

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS EXATAS
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

FELIPE SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA IMPRESSORA 3D DO TIPO FFF COM
SISTEMA MULTIMATERIAL E MULTIFERRAMENTA**

UBERABA

2022

FELIPE SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA IMPRESSORA 3D DO TIPO FFF COM
SISTEMA MULTIMATERIAL E MULTIFERRAMENTA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Inovação Tecnológica, área de concentração em processos tecnológicos.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Massao Shimano.

Coorientador: Prof. Dr. Vinícius Abrão da Silva Marques.

UBERABA

2022

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

S58d Silva, Felipe
Desenvolvimento de uma impressora 3D do tipo FFF com sistema
multimaterial e multiferramenta / Felipe Silva. -- 2022.
53 p. : il., tab.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) --
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2022
Orientador: Prof. Dr. Marcos Massao Shimano
Coorientador: Prof. Dr. Vinícius Abrão da Silva Marques

1. Impressoras (Computadores). 2. Máquinas - Indústria. 3. Indústria
manufatureira. 4. Engenharia Mecânica. I. Shimano, Marcos Massao.
II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 681.62

FELIPE SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UMA IMPRESSORA 3D DO TIPO FFF COM SISTEMA MULTIMATERIAL E MULTIFERRAMENTA,

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito parcial para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 21 de fevereiro de 2022

Banca Examinadora:

Dr. Marcos Massao Shimano – Orientador
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Tobias Anderson Guimarães
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Gustavo Finholdt
Instituto Federal do Triângulo Mineiro



Documento assinado eletronicamente por MARCOS MASSAO SHIMANO, Professor do Magistério Superior, em 21/02/2022, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 87, de 17 de agosto de 2021](#).



Documento assinado eletronicamente por TOBIAS ANDERSON GUIMARAES, Professor do Magistério Superior, em 21/02/2022, às 19:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 87, de 17 de agosto de 2021](#).



Documento assinado eletronicamente por Gustavo Finholdt, Usuário Externo, em 23/02/2022, às 10:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 87, de 17 de agosto de 2021](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 0688119 e o código CRC D27CC657.

DEDICATÓRIA

Dedico aos meu pais, Aguinaldo Rodrigues da Silva e Neila Fátima Telles Silva, que sempre dedicaram seus esforços a me ensinar os valores dos estudos durante toda minha vida. Agradeço à força de minha mãe e à paciência de meu pai, características estas que somadas me ajudaram a chegar onde estou hoje.

À minha irmã Natacha Silva, que me serviu de exemplo de coragem e resiliência em seus próprios estudos de mestrado e doutorado, demonstrando pra mim reais valores que levo para minha vida.

À minha noiva Larissa Andreza Sicchieri, que em tempos difíceis esteve ao meu lado me incentivando e me dando forças para seguir no processo de desenvolvimento desta tese durante estes dois longos anos de pandemia.

Ao meu amigo Edmilson Henrique Marcílio de Paula, que mesmo não sabendo foi minha inspiração no final desta jornada de pós-graduação, quando em sua própria batalha de MBA demonstrou força e coragem para finalizar com excelência seu projeto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Massao Shimano e meu coorientador Prof. Dr. Vinícius Abrão da Silva Marques por terem aceitado dividir esta jornada comigo e por agregarem seu vasto conhecimento para que este trabalho pudesse ser finalizado com excelência.

Agradeço por todo o suporte prestado pela empresa Astro Science Pesquisa e Desenvolvimento S.A., que forneceu as ferramentas necessárias tanto para a concepção do projeto 3D quanto para a construção da impressora 3D.

Agradeço à Universidade Federal do Triângulo Mineiro e ao Governo Federal pela oportunidade disponibilizada através do edital de Mestrado em Inovação Tecnológica que participei. É através de iniciativas assim que eu e muitos outros alunos podem se desenvolver pessoal e profissionalmente, contribuindo para uma sociedade melhor.

RESUMO

O processo de manufatura aditiva FFF (fabricação por filamento fundido), ou FDM[®] (modelagem por fusão e deposição), se tornou bastante difundido devido ao baixo custo de insumos e de maquinários provenientes da manufatura chinesa após a queda da patente envolvendo esta tecnologia no ano de 2009. A impressão 3D FFF é uma das poucas técnicas que oferece a capacidade de manufatura aditiva com múltiplos materiais, porém, devido a problemas frequentes nos processos comerciais atuais, a adesão do grande público à esta tecnologia ainda é incipiente. Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma impressora 3D capaz de imprimir múltiplos materiais num só processo através de um sistema multiferramentas a fim de endereçar problemas comuns das máquinas do mercado atual. Para isto, foi criada uma Estrutura Analítica de Projeto (EAP) que facilitou a criação do planejamento digital da máquina e a sua construção. Posteriormente, foram feitos alguns processos de validação dos conceitos implementados e um estudo estatístico para comprovar a repetibilidade do sistema de troca de ferramentas criado. Como resultado foram encontradas diferenças máximas de posicionamento entre as ferramentas da ordem de 0,013 milímetros, sendo um valor satisfatório para o processo criado. Os testes de impressão 3D multiferramentas / multimaterial comprovaram que o projeto funcionou de forma categórica, abrindo opções para que, com a mesma metodologia, se possa agregar mais ferramentas ao maquinário, seja de manufatura aditiva ou de outros processos como corte a laser, usinagem, etc.

Palavras-chave: Impressão 3D, Manufatura Aditiva, multimaterial, multiferramenta, FFF, FDM.

ABSTRACT

The FFF (or FDM[®]) additive manufacturing process has become widespread due to the low cost of machinery and materials from Chinese manufacturing after the patent expired in 2009. FFF 3D printing is one of the few techniques that offers the capability of additive manufacture with multiple materials, however, due to frequent problems in current commercial processes, the adhesion to this technology is still in its beginning. This work aimed to develop a 3D printer capable of printing multiple materials in a single process through a multi-tool system to address common problems on the current market machines. To do that, a Work Breakdown Structure (WBS) was created, which helped the machine's digital planning and construction. Subsequently, some validation processes were carried out to validate the implemented concepts. In addition, a statistical study was made to evaluate the repeatability of the tool change system created. As a result, maximum positioning offsets between the tools were 0.013 millimeters, which is a suitable value for the created process. The multi-tool / multi-material 3D printing tests proved that the intended design worked great, opening options so that, with the same methodology, more tools can be added to the machinery, whether additive manufacturing or other processes such as laser cutting, machining, etc.

Key-words: 3D Print, Additive Manufacture, multi-material, multi-tool, FFF, FDM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Marcas de suporte em peça impressa em 3D.	16
Figura 2 – Prusa Mendel I3	18
Figura 3 – Ilustração do processo FFF	19
Figura 4 – Extrusão tipo Bowden.....	20
Figura 5 – Extrusão tipo Direct Drive	21
Figura 6 - Extrusão tipo Direta Remota	21
Figura 7 – Placa eletrônica Duet Wifi.	22
Figura 8 – Fórmula química do PLA.....	23
Figura 9 – Fórmula química do ABS	23
Figura 10 – Torre de expurgo ao lado de um modelo impresso em 3D.	24
Figura 11 – Característica indesejável na superfície da peça impressa em 3D à direita.	25
Figura 12 – Impressora 3D que utiliza sistema de multimateriais e multiferramentas <i>Tool Changer</i> - E3D®.....	26
Figura 13 – Acoplamento cinemático de Maxwell.....	27
Figura 14 – Estrutura Analítica de Projeto (EAP) para o desenvolvimento de uma impressora multimaterial/multiferramentas	29
Figura 15 – Projeto digital da estrutura da impressora.....	30
Figura 16 – Sistema de movimentação COREXY projetado para os eixos X e Y da impressora	31
Figura 17 – Sistema XY montado na impressora.....	31
Figura 18 – Vista inferior do sistema de movimentação Z utilizando 3 eixos independentes.....	32
Figura 19 – Eixo de movimentação Z.	33
Figura 20 – Sistema de movimentação Z montado na estrutura da impressora.	33
Figura 21 – Projeto do carro de movimentação XY.....	34
Figura 22 – Ferramenta de impressão projetada do tipo Bowden.....	35
Figura 23 – Ferramenta de impressão projetada do tipo EDR.	35
Figura 24 – Ferramentas posicionadas nas docas.....	36
Figura 25 – Ferramentas de impressão com detalhe para o sistema de acoplamento. A- Ferramenta do tipo Bowden. B-Ferramenta do tipo EDR.....	36
Figura 26 – Placa controladora Duet 2 Wifi e suas funções.....	37
Figura 27 – Placa de expansão DueX5 conectada à placa controladora.	38
Figura 28 – Montagem final da impressora.....	39

Figura 29 – Configurações de Firmware	41
Figura 30 – Mapa topográfico da cama de impressão.....	42
Figura 31 – Posicionamento do relógio comparador para coleta de dados	43
Figura 32 - Código GCODE criado para verificar a repetibilidade da troca de ferramentas ..	44
Figura 33 – Ferramenta com desvio no eixo Z.....	46
Figura 34 – Modelo 3D da escala vernier.	47
Figura 35 – Teste de impressão para alinhamento das ferramentas nos eixos X e Y. A- Ferramentas desalinhas. B-Ferramentas alinhadas.....	47
Figura 36 – Peças impressas em PLA. Azul-Ferramenta do tipo <i>bowden</i> . Marrom-Ferramenta do tipo EDR.....	48
Figura 37 – Impressão utilizando o mesmo material nas duas ferramentas.	49
Figura 38 – Peça impressa utilizando materiais diferentes nas duas ferramentas.	50
Figura 39 – Peça impressa com dois materiais distintos (A) e com o mesmo material (B)...	50
Figura 40 – Cubo de Hilbert impresso utilizando dois materiais diferentes.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno
- COREXY – Tipo de movimentação cartesiana automatizada
- CNC – Controle Numérico Computacional
- E3D – Empresa europeia do ramo de manufatura aditiva
- EAP – Estrutura Analítica de Projetos
- EDR – Extrusão Direta Remota
- FDM – Modelagem por Fusão e Deposição
- FFF – Fabricação por Filamento Fundido
- GCODE – Código de programação computacional
- HIPS – Poliestireno de alto impacto
- PCB – Placa de circuito impresso
- PEEK – Poliéter Éter Cetona
- PETG – Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol
- PLA – Ácido Polilático
- REPRAP – Protótipo de Rápida Replicação
- SLA – Aparato de Estereolitografia
- SLS – Sinterização Seletiva a Laser

LISTA DE SÍMBOLOS

® - Marca registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	Objetivo geral.....	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Impressora 3D do tipo FFF	18
3.2	Materiais mais utilizados na impressão 3D FFF	22
3.3	Impressoras multimateriais	24
3.4	Impressoras multiferramentas	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1	Primeira etapa.....	28
4.1.1	Mecânica	30
4.1.2	Eletrônica	37
4.2	Segunda etapa.....	42
4.2.1	Auto nivelamento da cama de impressão.....	42
4.2.2	Repetibilidade da troca de ferramentas	43
4.2.3	Alinhamento entre ferramentas	45
4.2.4	Validações de impressão 3D	47
5	CONCLUSÃO	52
6	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (comumente conhecida por impressão 3D), apesar de ter sido criada na década de 1980, começou a ser amplamente utilizada apenas a partir do ano de 2010, devido à queda das principais patentes do ramo. Existem vários tipos de impressão 3D (fabricação por filamento fundido – FFF; estereolitografia – SLA; sinterização seletiva a laser – SLS; etc.), e a tecnologia mais difundida mundialmente é a FFF, em virtude principalmente do movimento REPRAP, que idealizou um projeto de baixo custo com a utilização de softwares livres (MAXIMIANO, 2015). Tal tecnologia foi criada pela empresa israelense Stratasys[®] sob o termo patenteado FDM[®] (modelagem por fusão e deposição, em tradução livre), que pouco antes de se tornar domínio público foi registrado como marca sob o número serial 74133656 (TRADEMARKIA, 2021).

Fácil acesso a partes mecânicas e eletrônicas, baixo custo de matéria prima, fácil manutenção e maquinário acessível proveniente da manufatura chinesa são as principais características que ajudaram na dispersão das impressoras 3D tipo FFF. Esta técnica de manufatura aditiva é utilizada em aplicações industriais tais como: prototipagem rápida; criação de máquinas-ferramenta; produção de peças descontinuadas por fabricantes; e produção de lotes piloto ou pequenos lotes que não justificam a concepção de moldes de injeção.

Infelizmente, as máquinas mais acessíveis do mercado trazem algumas limitações na produção de peças com geometrias complexas, necessitando da utilização de suportes em sua concepção, o que na maioria dos casos fragiliza e/ou deixa marcas indesejáveis na superfície da peça impressa (Figura 1), devido à utilização de suportes com mesmo material do objeto.

Figura 1 – Marcas de suporte em uma peça impressa em 3D.



Fonte: Adaptado de SIMPLIFY3D (2021)

Uma impressora 3D capaz de imprimir dois ou mais tipos de material no mesmo processo pode disponibilizar a utilização de material solúvel capaz de eliminar o problema proposto anteriormente. Além disso, tal maquinário pode criar peças coloridas e com características mecânicas diferenciadas, ampliando ainda mais as aplicações desta tecnologia.

Outra possibilidade seria agregar processos de fabricação além da manufatura aditiva, como por exemplo corte e gravação à laser, posicionadores *pick and place*, ferramentas de pintura e por fim usinagem, sendo que este último traria a possibilidade de desbaste de material, o que poderia melhorar o acabamento superficial das peças impressas e adicionar tolerâncias dimensionais superiores ao processo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver uma impressora 3D com capacidade para trabalhar com duas ferramentas (cabeçotes) separadamente, para ampliar a gama de aplicações da tecnologia de impressão 3D FFF.

2.2 Objetivos específicos

- Utilizar um sistema de movimentação COREXY para dividir os esforços de movimentação igualmente nos motores de passo e possibilitar impressões com velocidades acima das convencionais;
- Utilizar auto nivelamento da cama de impressão para evitar possíveis erros no processo de impressão;
- Utilizar no mínimo duas ferramentas distintas de impressão;
- Validar o processo multimaterial / multiferramentas por meio de testes de repetibilidade e impressão de peças com características complexas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apesar de existirem muitas tecnologias de impressão 3D, a mais difundida até o presente momento é a Fabricação por Filamento Fundido (FFF); uma vez que sua dinâmica oferece uma das técnicas mais baratas de se formar peças tridimensionais, contando ainda com uma extensa comunidade de pesquisadores e usuários que disponibilizam de softwares gratuitos para expandir suas aplicações (BOULAALA, 2020). O movimento REPRAP (protótipo rápido de replicação, em tradução livre), criado em 2004 por Adrian Bowyer na Universidade de Bath (Reino Unido), foi o principal responsável pela disseminação da impressão 3D como tecnologia acessível ao público entusiasta, sendo responsável, dentre muitos projetos, pela criação do estilo Prusa Mendel I3 (Figura 2). Este projeto atualmente é replicado pela grande maioria das empresas mundiais de manufatura de impressoras 3D, por ser de fácil construção e manutenção.

Figura 2 – Impressora 3D do tipo FDM do estilo Prusa Mendel I3



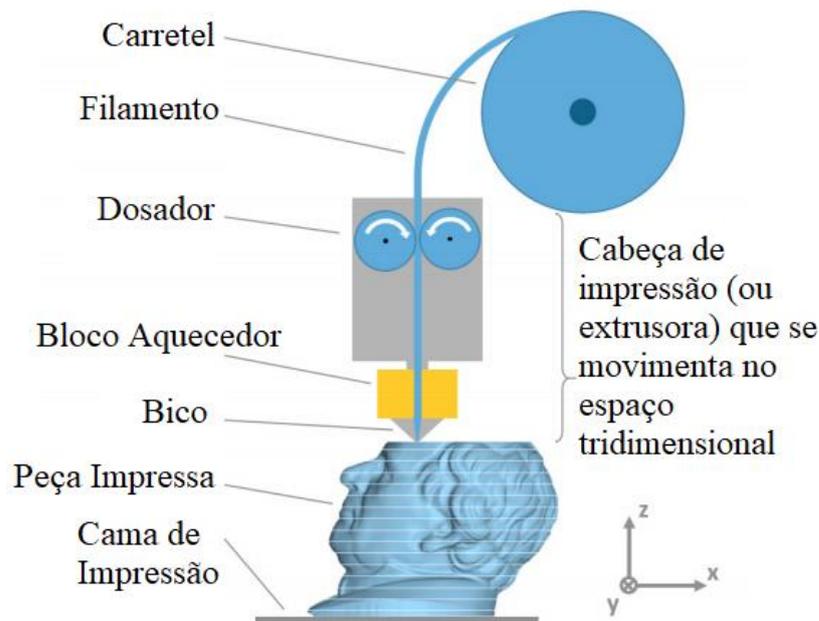
Fonte: Adaptado de REPRAP (2021)

3.1 Impressora 3D do tipo FFF

De maneira simplificada, esta tecnologia cria objetos através da extrusão de um filamento termoplástico que, ao passar por um bico aquecido é depositado camada por camada

até que a peça seja formada (Figura 3). Porém, a maioria das máquinas acessíveis no mercado atual oferecem a possibilidade de se trabalhar com apenas um único material, o que limita certas possibilidades de aplicação como por exemplo impressão de peças com geometria complexa, peças coloridas ou ainda peças com características mecânicas específicas. Desta forma, uma máquina de manufatura aditiva capaz de imprimir dois ou mais materiais no mesmo processo conseguiria solucionar tais problemas.

Figura 3 – Ilustração do processo FFF



Fonte: adaptado de LOFFLER (2019)

Estas impressoras são constituídas basicamente por uma estrutura rígida, onde são adaptados 4 sistemas principais:

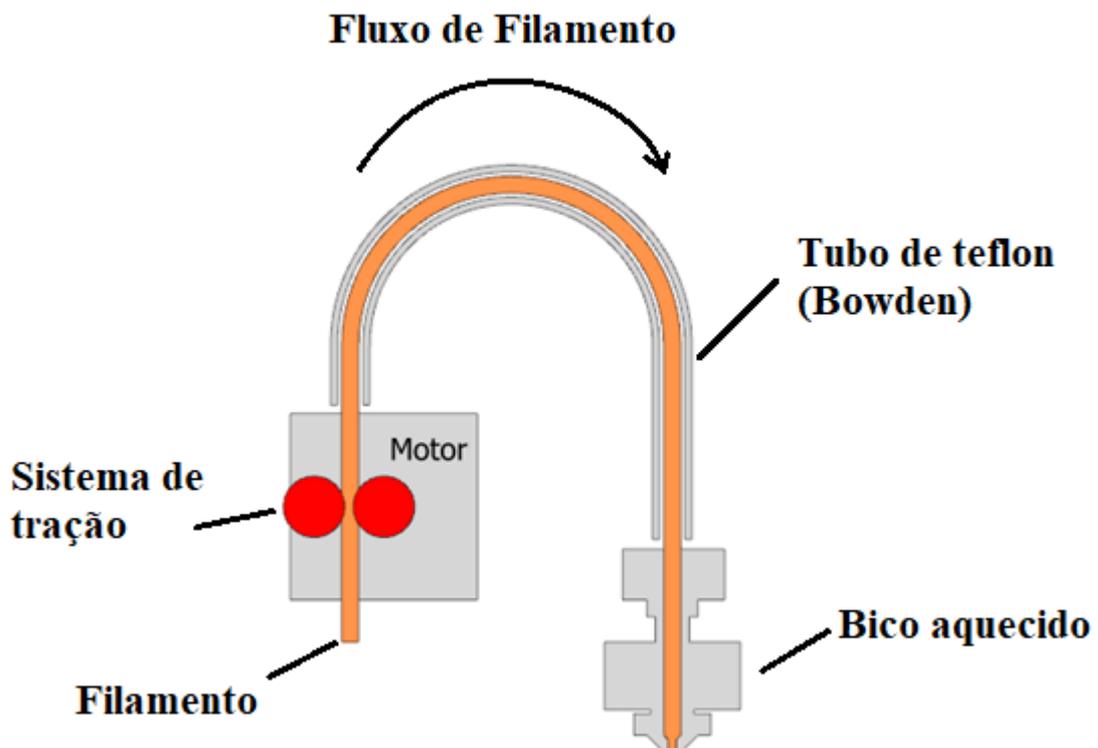
1. Sistemas de aquecimento;
2. Sistemas de extrusão;
3. Sistema de movimentação em 3 coordenadas e
4. Sistema de controle eletrônico.

Os sistemas de aquecimento podem ser divididos em três: bloco aquecedor, cama de impressão e câmara de impressão. O bloco aquecedor utiliza um cartucho aquecedor tipo resistência elétrica para transferir calor ao filamento termoplástico (matéria prima do processo FFF) e assim conceber a peça tridimensional. Já a cama de impressão geralmente é uma placa PCB por onde se passa corrente elétrica que é transformada em calor, garantindo que a base da

peça impressa não sofra deformações durante o processo de impressão 3D. Algumas máquinas também possuem ambiente interno de temperatura controlada, para trabalhar com materiais de alto índice de contração, onde a temperatura ambiente é controlada através de sistemas aquecidos tipo resistência elétrica.

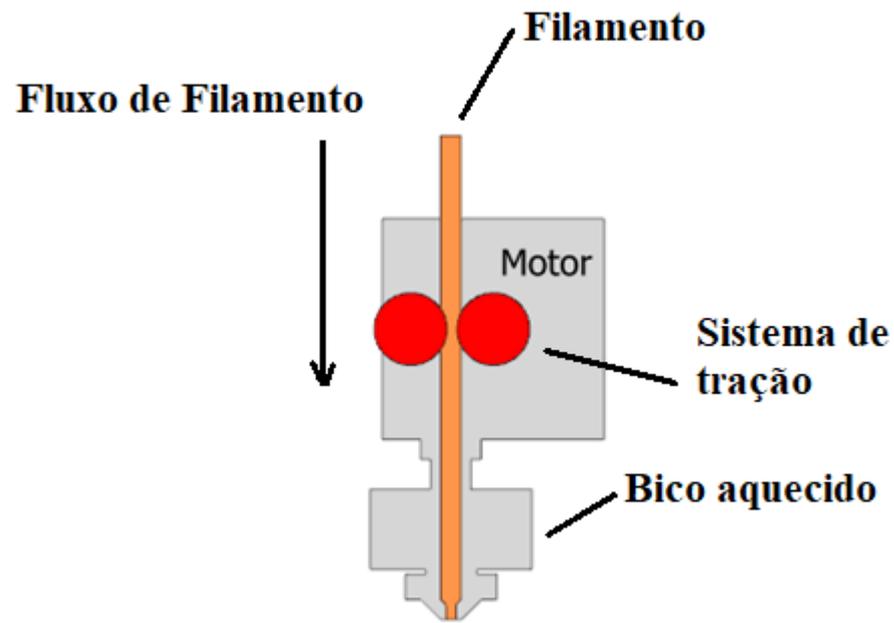
Existem três tipos de sistemas de extrusão: Tubo de teflon (*bowden*), extrusão direta (*direct drive*) e extrusão direta remota. No sistema *bowden* (Figura 4), o filamento é extrudado através de um tubo de teflon que guia o termoplástico até o bico aquecido. Aqui, o motor de passo responsável pela extrusão fica separado do carro de impressão. No sistema de extrusão direta (Figura 5) o mesmo motor é alocado diretamente no carro de impressão, logo acima do bico aquecido. Na extrusão direta remota o motor de passo fica localizado fora do carro de impressão, acionando um par engrenado (através de um eixo flexível) (Figura 6) que traciona o filamento para sua extrusão.

Figura 4 – Extrusão tipo Bowden



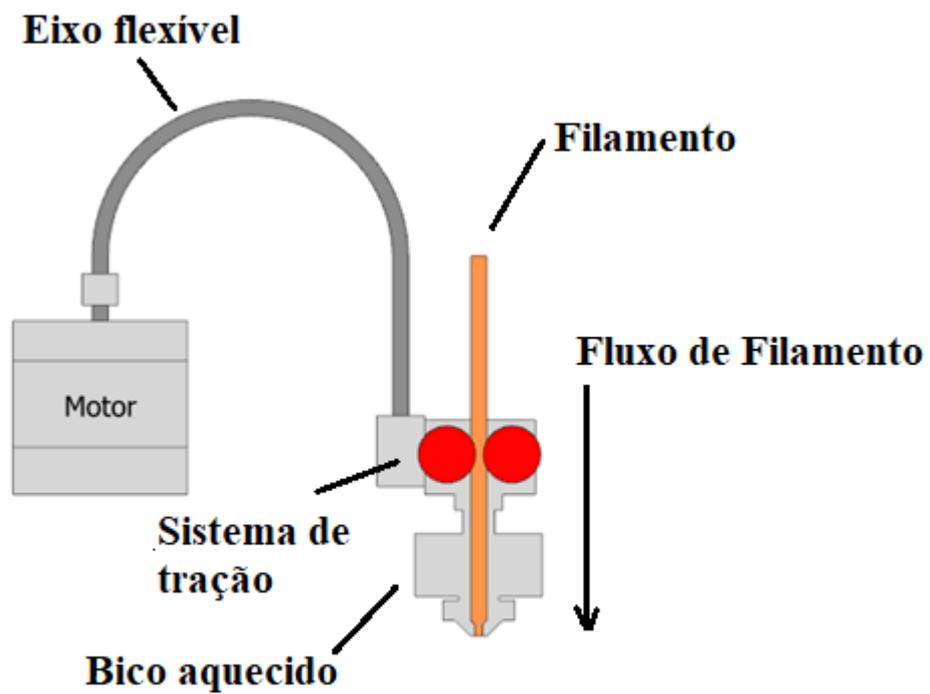
Fonte: adaptado de SPIDERBOT (2021)

Figura 5 – Extrusão tipo Direct Drive



Fonte: adaptado de SPIDERBOT (2021)

Figura 6 - Extrusão tipo Direta Remota



Fonte: adaptado de SPIDERBOT (2021)

Dentre muitas dinâmicas de movimentação para máquinas FFF, a que disponibiliza maior velocidade de impressão é a dinâmica conhecida como COREXY. Este tipo de configuração garante que os motores de movimentação estejam sempre estacionários e funcionem em conjunto, fazendo com que a inércia de movimento do cabeçote de impressão seja minimizada, adicionando precisão ao sistema e dividindo o esforço de movimentação entre os motores de passo (DABIC, 2019).

Para possibilitar um projeto tão complexo, é necessário um sistema de controle eletrônico capaz de trabalhar com grandes quantidades de informação e que disponibilize versatilidade para o usuário. Segundo Boulaala (2020), uma das características decisivas para a escolha de uma placa eletrônica para impressão 3D é o número de motores de passo que tal placa consegue controlar. Desta forma, a placa eletrônica mais completa do mercado mundial atualmente é a Duet Wifi (Figura 7), que conta com até 5 entradas para motor de passo e ainda disponibiliza possibilidade de expansão para outros 5 motores de passo (placa de expansão DueX5).

Figura 7 – Placa eletrônica Duet Wifi.



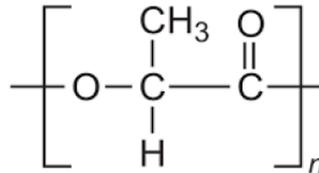
Fonte: adaptado de DUET (2021)

3.2 Materiais mais utilizados na impressão 3D FFF

Segundo Swetham et al (2017), os polímeros mais usuais para se trabalhar na forma de filamento para impressão 3D são o PLA (Ácido Polilático) e o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno). O filamento PLA (Figura 8) é um termoplástico bioativo e biodegradável derivado de fontes renováveis como amido de milho, tapioca, batata ou cana-de-açúcar; sendo em 2010

o bioplástico mais consumido no mundo (SWETHAM ET AL, 2017). Uma vez que apresenta baixa contração, todas as impressoras 3D do mercado mundial são capazes de imprimir com este material já que ele não exige ambiente de temperatura controlada para conceber peças tridimensionais.

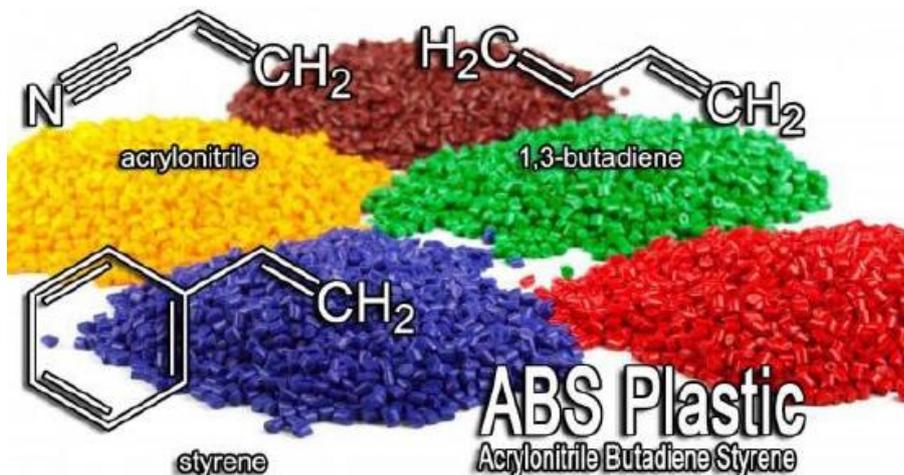
Figura 8 – Fórmula química do PLA



Fonte: SWETHAM ET AL (2017)

Já o filamento ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno) (Figura 9), por ser um termopolímero, pode apresentar características variadas uma vez que sua proporção química pode variar de 15 a 30% de acrilonitrila, de 5 a 30% de butadieno e de 40 a 60% de estireno (SWETHAM ET AL, 2017), necessitando de ambiente controlado de temperatura para uso em impressoras 3D FFF, devido ao seu alto índice de contração.

Figura 9 – Fórmula química do ABS



Fonte: SWETHAM ET AL (2017)

Um material parecido com o ABS é o poliestireno de alto impacto, HIPS. Este filamento é utilizado como suporte de peças complexas por ser solúvel em solução química D-limoneno, além de apresentar características como fácil processamento, baixo custo e resistência mecânica

próxima à do ABS (BABEL ET AL, 2018); que fazem deste um bom material para manufatura aditiva.

Outro filamento bastante difundido na tecnologia FFF é o polietileno tereftalato de etileno glicol (PETG), pois disponibiliza as seguintes propriedades: durabilidade, flexibilidade, resistência ao impacto, resistência química, resistência a intempéries climáticas, resistência à radiação ultravioleta, baixa absorção de umidade, material reciclável, e principalmente não libera gases quando imprimindo (BARRIOS E ROMERO, 2019).

3.3 Impressoras multimateriais

As impressoras 3D do tipo FFF com capacidade de trabalhar com materiais diferentes numa mesma impressão (processo multimaterial), mais acessíveis do mercado atual utilizam dois métodos diferentes. Uma das técnicas consiste em utilizar um único bico extrusor onde diferentes materiais são extrudados, e na outra, o carro da impressora 3D possui vários bicos em que cada um é responsável por seu respectivo material.

No primeiro método, como cada tipo de filamento utilizado possui temperatura de trabalho diferente, as transições frequentes desta temperatura tendem a agregar instabilidade na extrusão de cada material, o que aumenta a tendência de entupimento do bico extrusor, ocasionando falhas de impressão. Além disso, a cada troca de material é necessário expurgar o filamento utilizado anteriormente que se acumulou no bico de impressão, ocasionando perdas significativas de matéria prima no processo com a criação de uma torre de expurgo (Figura 10), além de aumentar significativamente o tempo de impressão.

Figura 10 – Torre de expurgo ao lado de um modelo impresso em 3D.



Fonte: Adaptado de ALL3DP (2021)

No segundo método, o peso excessivo do carro de impressão (devido à utilização de vários bicos de impressão em um só local) causa o aparecimento de características indesejáveis na superfície da peça impressa (Figura 11) provenientes de vibrações do conjunto, sendo necessário utilizar baixas velocidades de impressão para eliminar este problema (LEVINSKAS, 2019). Além disso, o alinhamento entre os bicos fica muito complexo e trabalhoso, além de aumentar a probabilidade de colisão entre os bicos não utilizados e a peça impressa.

Figura 11 – Característica indesejável na superfície da peça impressa em 3D à direita.



Fonte: LEVINSKAS, 2019

Devido aos problemas que estes métodos de impressão podem apresentar, surgiu uma outra tecnologia, que consiste em utilizar um sistema de troca de ferramentas, onde cada uma trabalha com materiais diferentes.

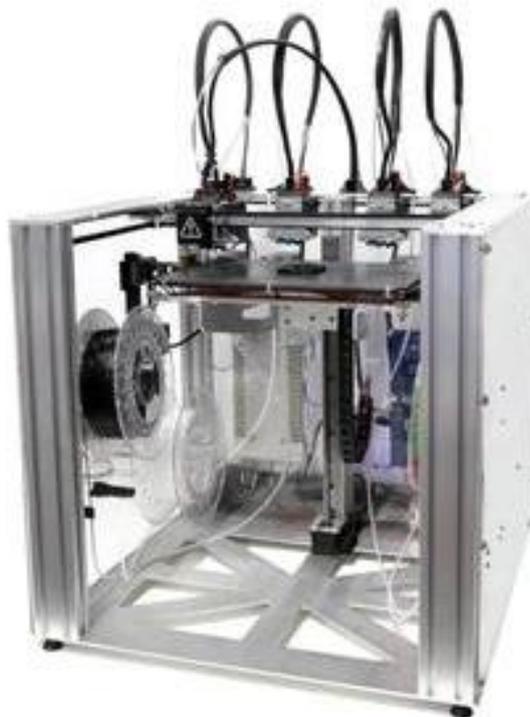
3.4 Impressoras multiferramentas

Segundo Dabic (2019), uma impressora com a habilidade de intercambiar ferramentas pode disponibilizar a característica de trabalhar com vários materiais e manter baixas taxas de inércia de movimento, uma vez que cada bico extrusor trabalha separadamente de seu adjacente. Desta forma adquire-se maior confiabilidade no processo de impressão 3D, agregando velocidades de impressão mais altas com um custo menor e melhor acabamento.

Atualmente existe uma única máquina comercialmente disponível no mercado mundial com tais características, a Impressora 3D *Tool Changer* da empresa E3D® (Figura 12). Este tipo de impressora possui um carro de impressão com um sistema de travamento que possibilita

utilizar cada ferramenta de impressão separadamente e trabalhar na mesma camada quantas ferramentas forem necessárias. Porém o seu custo é muito elevado, chegando a £5.000,00 (libras), ou aproximadamente R\$30.000,00 na cotação atual.

Figura 12 – Impressora 3D que utiliza sistema de multimateriais e multiferramentas *Tool Changer* - E3D®.



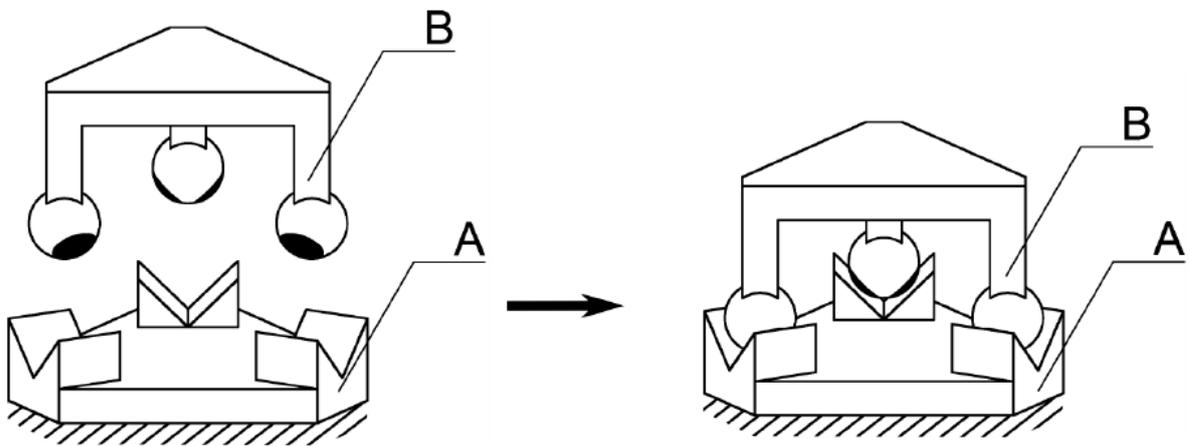
Fonte: adaptado de E3D (2021)

Porém, uma impressora 3D com capacidade de utilizar várias ferramentas necessita que haja uma grande repetibilidade de posicionamento entre elas. Segundo Kruis (2016), acoplamento cinemático é um termo criado para definir um projeto mecânico capaz de restringir todo e qualquer movimento entre dois corpos, buscando garantir além da restrição, a repetibilidade de posicionamento entre os corpos. Muitas são as aplicações deste conceito na manufatura mundial, sendo a automação a área mais afetada positivamente por esta técnica.

Primeiramente introduzido por Maxwell em 1890 através do artigo científico “Considerações Gerais sobre Aparatos Científicos”, o conceito de acoplamento cinemático descreve que um corpo rígido possui seis graus de liberdade, sendo três de translação e três de rotação. Logo, para que um corpo seja exatamente restrito a outro corpo, todos os seis graus de liberdade do primeiro objeto devem estar completamente restritos ao segundo objeto. Desta forma Maxwell propôs o sistema da Figura 13, em que três semiesferas pertencentes ao corpo rígido B se posicionam em três rasgos triangulares no corpo rígido A, resultando em seis pontos

de contato que satisfazem total restrição entre os corpos. Este tipo de restrição é capaz de disponibilizar repetibilidade de posicionamento de 0,002 a 0,003 milímetros, segundo o estudo “Projeto de Acoplamentos Cinemáticos Precisos e Repetíveis” de Culpepper (2002). A garantia de posicionamento citada pode ser utilizada na indústria da manufatura aditiva, uma vez que a tecnologia FFF prescinde de movimentos sutis da ordem de 0,0125 milímetros.

Figura 13 – Acoplamento cinemático de Maxwell



Fonte: KRUIS, 2016

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro em conjunto com a empresa Astroscience[®].

Com o intuito de definir o escopo do trabalho, toda a metodologia foi dividida em duas etapas. A primeira etapa consistiu em definir a estrutura analítica de projeto contendo todas as características inerentes à impressora 3D, sua modelagem digital e construção. A segunda consistiu na realização de testes para validação da impressora 3D.

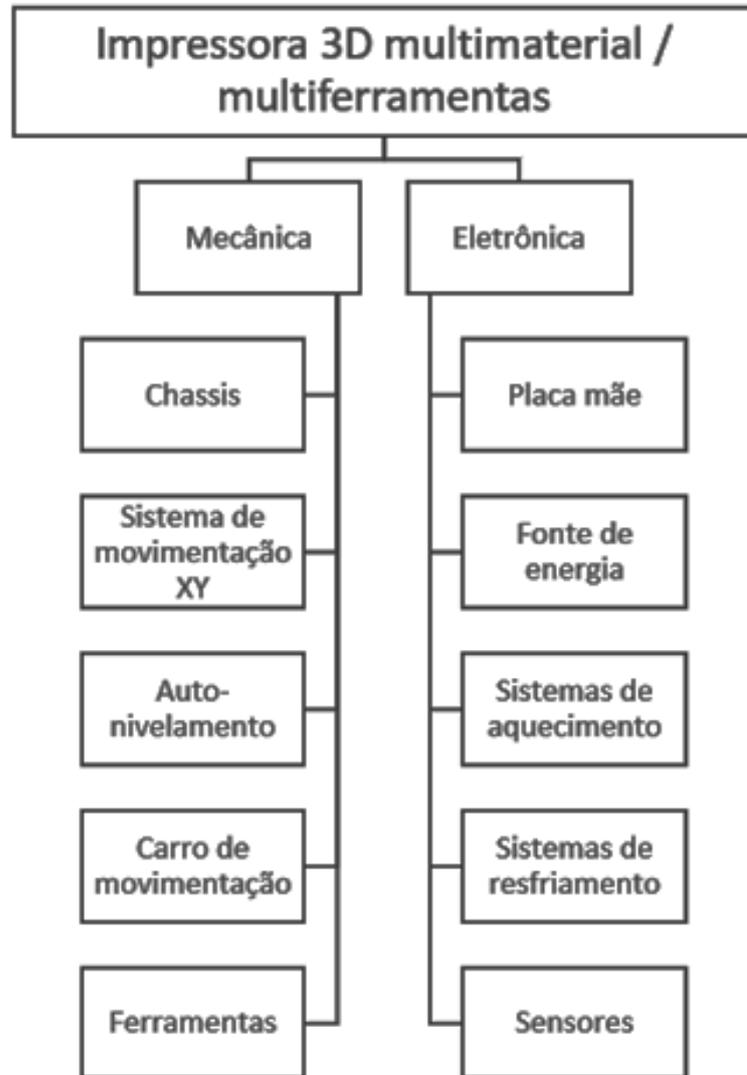
4.1 Primeira etapa

O projeto de manufatura aditiva proposto conteve as seguintes características:

- Sistema de movimentação COREXY: intuito de imprimir com velocidades acima das convencionais;
- Auto nivelamento da cama de impressão: objetivo de evitar nivelamentos manuais onerosos que são fontes de erro para o processo de impressão;
- Mínimo de duas ferramentas distintas de impressão: propósito de validar o processo multimaterial / multiferramentas e garantir escalabilidade da quantidade de ferramentas.

Uma Estrutura Analítica de Projeto (EAP) foi utilizada como ferramenta para transformar os passos complexos deste trabalho em tarefas simples e de fácil execução. Desta forma, o projeto da impressora 3D multimaterial / multiferramentas foi dividido em duas grandes áreas: mecânica e eletrônica. Em relação à mecânica, observou-se a necessidade de subdividir o projeto em estrutura da máquina (chassi), sistema de movimentação XY, sistema de auto nivelamento, carro de movimentação e por fim projeto das ferramentas. Já a eletrônica foi dividida em placa mãe, fonte de energia, sistemas de aquecimento, sistemas de resfriamento e sensores. A Figura 14 demonstra como foi projetada a EAP.

Figura 14 – Estrutura Analítica de Projeto (EAP) para o desenvolvimento de uma impressora multimaterial/multiferramentas

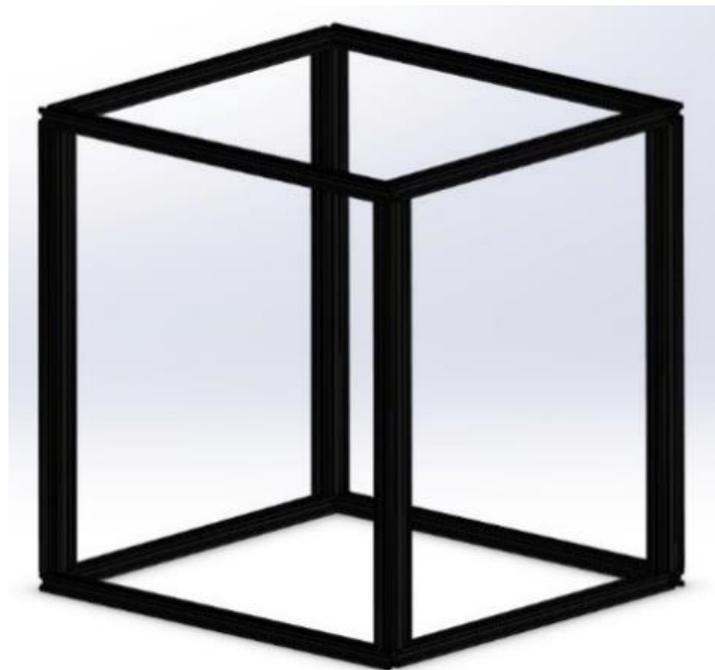


Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

4.1.1 Mecânica

A parte estrutural da impressora (chassis) foi desenvolvida pensando em uma construção com perfil de alumínio estrutural, com uma geometria rígida que possibilitou adaptar todos os sistemas criados (Figura 15) de forma fácil e prática. Sua montagem foi feita sobre uma mesa regular utilizando-se de esquadros para seus alinhamentos em 90°, garantindo os alinhamentos necessários.

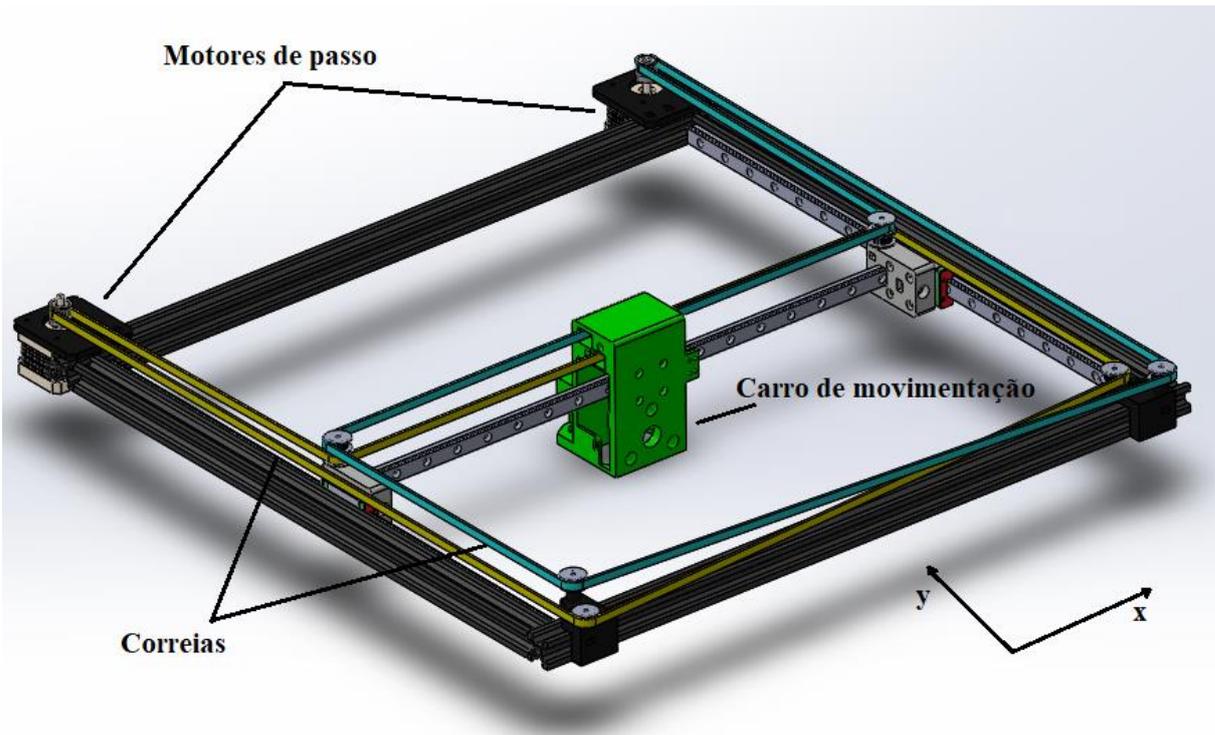
Figura 15 – Projeto digital da estrutura da impressora



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Para a movimentação XY (responsável pela largura e comprimento da peça impressa) foi projetado um sistema COREXY como na Figura 16. Devido ao conjunto de polias e correias utilizado, os esforços de movimentação do sistema se distribuem igualmente nos motores de passo estacionários (DABIC, 2019), possibilitando atingir maiores velocidades de impressão.

Figura 16 – Sistema de movimentação COREXY projetado para os eixos X e Y da impressora



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Devido aos esforços impostos durante a movimentação do carro, os suportes de sustentação da guia do eixo X não puderam ser feitos impressos, portanto, foram fabricados em alumínio, garantindo uma montagem mais robusta e precisa do sistema de movimentação XY (Figura 17).

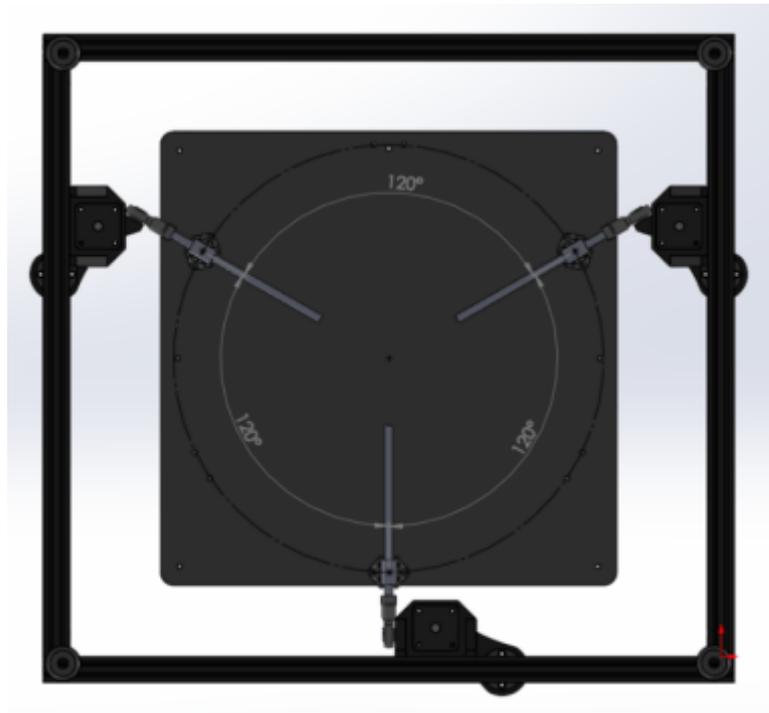
Figura 17 – Sistema XY montado na impressora.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Para o eixo Z (responsável pela altura da peça impressa) foi projetado um sistema de movimentação em três eixos distintos e paralelos (Figura 18), que em conjunto com um sensor de auto nivelamento, é capaz de fazer o nivelamento total da mesa de impressão com o sistema COREXY de forma automática, proporcionando a impressão de camadas com até 0,05mm de espessura.

Figura 18 – Vista inferior do sistema de movimentação Z utilizando 3 eixos independentes.

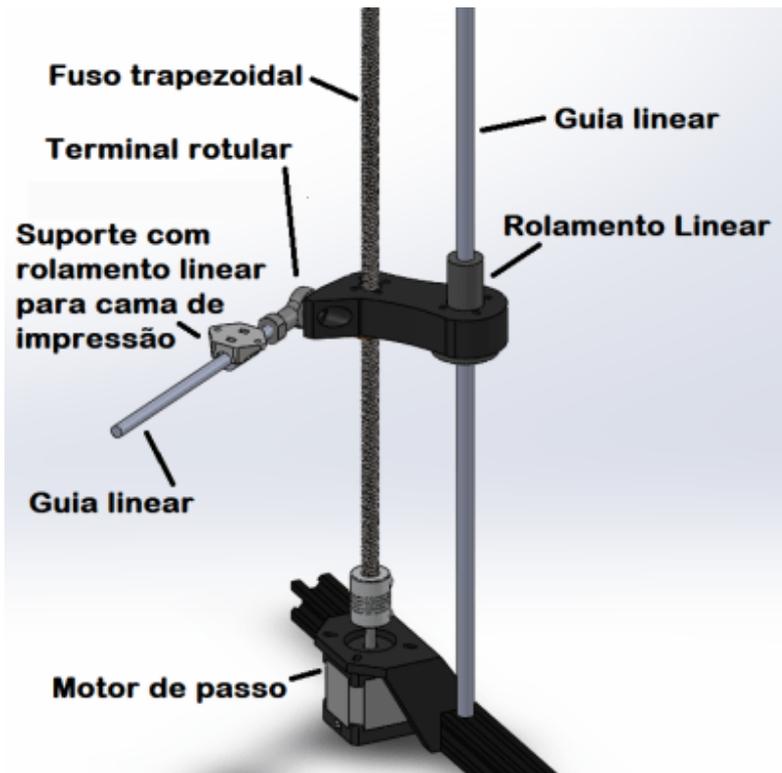


Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Cada eixo de movimentação foi composto por uma guia com rolamento linear de esferas e um fuso trapezoidal acionado por um motor de passo (Figura 19). Cada conjunto foi interligado a um suporte na cama de impressão com dois graus de liberdade (um de rotação e um de translação) provenientes da utilização de um terminal rotular em conjunto com um par eixo/rolamento linear. Com isso, foi possível uma movimentação em três dimensões para a cama de impressão (translação no sentido Z e rotação nos sentidos X e Y). Esta movimentação faz com que o sistema de auto nivelamento faça as autocorreções sem causar esforços torcionais nos outros componentes mecânicos. O projeto final do sistema de movimentação Z pode ser observado na Figura 20.

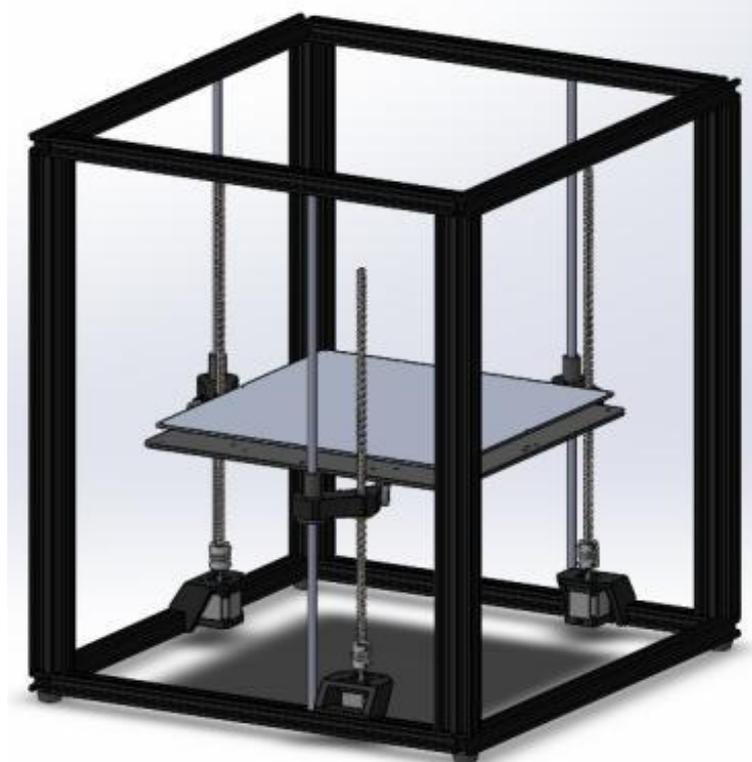
Na montagem dos eixos de movimentação Z foram utilizados gabaritos impressos em 3D para garantir alinhamento dos eixos retificados e seus fusos trapezoidais em relação ao chassi da máquina, assegurando movimentação correta da cama de impressão.

Figura 19 – Eixo de movimentação Z.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

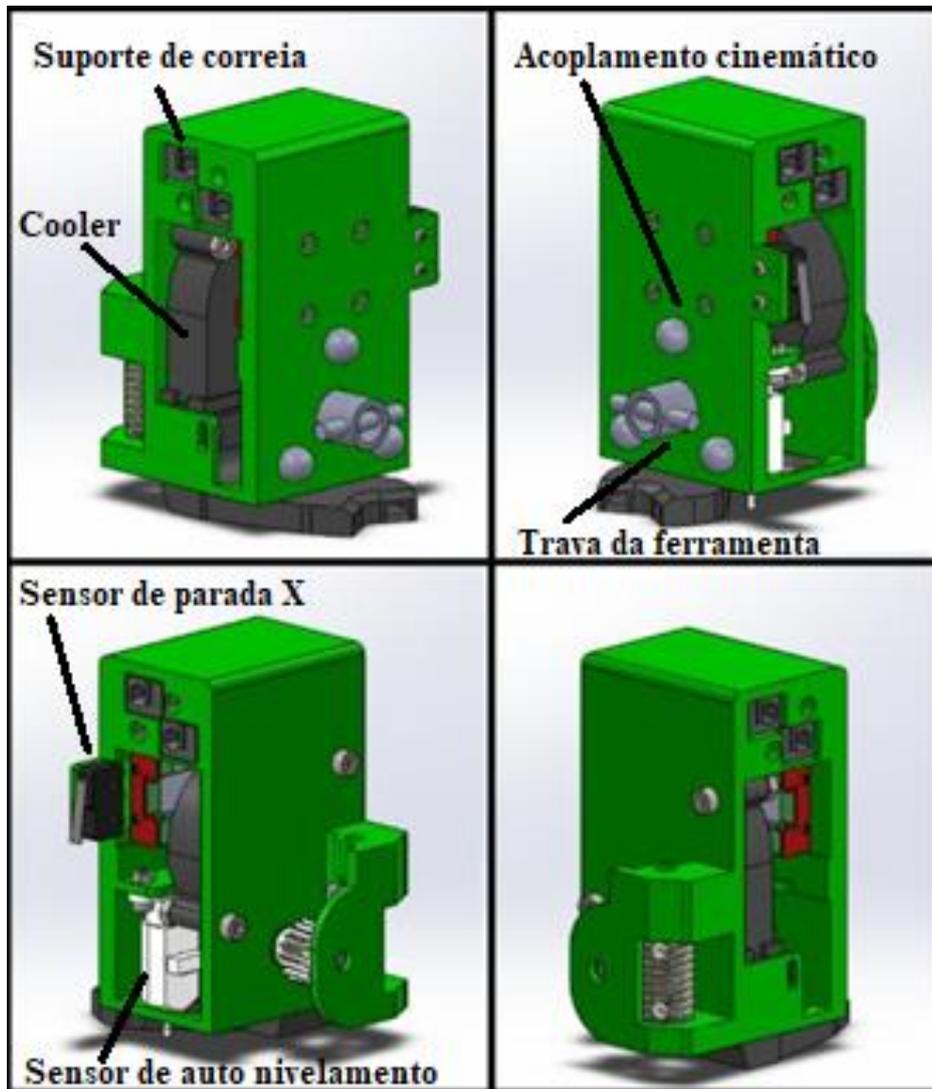
Figura 20 – Sistema de movimentação do eixo Z montado na estrutura da impressora.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

O carro de movimentação XY (Figura 21) foi o responsável por suportar vários sistemas e componentes fundamentais da impressora 3D, sendo elas: sistema de trava e tensionamento das correias COREXY; trava das ferramentas; sensor de auto nivelamento Z; patins e sensor de parada do eixo X; cooler de impressão; e acoplamento cinemático (sistema fundamental para garantir a repetibilidade de posicionamento entre o carro e as ferramentas de impressão).

Figura 21 – Projeto do carro de movimentação XY.

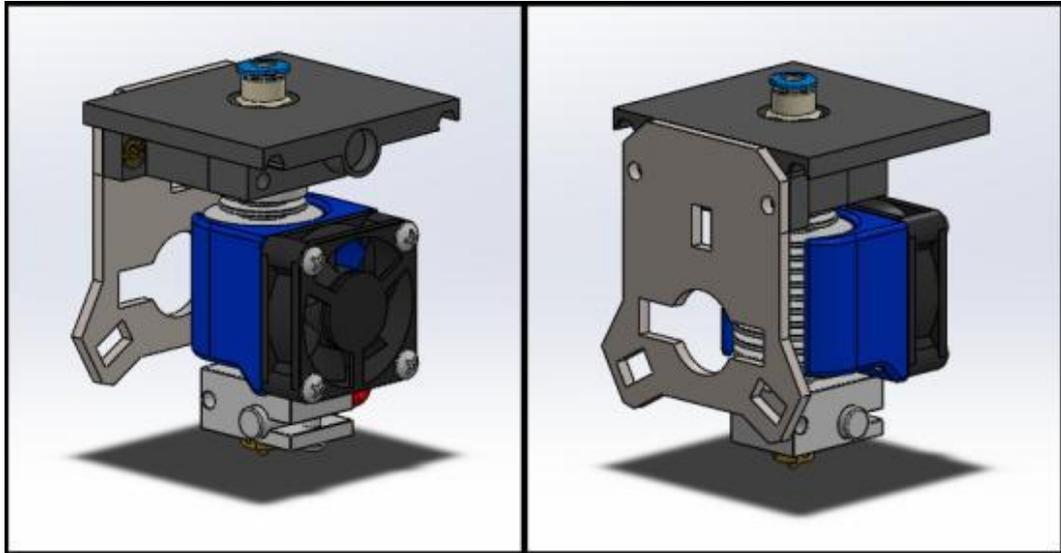


Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Finalizado o projeto e construção dos sistemas de movimentação dos eixos XYZ e do carro de movimentação, foi iniciado o projeto das ferramentas de impressão (cabeçote). Foram projetados dois tipos de ferramentas: uma no estilo *Bowden* (Figura 22) e outra no estilo extrusão direta remota – EDR (Figura 23). Nestes dois tipos de ferramentas o motor da extrusora fica separado, e isso reduz a massa que será movimentada, possibilitando uma maior velocidade

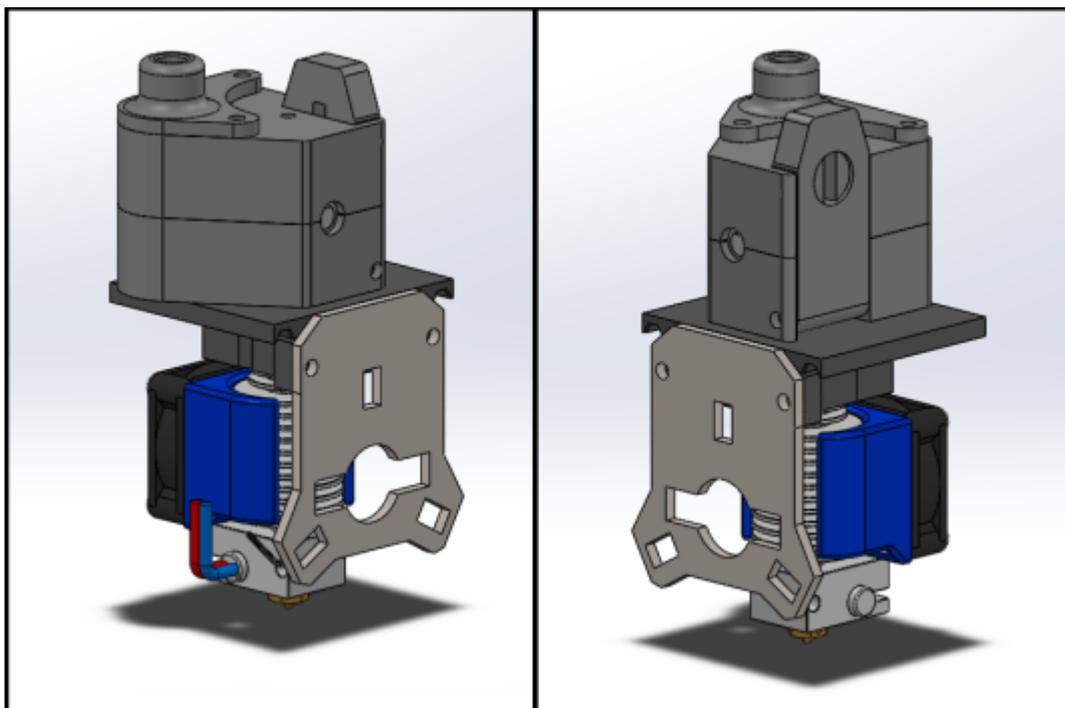
de impressão e uma menor influência sobre o acabamento superficial dos objetos impressos. Além disso, ambas as ferramentas disponibilizaram de um sistema de acoplamento cinemático, fundamental para garantia de posicionamento entre elas.

Figura 22 – Ferramenta de impressão projetada do tipo Bowden.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

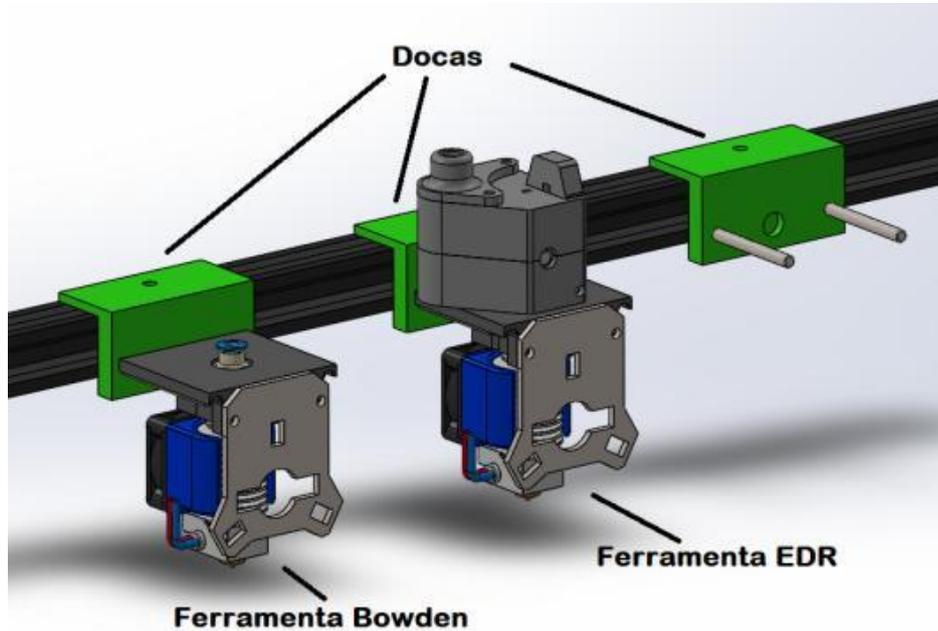
Figura 23 – Ferramenta de impressão projetada do tipo EDR.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Todas as ferramentas foram projetadas para ficarem fixas em um conjunto de docas (Figura 24), com a placa do sistema de acoplamento cinemático posicionada para realizar o travamento no carro de movimentação, quando necessário.

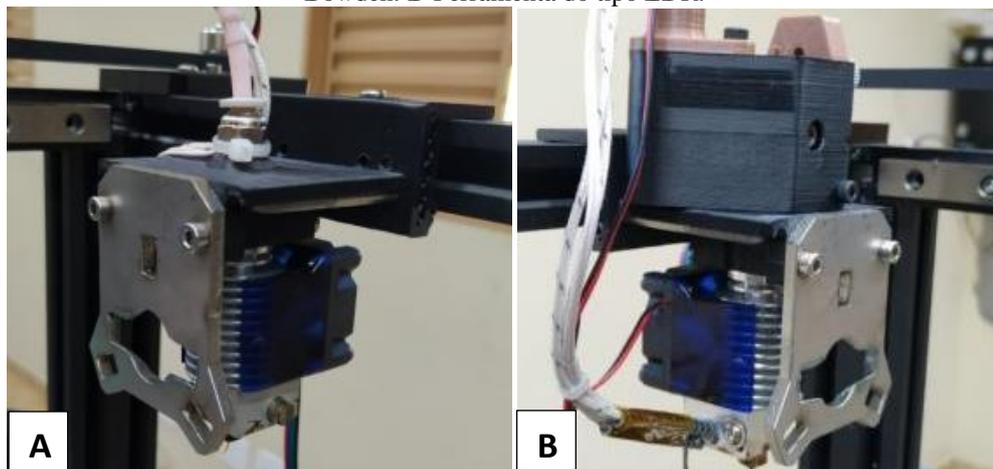
Figura 24 – Ferramentas posicionadas nas docas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Na montagem das ferramentas optou-se por utilizar uma chapa cortada a laser para evitar erros de fabricação que pudessem influenciar no seu sistema de acoplamento cinemático (Figura 25).

Figura 25 – Ferramentas de impressão com detalhe para o sistema de acoplamento. A-Ferramenta do tipo Bowden. B-Ferramenta do tipo EDR.

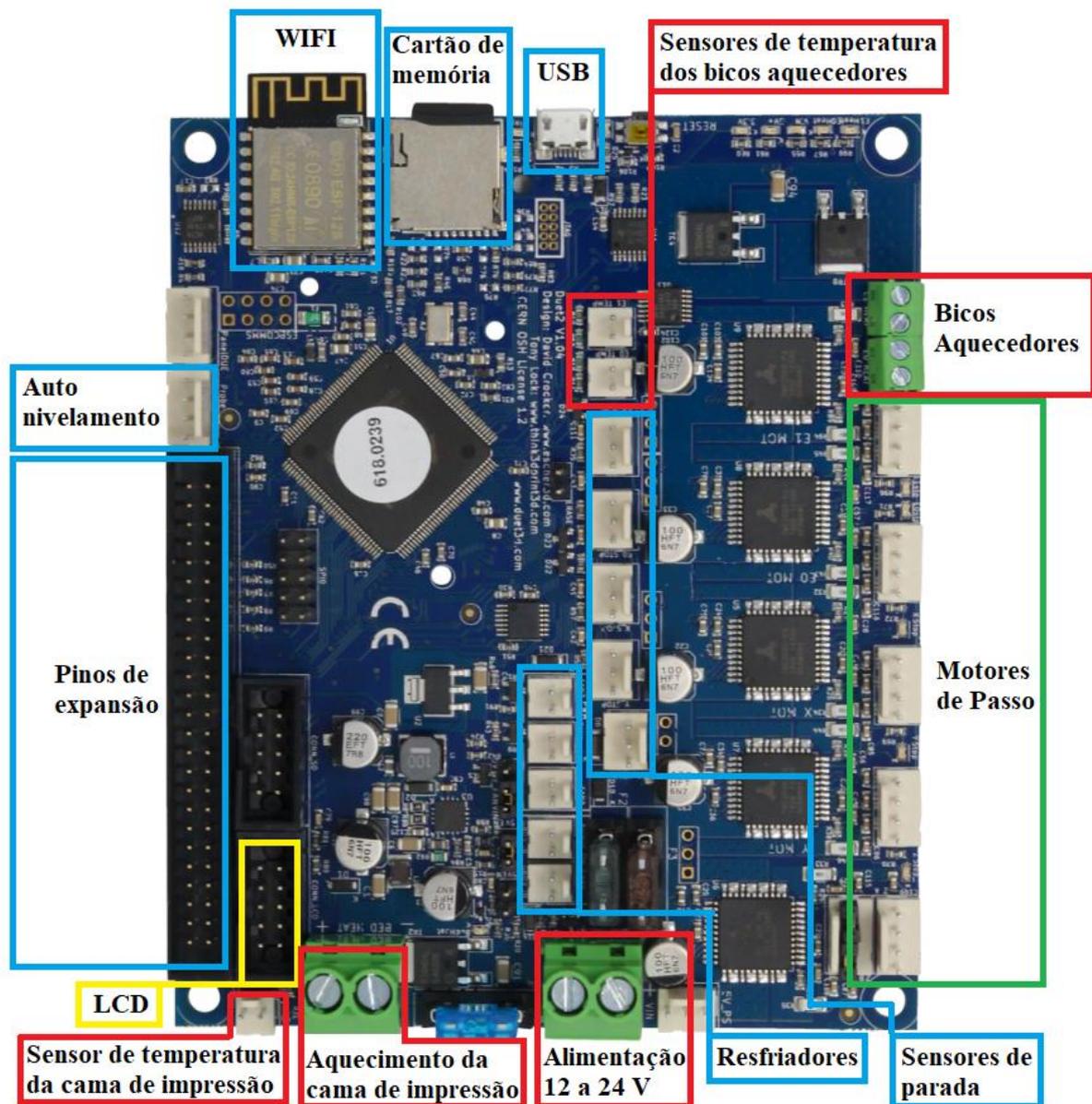


Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

4.1.2 Eletrônica

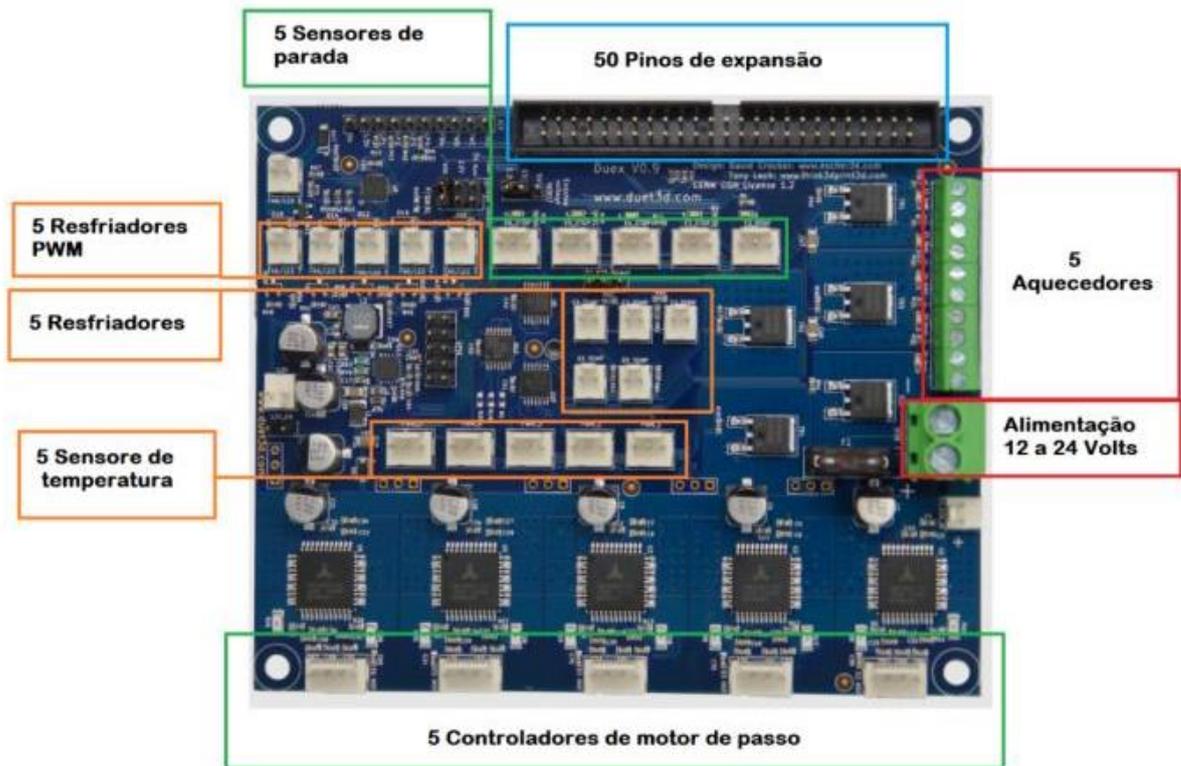
Para controlar a impressora de forma satisfatória optou-se pela utilização placa Duet 2 Wifi (Figura 26), que possui cinco entradas para motor de passo e disponibiliza uma expansão para controlar outros cinco motores (Figura 27).

Figura 26 – Placa controladora Duet 2 Wifi e suas funções



Fonte: adaptado de DUET (2021)

Figura 27 – Placa de expansão DueX5 conectada à placa controladora.

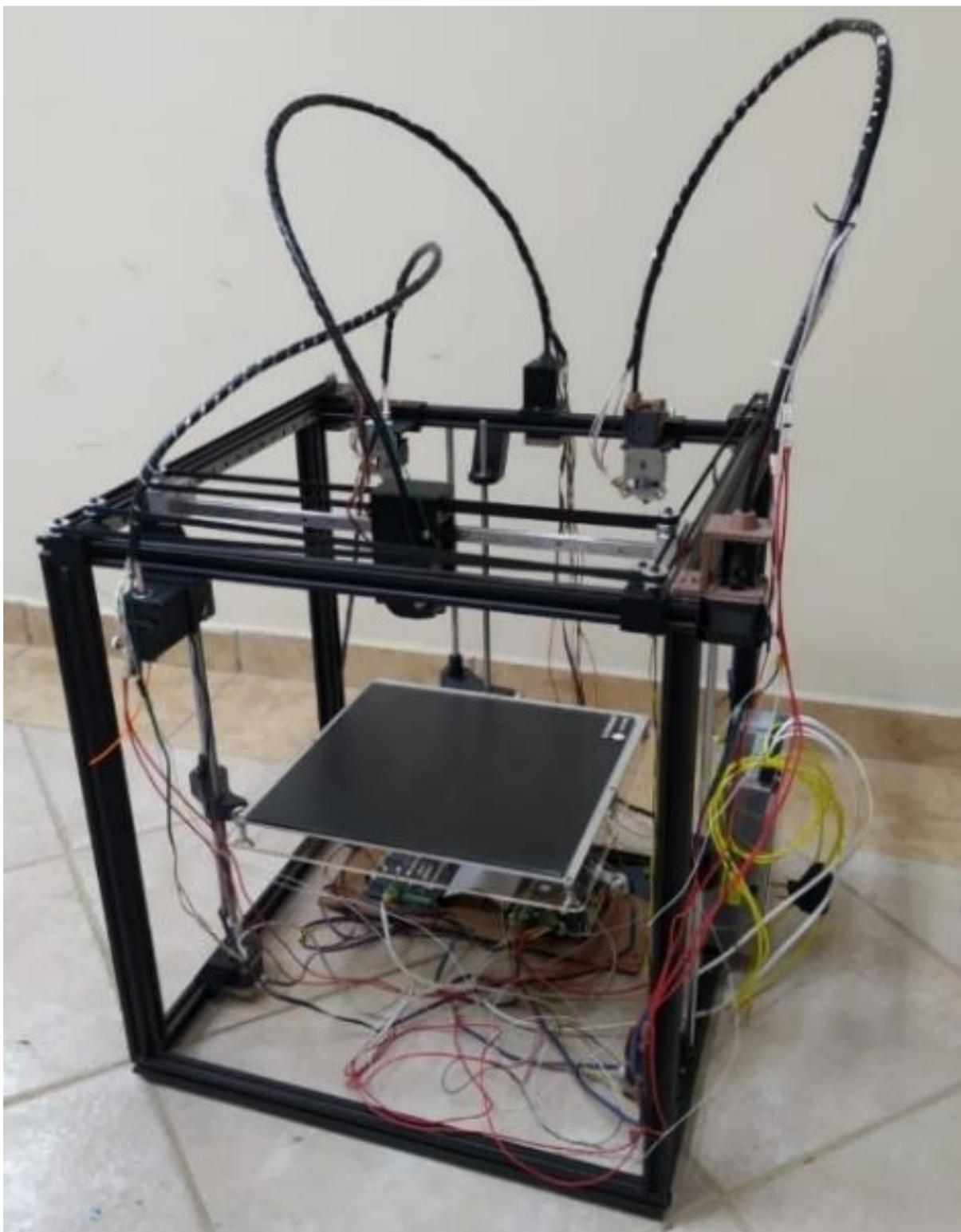


Fonte: adaptado de DUET (2021)

As outras partes da área de eletrônica foram adquiridas e utilizadas sem nenhuma alteração. A fonte de energia utilizada foi uma fonte chaveada EKS S600 de 12 volts / 50 ampère. Para o sistema de aquecimento foi utilizada uma mesa de impressão da marca Tronxy, e bicos de extrusão E3D V6 com coolers. Para o sistema de resfriamento da peça impressa foi utilizado um cooler radial tipo 5015 12 volts. Para os sensores de parada XY foram utilizados sensores mecânicos da marca Tronxy® e para o sensor de auto nivelamento foi aplicado um sensor eletromecânico tipo BLTouch.

Os mapas das Figuras Figura 26 e Figura 27 foram seguidos rigorosamente para conectar os fios de todos os componentes eletrônicos da impressora 3D à placa mãe e sua extensão, sempre observando-se polaridades quando necessário. A montagem final da máquina pode ser observada na Figura 28.

Figura 28 – Montagem final da impressora



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

A quantidade total e a especificação de todos os componentes comerciais utilizados na construção da máquina estão apresentadas no Quadro 1. Após a construção e os primeiros testes de funcionamento, o custo aproximado da impressora foi de R\$8.000,00.

Quadro 1 – Descrição dos componentes utilizados na construção da impressora 3D multimaterial e multiferramentas.

Componente	Especificação	Quantidade
Motor de passo	Nema 17	8
Acoplamento flexível		3
Fuso	TR8 / passo 2mm / 4 entradas	3
Castanha	TR8 / passo 2mm / 4 entradas	3
Rolamento linear	M8	3
Guia Linear	M8	3
Terminal rotular	M6 com furo 10mm	3
Rolamento linear	M6	3
Guia Linear	M6	3
Mesa de Impressão	Tronxy	1
Guia prismática	MGN12H	3
Polia dentada	GT2 20 dentes	6
Polia Lisa		2
Correia	GT2 6mm – 5 metros	1
Polia dentada	GT2 20 dentes para motor de passo	2
Sensor mecânico	Endstop Tronxy	2
Eixo Flexível		2
Tubo teflon	Bowden – 1 metro	1
Bico aquecido	E3D V6 completo	2
Sensor auto nivelamento	BLTouch	1
Cooler	5015 12V	1

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Com a máquina montada foi necessário configurar o conjunto de instruções operacionais (*firmware*) embarcado na placa mãe através de códigos GCODE, como demonstra a Figura 29. Este firmware foi responsável por garantir todas as movimentações dos motores de passo, bem como correto funcionamento dos sistemas de aquecimento e resfriamento, auto nivelamento, conectividade wifi, definições das ferramentas, entre outros.

Figura 29 – Configurações de Firmware

```

G90          ; enviar coordenadas absolutas
M83          ; coordenadas relativas para os extrusores
M667 S1      ; movimentação COREXY

;----conectividade wifi----
M552        ; habilitar wifi
M586        ; habilitar HTTP
M586        ; desabilitar FTP
M586        ; desabilitar Telnet

;----motores----
M569        ; define sentido de giro do motor de passo
M584        ; mapeamento dos motores
M671        ; define posicionamento dos eixos Z
M350        ; configuração de micro-passo
M92         ; configuração de passos/mm
M566        ; configuração de troca de velocidade máxima instantânea (mm/min)
M203        ; configuração de velocidades máximas (mm/min)
M201        ; configuração de acelerações (mm/s^2)
M906        ; configuração de corrente elétrica para os motores
M84         ; define tempo em que os motores permanecem ligados quando parados

;----limite de eixos----
M208        ; limite mínimo de comprimento do eixo
M208        ; limite máximo de comprimento do eixo

;----sensores de parada----
M574        ; define tipo de sensor de parada

;----auto novelamento----
M307        ; desabilita o aquecedor para utilizar o PWM
M558        ; Define o tipo de sensor como BLtouch
G31         ; define valor de acinamento do sensor BLtouch
M557        ; define a malha de pontos que o sensor pode trabalhar

;----aquecedores----
M305        ; define o tipo de sensor de temperatura utilizado
M143        ; define a temperatura limite de trabalho

;----controle ativo de cooler----
M106        ; define cooler da peça

;----ferramentas----
M563        ; define ferramenta
G10         ; define offsets da ferramenta e temperatura inicial de trabalho e de espera para 0°C

M911 S10 R11 P"M913 X0 Y0 G91 M83 G1 Z3 E-5 F1000" ; ações para ocorrer em caso de queda de energia

```

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

4.2 Segunda etapa

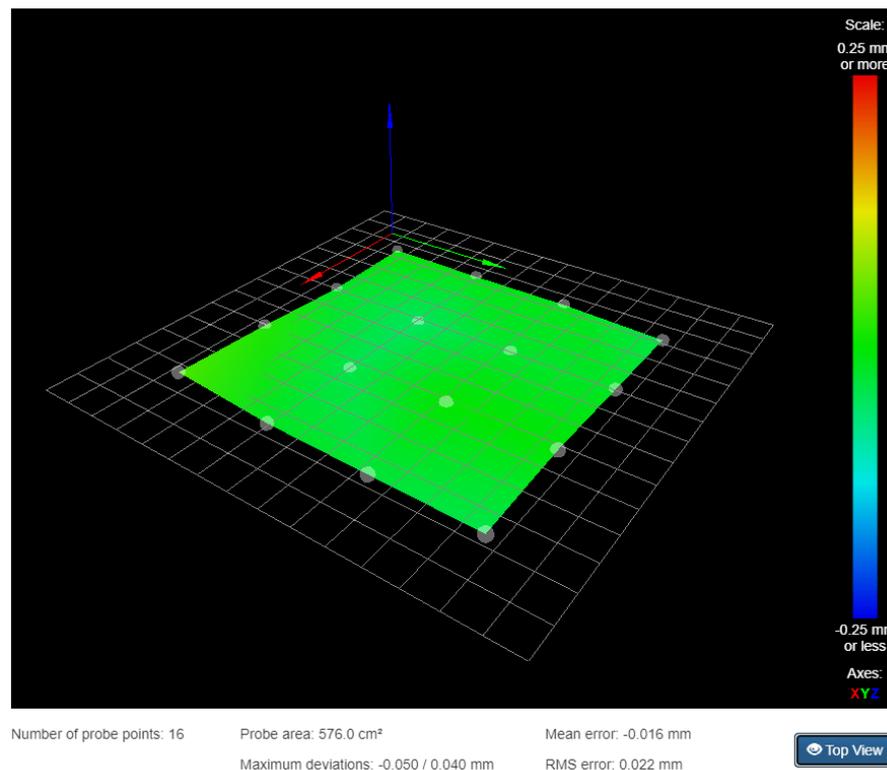
4.2.1 Auto nivelamento da cama de impressão

A impressora 3D funcionou através de comando GCODE, uma linguagem de código simplificada criada na década de 1970 para controlar máquinas de forma computacional (LATIF, 2021). Para validar o sistema de auto nivelamento, foram utilizados dois comandos desta linguagem:

- **G32 S0** - que mede três pontos diferentes da cama de impressão e retorna o melhor plano possível entre estes pontos, acionando os motores de passo Z e fazendo o nivelamento total do sistema.
- **G29** - que mede 16 pontos da cama de impressão e retorna um mapa topográfico.

Após a execução dos dois comandos em sequência, o sensor de auto nivelamento retornou um erro de medida da ordem de 0,022mm e o desvio das medidas para o plano calculado ficou entre $\pm 0,050$ mm. A Figura 30 demonstra o mapa topográfico da cama de impressão gerado pelo aplicativo de controle da placa eletrônica Duet após o processo de auto nivelamento.

Figura 30 – Mapa topográfico da cama de impressão.

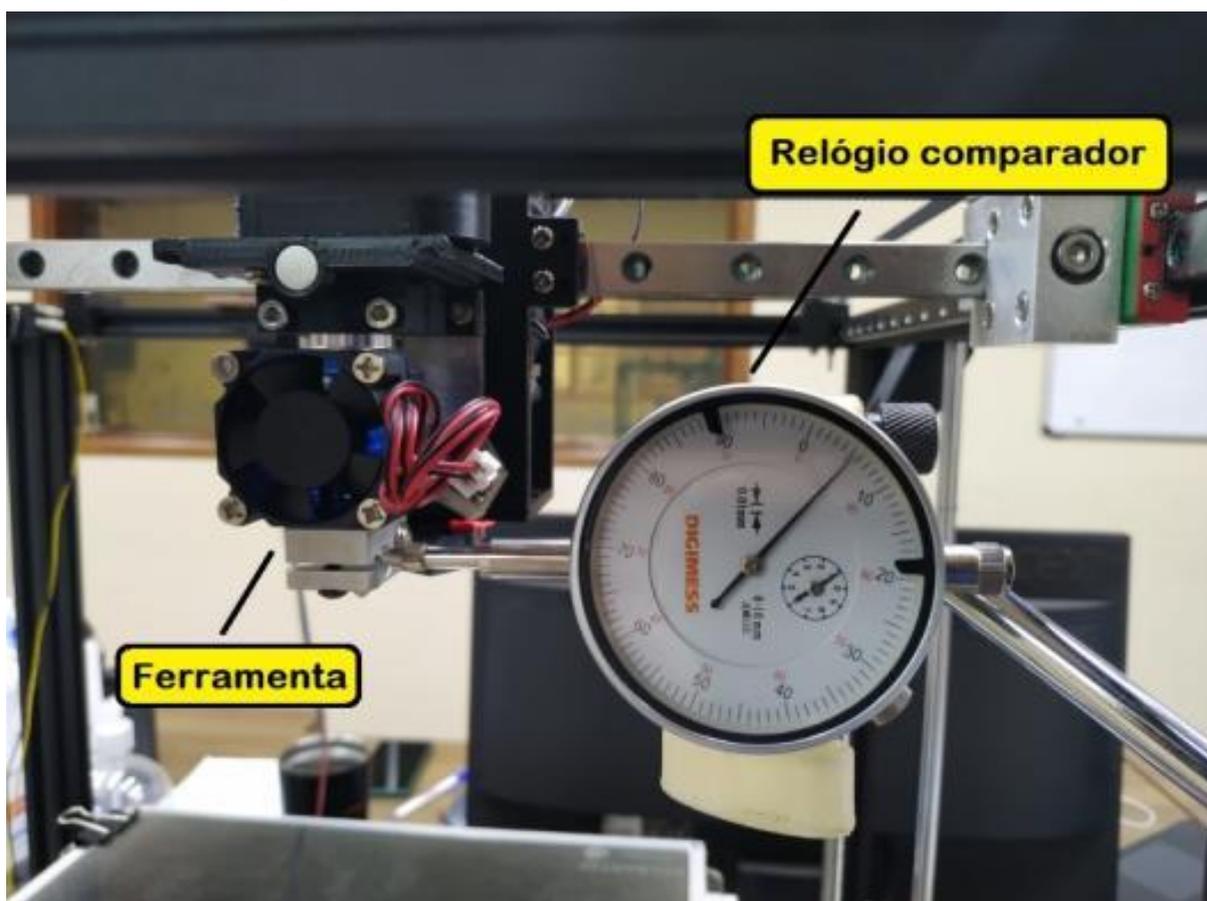


Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

4.2.2 Repetibilidade da troca de ferramentas

Para analisar a repetibilidade do sistema de troca de ferramentas criado (acoplamento cinemático entre carro de movimentação XY e ferramentas) foi posicionado um relógio comparador na lateral da máquina (Figura 31) para que fosse acionado pelo bloco aquecedor da ferramenta a cada troca de ferramenta. Uma rotina em código GCODE foi criada para fazer a impressora simular a troca de ferramenta cinquenta vezes seguidas (Figura 32).

Figura 31 – Posicionamento do relógio comparador para coleta de dados



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Figura 32 - Código GCODE criado para verificar a repetibilidade da troca de ferramentas

```

;HOME
G28 Y0
G28 X0

i=0
Se i<51
.      ;PEGA FERRAMENTA
.      G1 X319.5
.      G1 Y318
.      G1 U90
.      G4 P500
.      G1 Y252
.
.      ;VAI PRO RELOGIO
.      G1 X82.7 F5000
.      G4 P3500
.
.      ;LIBERA FERRAMENTA
.      G1 X319.5
.      G1 Y318
.      G1 U-1
.      G4 P500
.      G1 Y252
.
.      i=i+1
.
Fim do laço

```

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Foram coletadas 50 medidas, e depois o mesmo procedimento foi repetido mais duas vezes, totalizando 150 trocas de ferramentas analisadas.

Os dados coletados no primeiro procedimento reportaram uma diferença média de $0,653 \pm 0,008$ milímetros no posicionamento do carro após as 50 repetições de troca de ferramenta. No segundo procedimento, o posicionamento médio foi de $0,683 \pm 0,009$ milímetros, e no terceiro procedimento o posicionamento médio foi de $0,691 \pm 0,013$ milímetros. Os dados estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo das três primeiras coletas.

Procedimento	Média das medidas
1	0,653
2	0,683
3	0,691
Média das Médias:	0,676
Desvio Padrão	0,0200

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Outros três procedimentos de coleta foram feitos após a máquina ter passado pelos testes de validação de impressão 3D. O quarto procedimento reportou posicionamento médio de 0,510 milímetros com desvio padrão de 0,0076 milímetros. Já o quinto procedimento teve um posicionamento médio de 0,485 milímetros com desvio padrão de 0,0107 milímetros. No sexto procedimento o posicionamento médio foi de 0,513 milímetros com desvio padrão de 0,0092 milímetros. Os dados estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo das três últimas coletas.

Procedimento	Média das medidas
4	0,510
5	0,485
6	0,513
Média das Médias:	0,503
Desvio Padrão	0,0154

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Observa-se que existe uma falta de repetibilidade entre as médias observadas de cerca de 0,020 milímetros para os três primeiros procedimentos e de 0,015 milímetros para os três últimos (desvio padrão da média das médias). Isto acontece devido ao tipo de sensor utilizado para referenciar os eixos de movimentação X e Y, que por ser mecânico disponibiliza repetibilidade de posicionamento de 0,02 milímetros. Porém, isto não resulta em qualquer influência negativa para a manufatura de peças tridimensionais na impressora 3D criada, uma vez que os eixos são referenciados uma única vez antes do processo de impressão 3D se iniciar, fazendo com que o sistema mantenha tal referência durante todo o processo de manufatura.

Além disso, o menor desvio padrão encontrado nas medições foi de 0,0076 milímetros e o maior foi de 0,0128 milímetros. Quando comparados com o menor posicionamento entregue pelo sistema mecânico criado (0,0125 milímetros) é possível afirmar que tais desvios não farão qualquer diferença na manufatura das peças a serem impressas nesta máquina, desta forma validando o sistema de acoplamento cinemático proposto.

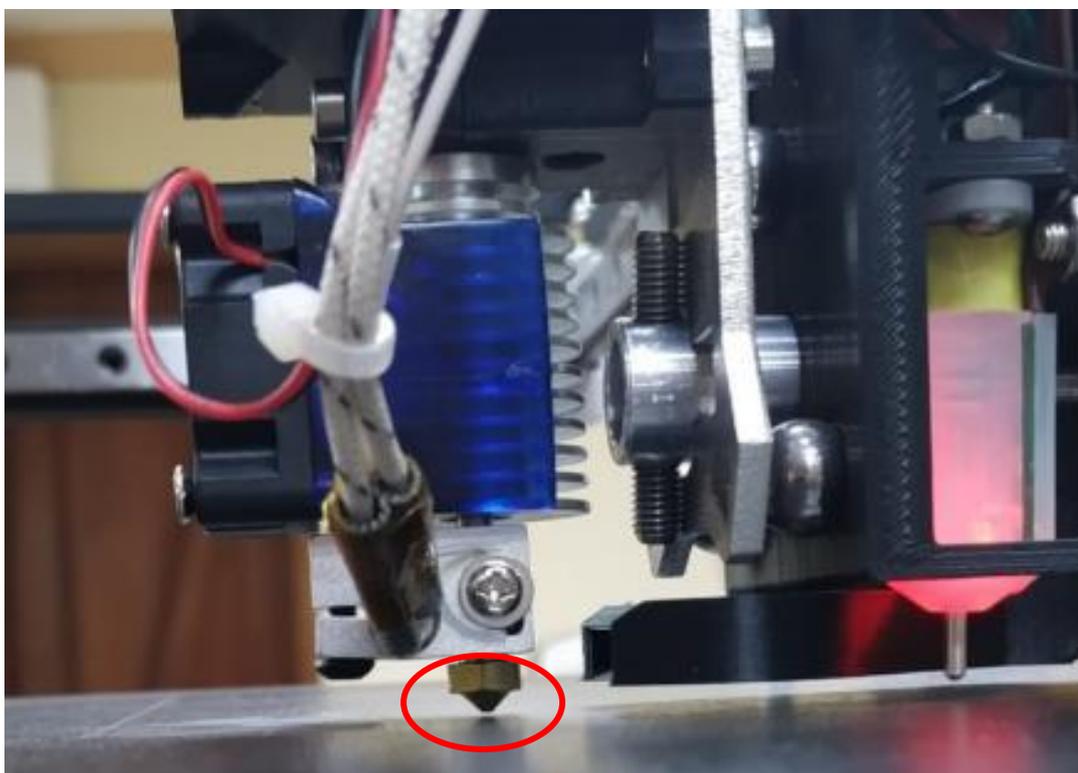
4.2.3 Alinhamento entre ferramentas

Independente do processo escolhido para fabricação das ferramentas, sempre haverá uma diferença entre o posicionamento do bico extrusor de cada ferramenta utilizada. No entanto, é possível compensar estas diferenças diretamente pela placa controladora (através do

firmware). Para isto foi necessário avaliar o deslocamento X/Y/Z referente a cada ferramenta, e com estes valores, os posicionamentos foram corrigidos digitalmente.

Para coletar os dados de posicionamento Z (referência da distância entre o bico e a mesa de impressão), foi posicionada a primeira ferramenta no centro da mesa de impressão (com bico encostado na mesa) para definir a origem do eixo Z. Depois a segunda ferramenta foi posicionada no mesmo local, e foi observado que o bico não tocou a mesa (Figura 33). Desta forma foi necessário movimentar a mesa até que ela tocasse o bico, resultando num desvio de 0,2 mm. Este valor foi posteriormente inserido nas configurações do *firmware* para que, quando esta ferramenta estiver em uso, ocorra uma correção de 0,2 mm aplicada à distância entre a ferramenta e a mesa de impressão.

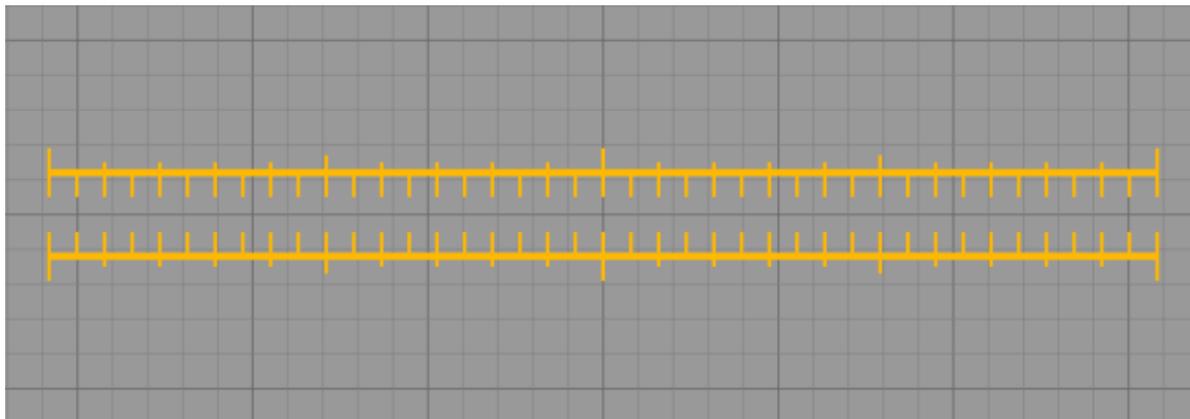
Figura 33 – Ferramenta com desvio no eixo Z.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

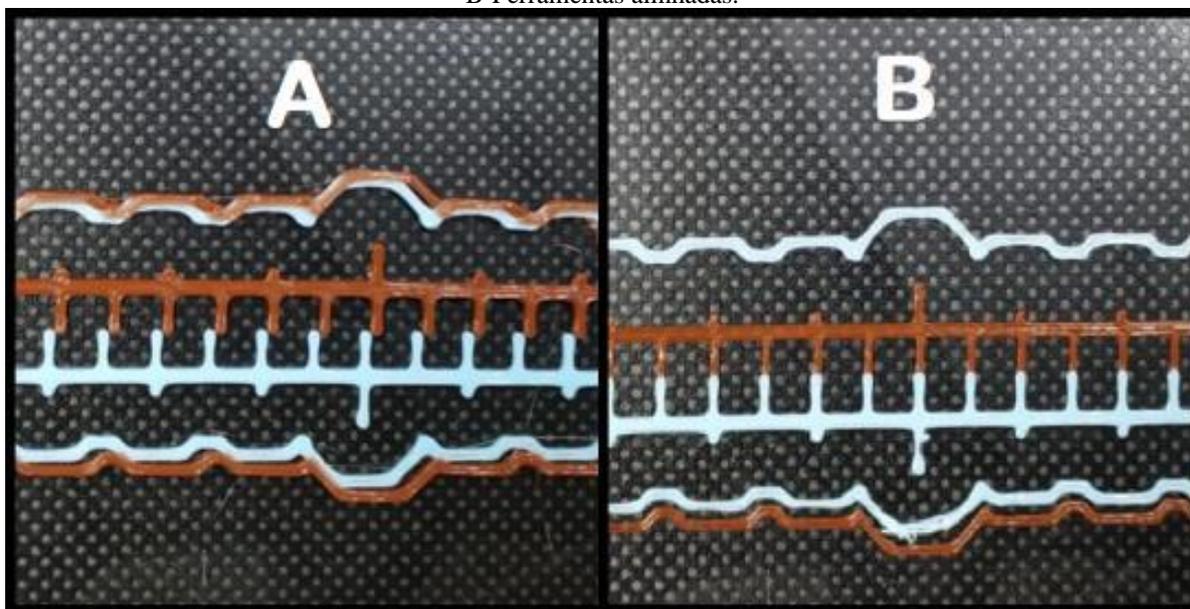
Para a coleta de posicionamento X e Y, foi utilizada a impressão de um modelo 3D digital da escala Vernier (Figura 34). A primeira impressão apresentou um desvio nos eixos X e Y entre os dois bicos como apresentado na Figura 35A. De posse do modelo impresso, as distâncias entre uma escala e outra foram medidas com um paquímetro digital (0,2 mm no eixo X e 0,95 mm no eixo Y) e os valores foram aplicados às configurações do *firmware*. Após a configuração, os eixos ficaram alinhados (Figura 35B).

Figura 34 – Modelo 3D da escala vernier.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Figura 35 – Teste de impressão para alinhamento das ferramentas nos eixos X e Y. A-Ferramentas desalinhadas. B-Ferramentas alinhadas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

4.2.4 Validações de impressão 3D

Com a máquina totalmente calibrada foram realizados os testes de impressão 3D, que consistiu nas seguintes impressões:

- 1- Impressão do mesmo modelo em cada ferramenta com o mesmo material (PLA);
- 2- Impressão de um modelo utilizando as duas ferramentas com o mesmo tipo de material (PLA);
- 3- Impressão de um modelo utilizando as duas ferramentas com materiais diferentes.

4.2.4.1 Impressão utilizando uma única ferramenta

Esta impressão foi realizada para testar cada ferramenta separadamente. Foi observado que o auto nivelamento estava funcionando corretamente (primeira camada sem baixa extrusão ou sem esmagamento exacerbado) e que os sistemas de extrusão estavam corretos, uma vez que os modelos 3D impressos não apresentaram falhas de sub-extrusão ou marcas de sobre-extrusão nas paredes laterais ou camadas superiores, locais onde tais tipos de falha são mais visíveis normalmente (Figura 36).

Figura 36 – Peças impressas em PLA. Azul-Ferramenta do tipo *bowden*. Marrom-Ferramenta do tipo EDR.

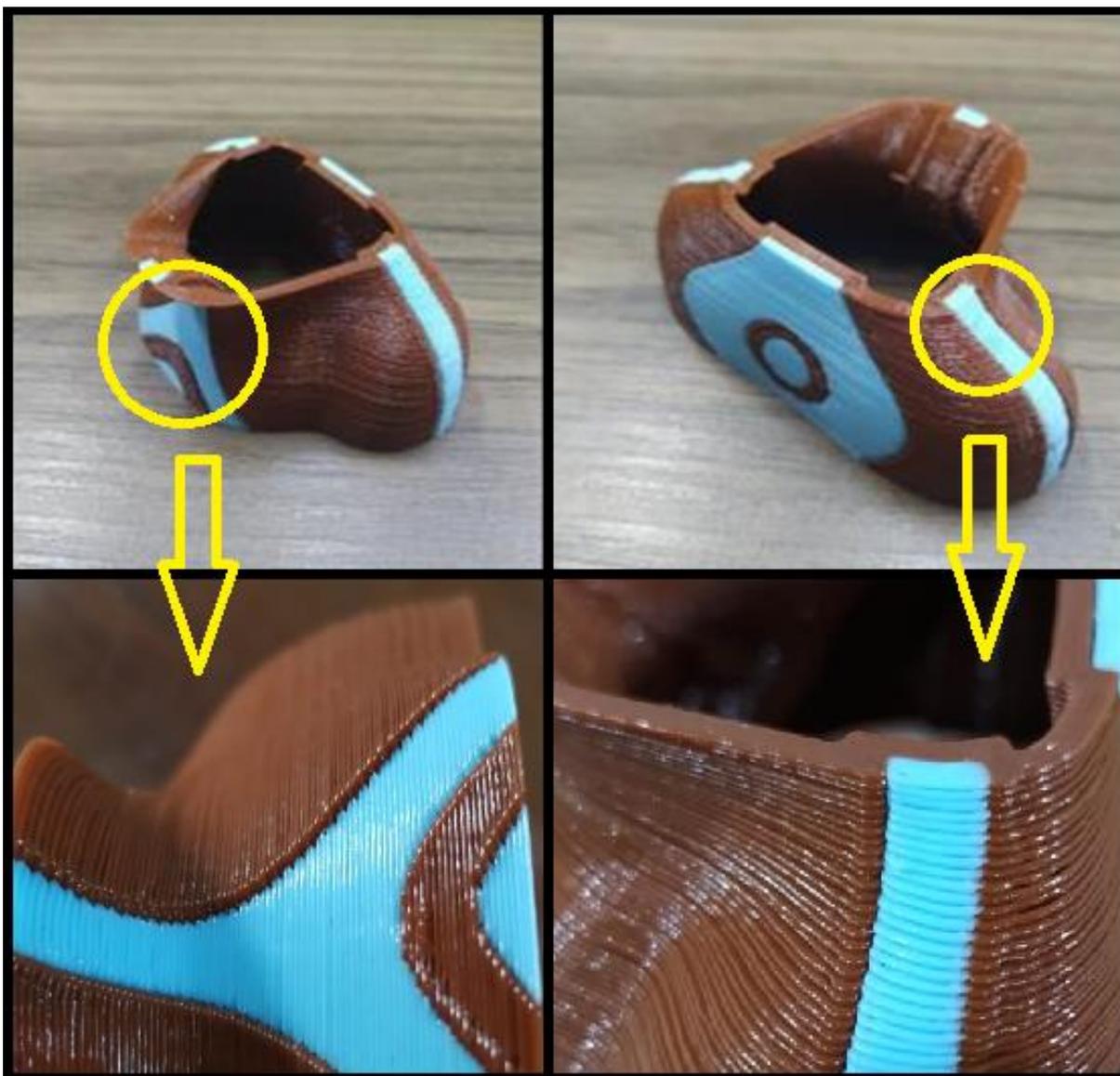


Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

4.2.4.2 Impressão utilizando duas ferramentas com o mesmo material

Foi impresso o modelo apresentado na Figura 37 utilizando as duas ferramentas em um único processo. Após a impressão, foi verificado que o acoplamento cinemático funcionou muito bem, pois a impressão das duas ferramentas (cores diferentes) ficou com o alinhamento correto.

Figura 37 – Impressão utilizando o mesmo material nas duas ferramentas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

4.2.4.3 Impressão utilizando duas ferramentas com materiais diferentes

Para finalizar o teste de impressão, foram impressas duas peças utilizando as duas ferramentas com materiais diferentes. Foi utilizada uma ferramenta com filamento PLA marrom para a peça e outra ferramenta com filamento ABS laranja como suporte. Esta configuração foi aplicada devido às características de ambos os materiais serem incompatíveis, tornando a fusão de um filamento ao outro impossível, o que facilitou a separação do suporte (Figura 38).

A título de comparação, o mesmo modelo 3D foi impresso utilizando o mesmo material tanto para a peça quanto para o suporte. Foi observada uma melhora considerável no

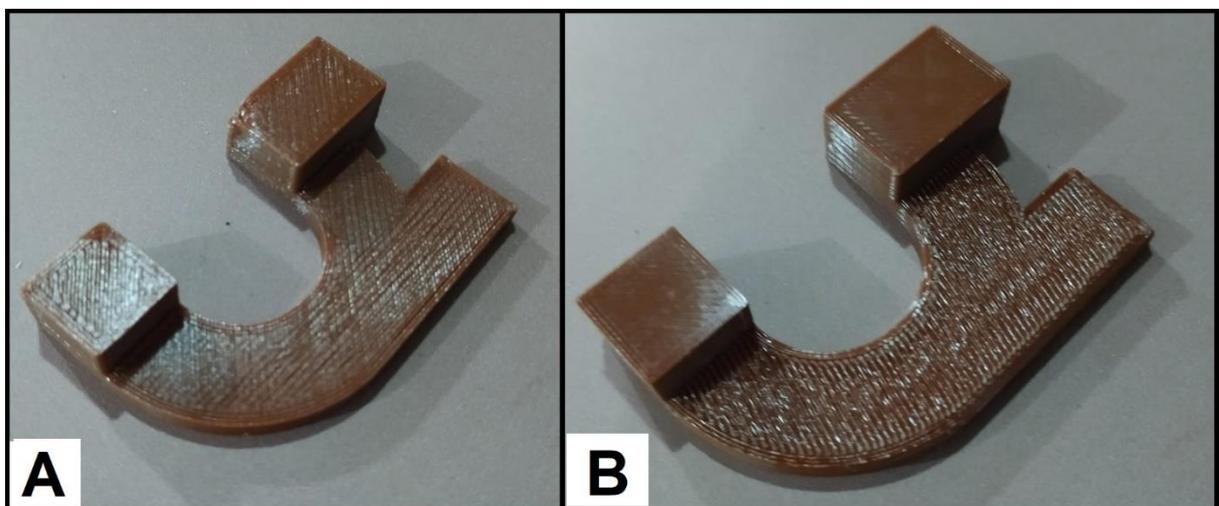
acabamento superficial da face que vai diretamente em contato com o suporte, como demonstra a Figura 39.

Figura 38 – Peça impressa utilizando materiais diferentes nas duas ferramentas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

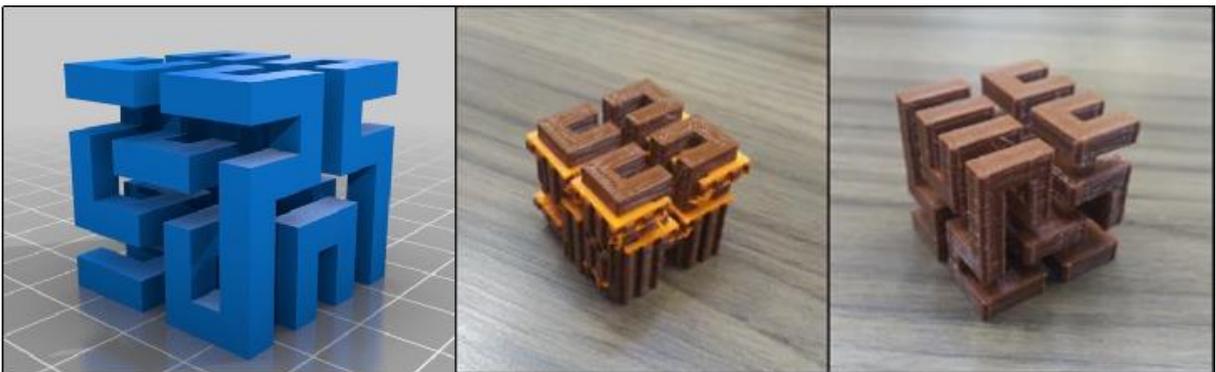
Figura 39 – Peça impressa com dois materiais distintos (A) e com o mesmo material (B).



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Posteriormente foi feita a impressão 3D do Cubo de Hilbert (Figura 40) nas mesmas configurações de ferramenta e material utilizadas anteriormente (peça em PLA e suporte em ABS). Este cubo é um modelo 3D formado por um único seguimento de seção quadrada que se interliga em mudanças de sentido de 90° formando um cubo de formato complexo, exigindo a utilização de suporte em vários locais de sustentação, o que forçou a máquina ao seu teste mais extremo, validando o processo de impressão 3D multimaterial / multiferramentas como um todo.

Figura 40 – Cubo de Hilbert impresso utilizando dois materiais diferentes.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

5 CONCLUSÃO

O intuito deste trabalho foi criar uma plataforma de manufatura aditiva capaz de realizar impressão 3D multimaterial sem os problemas apresentados pelos processos multimaterial atuais e com um custo bem menor do que a impressora multiferramentas atualmente comercializada. Como comparação, a impressora E3D Tool Changer custa em torno de R\$30.000,00 (sem taxas de importação), e este projeto ficou em torno de R\$8.000,00.

Para o desenvolvimento desta impressora, foram necessários conhecimentos de mecânica (processos de fabricação e metrologia), manufatura aditiva, eletrônica e programação, se provando como um trabalho complexo e inovador.

A criação da Estrutura Analítica de Projeto (EAP) possibilitou a organização e a visualização mais específica de todas as partes do projeto, o que viabilizou o desenvolvimento dos conceitos implementados de forma mais simplificada. Através da utilização do software de modelagem digital 3D SolidWorks® em parceria com a empresa Astroscience®, foi possível idealizar todo o projeto mecânico antes da montagem se iniciar, o que foi de suma importância na hora da montagem do equipamento, facilitando as adaptações técnicas que surgiram.

Os testes realizados de confiabilidade e alinhamento apresentaram resultados satisfatórios, proporcionando a impressão de peças com grande qualidade. Além disso, a impressão com dois materiais diferentes foi interessante no sentido de possibilitar as retiradas dos suportes sem grandes dificuldades.

A impressora idealizada neste trabalho utilizou apenas duas ferramentas, mas com os resultados obtidos e a metodologia desenvolvida, será possível utilizar até 5 ferramentas diferentes, abrindo a possibilidade de utilizar ferramentas não apenas de impressão 3D, mas de usinagem, gravação ou corte a laser, dentre outras. Portanto, novas possibilidades para auxiliar nos processos de prototipagem rápida foram criadas com o equipamento desenvolvido neste trabalho.

Como trabalhos futuros poderão ser feitas melhorias progressivas no equipamento, como é o caso de fechar as laterais e a parte superior da máquina para poder trabalhar com uma câmara aquecida, habilitando o uso de materiais que exigem temperatura de trabalho mais elevadas, como nylon, PEEK, Policarbonato, etc.

6 REFERÊNCIAS

ALL3DP, 2021. Disponível em: <all3dp.com>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2021.

BABEL, B. M.; MASSAR, C. J.; MATSCO, E. R.; DAY, J. **MATERIAL PROCESSING OF A HIPS/AC FDM FILAMENT FO WATER FILTRATION**. Worcester Polytechnic Institute. Worcester – United States of America, 2018

BARRIOS, J. M.; ROMERO, P. E. **IMPROVEMENT OF SURFACE ROUGHNESS AND HYDROPHOBICITY IN PETG PARTS MANUFACTURES VIA FUSED DEPOSITION MODELING (FDM): NA APPLICATION IN 3D PRINTED SELF-CLEANING PARTS**. Department of Mechanical Engineering, University of Cordoba. Cordoba – Spain, 2019.

BOULAALA, M.; ELMESSAOUDI, D.; BUJ-CORRAL, I.; EL MESBAHI, J.; EZBAKHE, O.; ASTITO, A.; EL MRABET, M.; EL MESBAHI, A. **TOWARDS DESIGN OF MECHANICAL PART AND ELECTRONIC CONTROL OF MULTI-MATERIAL/MULTICOLOR FUSED DEPOSITION MODELING 3D PRINTING**. Springer Nature, Londres, 2020.

CULPEPPER, M. L.; ARAQUE, C.; RODRIGUEZ M. **DESIGN OF ACCURATE AND REPEATABLE KINEMATIC COUPLINGS**. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts – Estados Unidos da América, 2002.

DABIC, D. A.; WHITTER, D.; SMYTH, L. **DESIGN AND PROTOTYPE OF A 3D PRINTER**. British Columbia Institute of Technology. Burnaby, British Columbia – Canada, 2019.

DUET, 2021. Disponível em: <duet3d.com>. Acesso em: 05 de setembro de 2020.

E3D, 2021. Disponível em: <e3d-online.com>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2021.

KRUIS, J. R. C. G. **DESIGN, ANALYSIS, TESTING AND APPLICATIONS OF TWO-BODY AND THREE-BODY KINEMATIC MOUNTS**. Programa de Doutorado em

Microsistemas e Microeletrônica, Faculdade de Engenharia, Ciência e Tecnologia, Escola Politécnica de Lausanne. Suíssa, 2016.

LATIF, K.; ADAM, A.; YUSOF, Y.; KADIR, A. Z. A. **A REVIEW OF G CODE, STEP, STEP-NC, AND OPEN ARCHITECTURE CONTROL TECHNOLOGIES BASED EMBEDDED CNC SYSTEMS.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021.

LEVINSKAS, L. **RESEARCH OF DIMENSIONAL ACCURACY AND SURFACE QUALITY DEPENDENCY ON PRINTING SPEED OF FDM 3D PRINTED PARTS.** Faculdade de Engenharia Mecânica e Design, Universidade Tecnológica de Kaunas. Lituânia, 2019.

LOFFLER, R.; KOCH, M. **INNOVATIVE EXTRUDER CONCEPT FOR FAST AND EFFICIENT ADDITIVE MANUFACTURING.** Department of Mechanical Engineering and Building Services Engineering, Technische Hochschule Nurnberg Georg Simon Ohm. Nuremberg - Germany, 2019.

MAXIMIANO, G. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO COREXY PARA IMPRESSORA 3D.** Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba - Brasil, 2015.

MAXWELL, J. C. **GENERAL CONSIDERATIONS CONCERNING SCIENTIFIC APPARATUS.** The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, ed. W. D. Nivens, Dover Press, 1890.

REPRAP, 2021. Disponível em: <reprap.org>. Acesso em: 18 de janeiro de 2021.

SIMPLIFY3D, 2021. Disponível em: <simplify3d.com>. Acesso em: 18 de janeiro de 2021.

SPIDERBOT, 2021. Disponível em: <spiderbot.eu>. Acesso em: 18 de de janeiro de 2021.

SWETHAM, J.; REDDY, K. M. M.; HUGGI, A.; KUMAR, M. N. **A CRITICAL REVIEW ON OF 3D PRINTING MATERIALS AND DETAILS OF MATERIALS USED IN FDM.**

Department of Mechanical Engineering, Vidya Jyothi Institute of Technology. Hyderabad – India, 2017.

TRADEMARKIA, 2021. Disponível em: <trademark.trademarkia.com>. Acesso em: 04 de março de 2021.