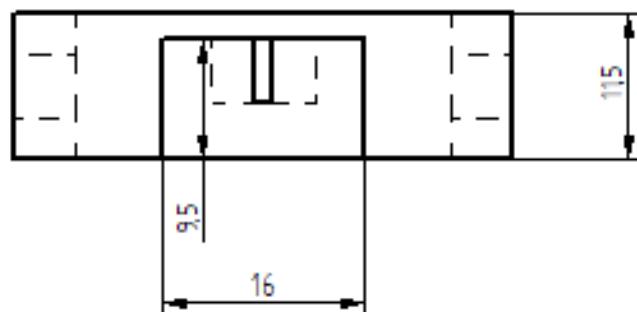
Data: 06/02/23

Esc. 1:1

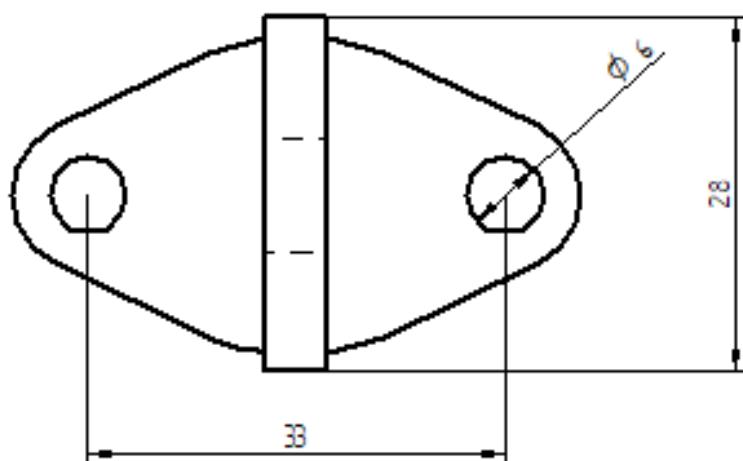
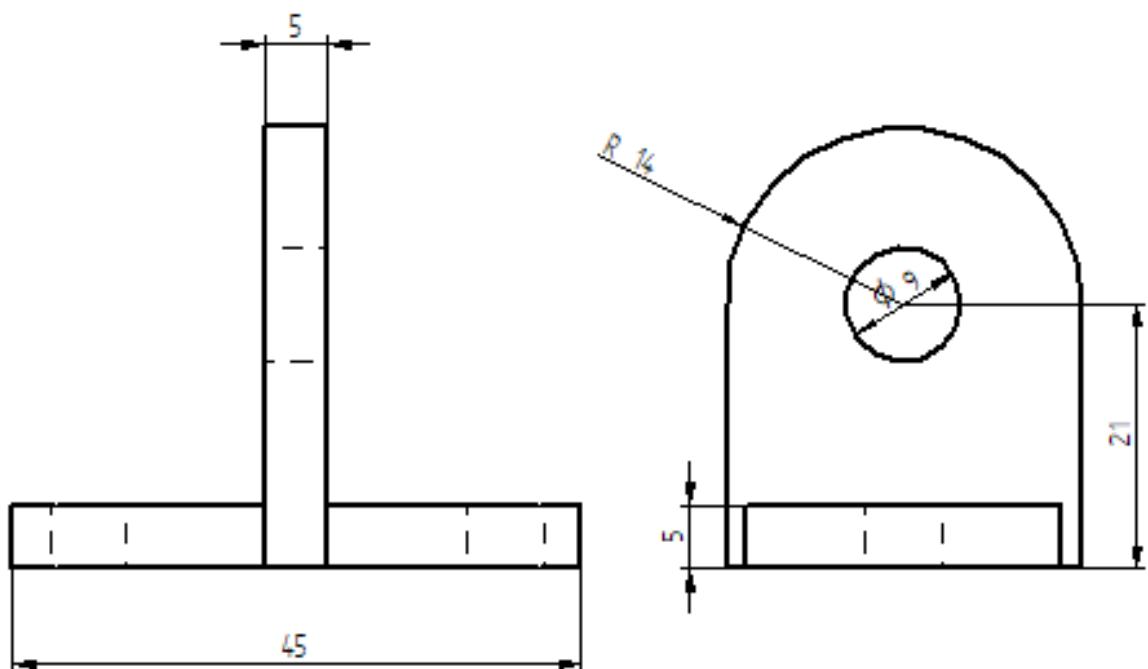




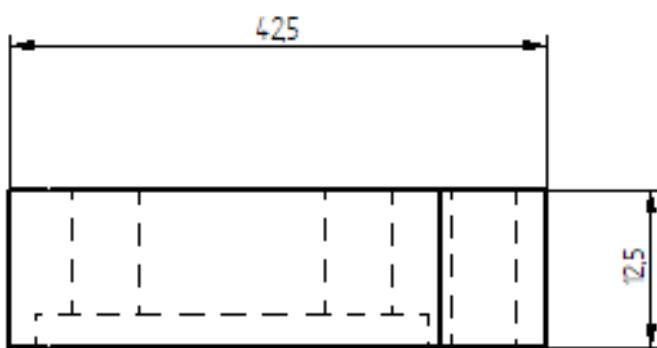
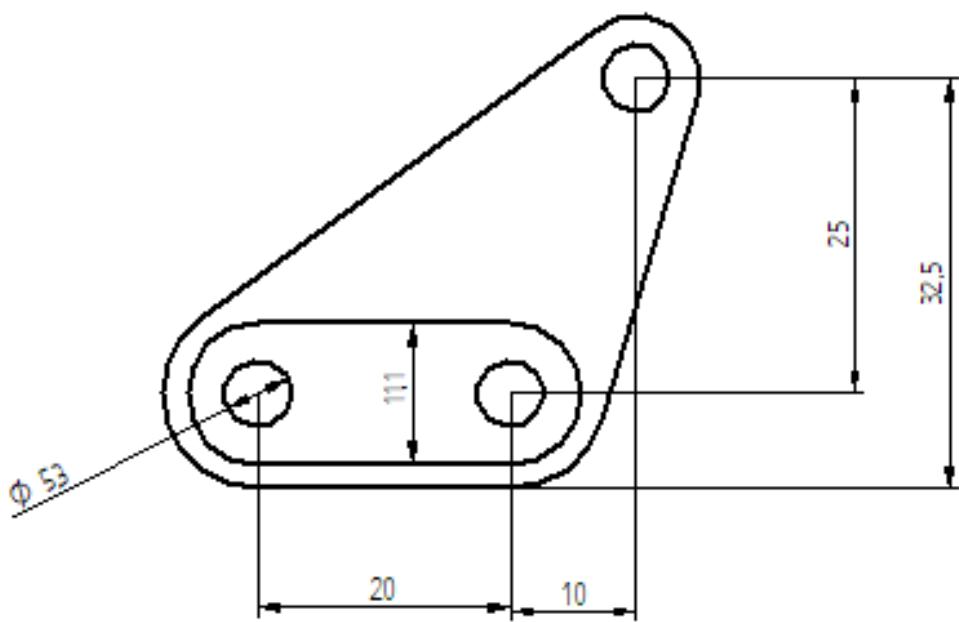




 EESC • USP	Título: Suporte superior Guia linear Material: PLA Autor: Amir Ilkiu Sarout	 
	Quant: 4 un	Data: 07/02/23 Esc. 21



 EESC • USP	Título: Suporte superior do fuso	 
Material: PLA	Quant: 2 un	Data: 07/02/23
Autor: Amir Ilkiu Sarout		Esc. 21



Título: Suporte rolamento da coluna



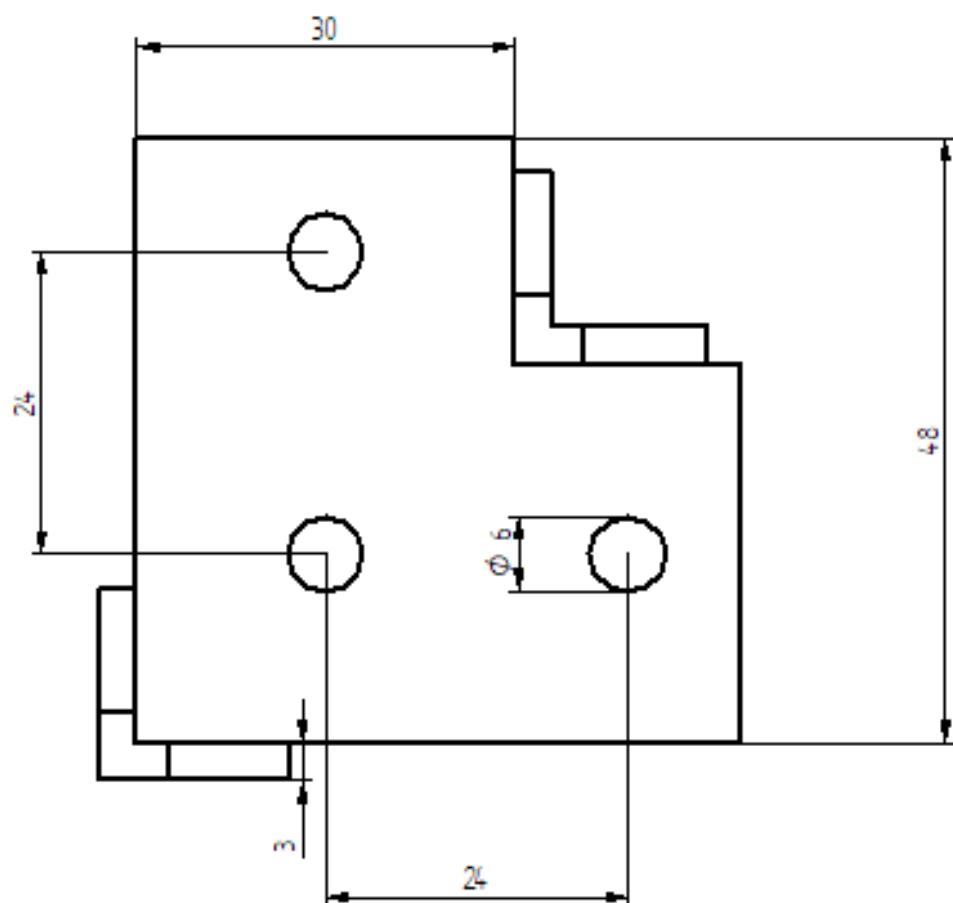
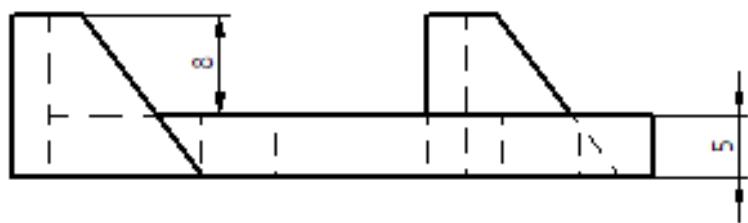
Material: PLA

Quant: 4 un

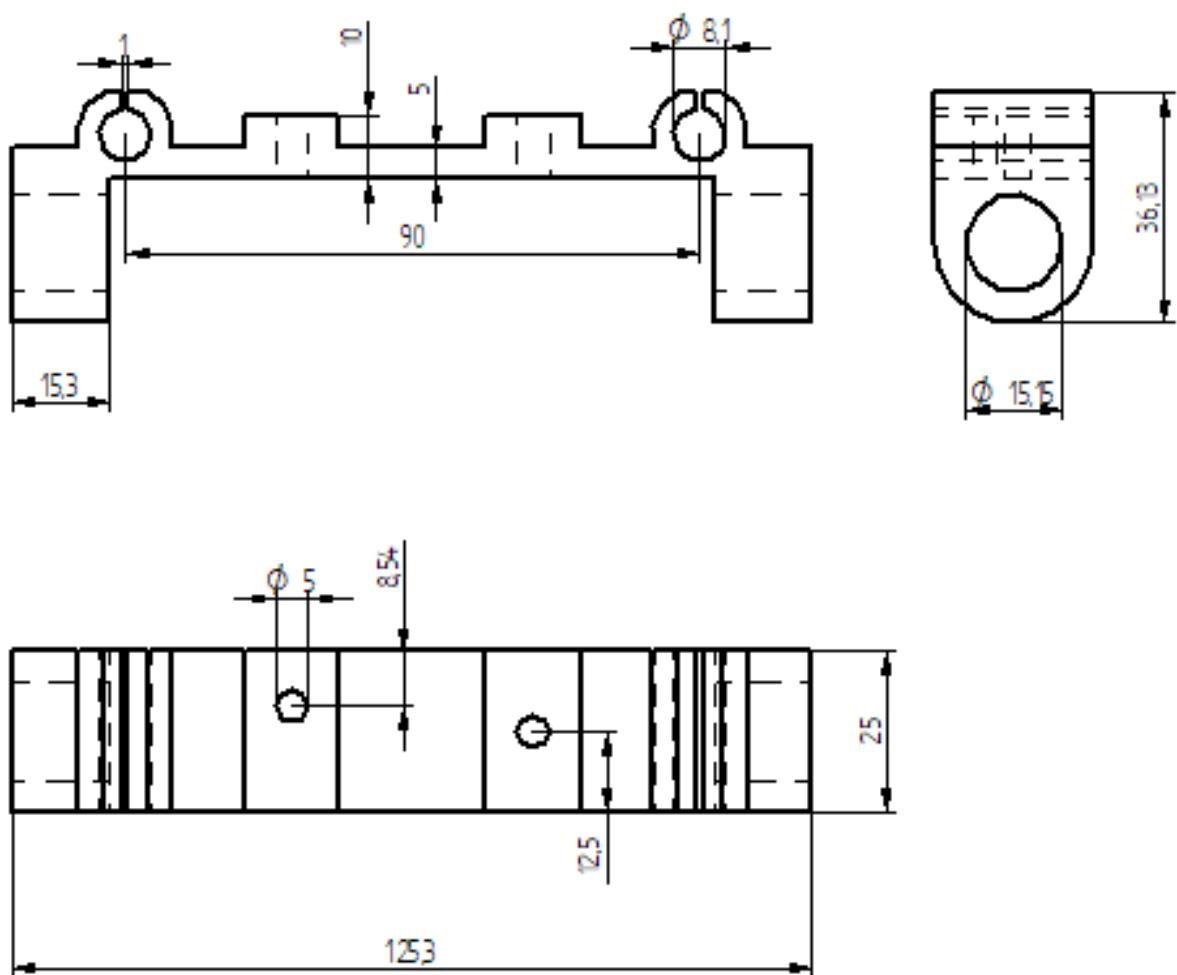
Data: 07/02/23

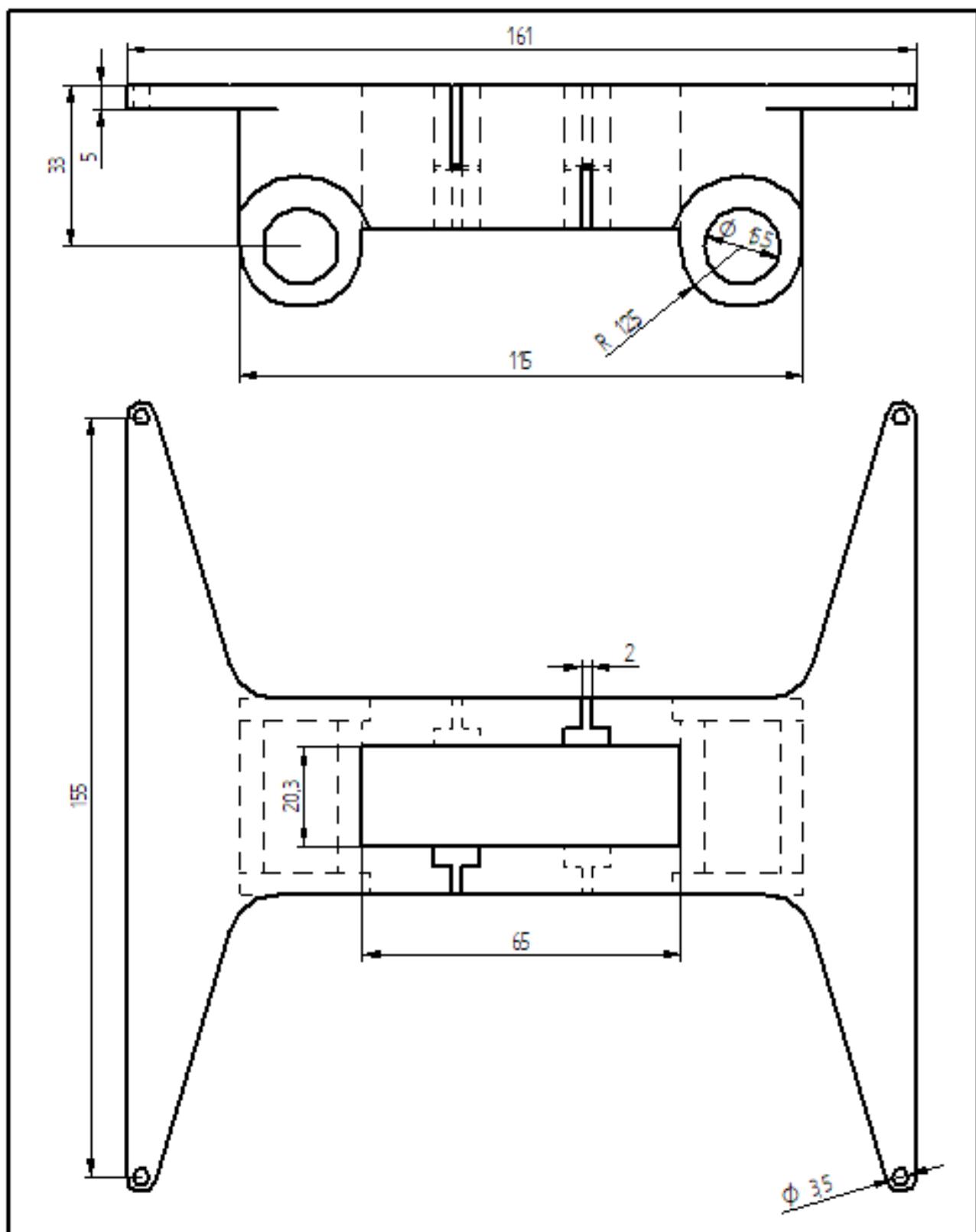
Autor: Amir Ilkiu Sarout

Esc. 21



 EESC - USP	Título: Fixador da mesa core XY	 
Material: PLA	Quant: 4 un	Data: 07/02/23
Autor: Amir Ilkiu Sarout		Esc. 21





 EESC • USP	<b>Titulo:</b> Base da mesa	 
	<b>Material:</b> PLA	<b>Quant:</b> 1 un
	<b>Autor:</b> Amir Ilkiu Sarout	<b>Data:</b> 07/02/23

