

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

VINÍCIUS CAMILO DA ROCHA

**INTEGRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MELHORIAS EM
IMPRESSORA 3D COM CINEMÁTICA DELTA INVERTIDA**

FLORIANÓPOLIS, 2022.

INTEGRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MELHORIAS EM IMPRESSORA 3D COM CINEMÁTICA DELTA INVERTIDA

VINÍCIUS CAMILO DA ROCHA

Esse trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Florianópolis, dezembro de 2022

Banca Examinadora:

Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr. Eng. (Orientador)



Leonardo Santana, Dr. Eng

Luiz Fernando Segalin de Andrade, Dr. Eng

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido Leonardo pela confiança e suporte.

À minha família que sempre acreditou e me ajudou.

Ao professor Aurélio da Costa Sabino Netto pela parceria e orientação deste trabalho e meus anos de bolsista do PET.

A todas as amigas que construí durante esses anos.

A todos os professores e servidores do IFSC que fizeram parte do meu desenvolvimento profissional e pessoal.

A todos os colegas que conheci durante minha caminhada.

RESUMO

A manufatura aditiva passa por um momento exponencial de crescimento, vem sendo descoberta como solução para muitos problemas. Sua aplicabilidade vai além da proposta inicial à prototipagem e meio industrial, sendo possível para construção civil, passando ainda pela medicina e serviços de customização. Uma das tecnologias mais populares é a extrusão de material, processo pelo qual o material é aquecido e extrudado através de um bico de diâmetro calibrado e depositado em uma plataforma onde a peça é fabricada por sucessivas camadas. Existe uma gama de materiais utilizados com esse método, os polímeros possuem forte aplicação e dentre eles há a família conhecida como polímeros de engenharia de alta performance, como o Politereftalato de etileno (PET), polieterimida (PEI) ou o poli-éter-éter-cetona (PEEK), essa família permite substituição de metais em algumas aplicações, porém são difíceis de serem processados em impressoras 3D comuns, pois requerem temperatura de trabalho (extrusão, mesa e câmara) elevados. Para a impressão dessa classe de materiais a configuração delta invertida se mostra promissora, pois nela temos a possibilidade de enclausuramento do conjunto mecânico e eletrônico da área de impressão, menor massa com a movimentação da mesa ao invés da estrutura para extrusão e ainda possuir o volume de impressão na parte superior próximo ao bico extrusor que concentra o ar aquecido. Uma máquina delta invertida já vinha sendo estudada e desenvolvida dentro da engenharia mecatrônica do IFSC e havia pontos de melhorias apontados em trabalhos anteriores, como a mecânica para evitar ondulações nas peças finais, alteração da mesa de fabricação com temperatura maior e ainda integração de sistema de aquecimento da câmara. O Objetivo do trabalho foi aplicar as melhorias necessárias para que se alcance os requisitos para impressão. Após as alterações realizadas na máquina e utilizando o ABS para impressão de peças e posterior medições e avaliações estatísticas da qualidade das peças impressas, foi aprimorado a precisão de $\pm 0,27$ mm para $\pm 0,08$ mm e a implementação de nova mesa de fabricação com temperatura de trabalho 180° C, a anterior era limitada a 100° C. Esses pontos são importantes para dar continuidade ao desenvolvimento da máquina para a impressão de polímeros de engenharia em alta temperatura e possibilita estudos que possam vir a ser aplicados com sua utilização.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Delta Invertida. Polímeros de engenharia.

ABSTRACT

Additive manufacturing is experiencing an exponential growth moment, it has been discovered as a solution to many problems. Its applicability goes beyond the initial proposal to prototyping and the industrial environment, being possible for civil construction, passing through medicine and customization services. One of the most popular technologies is material extrusion, a process whereby the material is heated and extruded through a nozzle with a calibrated diameter and deposited on a platform where the part is manufactured by successive layers. There is a range of materials used with this method, polymers have a strong application and among them there is the family known as high-performance engineering polymers, such as Polyethylene terephthalate (PET), Polyetherimide (PEI) or Poly-ether-ether -ketone (PEEK), this family allows the substitution of metals in some applications, but they are difficult to be processed in common 3D printers, as they require high working temperatures (extrusion, table and chamber). For the printing of this class of materials, the inverted delta configuration is promising, since it has the possibility of enclosing the mechanical and electronic assembly of the printing area, less mass with the movement of the table instead of the structure for extrusion and still having the volume of impression in the upper part next to the extruder nozzle that concentrates the heated air. An inverted delta machine was already being studied and developed within the mechatronics engineering of the IFSC and there were points of improvement pointed out in previous works, such as mechanics to avoid ripples in the final parts, alteration of the manufacturing table with higher temperature and even integration of a chamber heating. The objective of the work was to apply the necessary improvements to achieve the requirements for printing. After the changes made to the machine and using ABS for printing parts and subsequent measurements and statistical evaluations of the quality of the printed parts, the precision was improved from ± 0.27 mm to ± 0.08 mm and the implementation of a new manufacturing table with a working temperature of 180° C, the previous one was limited to 100° C. These points are important to continue the development of the machine for printing engineering polymers at high temperature and enable studies that may be applied with its use.

Keywords: Additive Manufacturing. Inverted Delta. Engineering polymers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pilares da indústria 4.0	10
Figura 2 - Tecnologias de MA mais utilizadas para polímeros	12
Figura 3 - Distinção da fabricação subtrativa e aditiva	15
Figura 4 - Etapas do processo de fabricação por manufatura aditiva	17
Figura 5 - Processo de extrusão de material	18
Figura 6 - Configurações de impressoras por extrusão de material	19
Figura 7 - Exemplo de impressora 3D de configuração cartesiana	19
Figura 8 - Patente de configuração delta	20
Figura 9 - TwinTeeth PCB Mini-Factory	21
Figura 10 - Exemplo de impressora 3D de configuração delta	21
Figura 11 – Movimentação de uma máquina delta	21
Figura 12 - Classificação dos materiais de engenharia	23
Figura 13 - Monômero cloreto de vinila e unidade de repetição do PVC	23
Figura 14 - Classificação dos polímeros de engenharia	25
Figura 15 - Impressora 3D Delta Invertida	27
Figura 16 - Alteração do rolamento linear do módulo de movimentação	28
Figura 17 - Alteração dos motores e acoplamento flexível	29
Figura 18 - Medição da tensão de referência do A4988	31
Figura 19 - Nova base de fabricação fixada por hastes	32
Figura 20 - Esquema elétrico da impressora 3D	33
Figura 21 - Interface do programa Repetier-Host V2.2.4	34
Figura 22 - Variáveis de movimentação da delta	36
Figura 23 - Parafuso de ajuste de fim de curso	38
Figura 24 - Parafuso de ajuste fino da mesa	38
Figura 25 - Arquivo STL “xyzCalibration_cube”	41
Figura 26 - Cubo de teste impresso em ABS	42
Figura 27 - Gráfico comparativo entre o valor nominal e cada eixo	44
Figura 28 - Arquivo <i>Configuration.h</i>	44
Figura 29 - Gráfico comparativo após calibração	45
Figura 30 - Corpos de prova conforme norma ASTM 5 638	46
Figura 31 - Peça projetada para teste de repetitividade	47
Figura 32 - Amostras fabricadas para teste de repetitividade	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características térmicas e mecânicas dos materiais	11
Tabela 2 - Temperaturas de trabalho de alguns polímeros	25
Tabela 3 - Distâncias medidas	39
Tabela 4 - Resultados coletadas dos cubos de teste	43
Tabela 5 - Resultados coletadas dos cubos de teste corrigida	45
Tabela 6 - Resultados coletadas dos corpos de prova em L	47
Tabela 7 - Análise dos valores obtidos nos corpos de prova em L	47
Tabela 8 - Resultados coletadas das peças nas diferentes seções	48
Tabela 9 - Coeficiente t de Student	50
Tabela 10 - Cálculos referente às quatro direções avaliadas	51
Tabela 11 - Cálculos referente à todas as medidas por seção	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	acrilonitrila butadieno estireno
A	Ampére
CAD	<i>computer aided design</i>
CAM	<i>computer aided manufacture</i>
CNC	comando numérico computadorizado
σ	desvio padrão
FDM	fabricação por deposição de material
FFF	fabricação por filamento fundido
KB	kilo bytes
$\bar{x}$	média aritmética
n	número de amostras
PET	politereftalato de etileno
PC	policarbonato
PFBMAT	Grupo de Pesquisa em Processos de Fabricação e Tecnologia dos Materiais
PLA	ácido polilático
PVC	policloreto de vinila
PEEK	Poli(éter-éter-cetona)
Re	repetitividade
STL	standard tessellation language
t	graus de liberdade
Td	tendência
V	Volt
Vn	valor nominal

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO	10
1.1. OBJETIVO	13
1.1.1. Objetivo Geral	13
1.1.2. Objetivos Específicos	13
1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Manufatura Aditiva	15
2.2. Processo por Extrusão de material	17
2.3. Configurações de cinemáticas de impressoras 3D	18
2.4. Materiais poliméricos	22
2.4.1. Polímeros de engenharia	24
3. DESENVOLVIMENTO	27
3.1. Impressora 3D Delta Invertida	27
3.2. Alterações mecânicas	28
3.3. Componentes utilizados para integração eletromecânica	29
3.3.1. Acionamento Mecânico	29
3.3.2. Fim de Curso	29
3.4. Componentes utilizados para integração eletroeletrônica	29
3.4.1. Placa processadora	29
3.4.2. Placa controladora	30
3.4.3. Módulos de acionamento	30
3.4.4. Módulo de potência	31
3.4.5. Sensores de temperatura	31
3.4.6. Extrusora para alta temperatura	32
3.4.7. Mesa aquecida	32
3.5. Integração dos componentes à máquina	33
3.6. Integração ao software	33
3.7. Configuração do firmware	35
4. Materiais e métodos	37
4.1. Altura máxima da impressora	37
4.2. Nivelamento da mesa	37
4.3. Quantidade de material extrudado	38
5. Resultados e discussões	41
5.1. Teste de impressão	41
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS	54

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Börsch-Supan, um macroeconomista alemão, propõe como solução para o aumento da produtividade e a riqueza econômica substituir o capital humano pela intensidade de capital tecnológico criando uma noção de “Indústria 4.0”. Entende-se como uma indústria 4.0 processos de manufatura super-flexíveis, onde sistemas automatizados e robôs altamente autônomos trabalhando em rede cooperam para produzir produtos complexos com produtividade consistentemente sustentada, gerando, assim, uma 4ª Revolução Industrial (Bock, T., 2015).

Um levantamento da Boston Consulting Group aponta os nove pilares da indústria 4.0 apresentados na Figura 1, um dos pilares é a manufatura aditiva (MA) que é caracterizada pelo emprego de equipamentos capazes de fabricar objetos através da adição de material, camada por camada, a partir de um modelo digital tridimensional (3D), usualmente obtido por meio do emprego de um sistema CAD (Computer Aided Design). Assim, tem-se o conceito de produção por adição de material em contraste à produção por métodos convencionais, em que a peça é obtida pela retirada de material, como a usinagem (RODRIGUES, 2017).

Figura 1 - Pilares da indústria 4.0



Fonte: Boston Consulting Group (BCG) (2018).

Uma das tecnologias de MA mais difundidas no mundo é o processo por extrusão de material, comumente citado pelas nomenclaturas de Modelagem por

Fusão e Deposição (FDM) e Fabricação por Filamento Fundido (FFF) com utilização de polímeros como acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e poli (ácido láctico) (PLA), com temperatura de impressão entre 170°C e 245°C.

Há uma gama de estudos sobre esta tecnologia para impressão de polímeros de engenharia. Mano (1995) define os plásticos de engenharia “como polímeros que podem ser usados para aplicações de engenharia, como engrenagens e peças estruturais, permitindo seu uso em substituição a materiais clássicos, particularmente metais”. Cita-se como exemplo o Politereftalato de etileno (PET), polieterimida (PEI) ou o poliéter-éter-cetona (PEEK), sendo estes com temperatura de trabalho na faixa de 240°C a 360°C, a Tabela 1 apresenta um comparativo entre características de alguns polímeros.

Tabela 1 – Características térmicas e mecânicas dos materiais

Característica	Polímero		
	PLA	ABS	PEEK
Resistência à tração	49,5 MPa	39,0 MPa	170 MPa
Resistência à flexão	103,0 MPa	70,5 MPa	118 MPa
Temperatura de extrusão	145-160°C	225-245°C	330-350°C

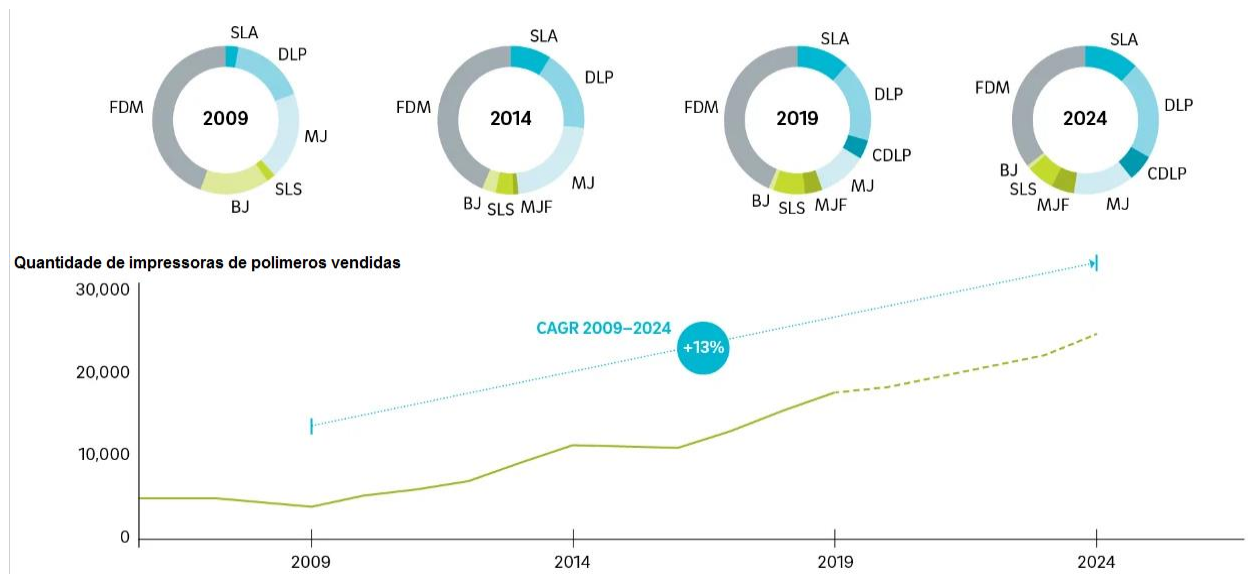
Fonte: TOMAZZETI (2019), dados de ULTIMAKER (2017) e POLYBRASIL (2018).

Entre essas diferentes tecnologias, materiais e serviços, o ponto em comum dentre diversas empresas que trabalham com elaboração de relatórios de análise de mercado para obtenção de idéias norteadoras para as empresas é a expansão da manufatura aditiva para entrar em novos mercados-alvo e alcançar novos usuários finais. O mercado de impressão 3D atingirá US\$ 41,1 bilhões em tamanho de mercado até 2033 por meio de vendas de hardware e materiais, segunda a IDTech Reserche (2022).

O relatório da Roland Berger de 2019 aponta o aumento da impressão 3D em polímeros, mudando permanentemente algumas indústrias. O PEEK na MA permite a produção de aparelhos auditivos personalizados, protetores bucais dentários, próteses e órteses, aumentando a qualidade de vida dos pacientes e melhorando os resultados médicos. Bens de consumo são apontados como outro setor com grande potencial.

A análise da empresa ainda aponta o processo por extrusão de material como a principal forma de impressão de polímeros para próximos anos partindo de uma análise da quantidade de impressoras dessa tecnologia vendidas desde 2009, como apresenta a Figura 2.

Figura 2 - Tecnologias de MA mais utilizadas para polímeros



Fonte: Adaptado de Roland Berger(2022).

Os pontos favoráveis do processo por extrusão de material são:

- Menor tempo de preparação (*Setup* da máquina);
- Fácil operação com a opção de utilizar em escritório, sem necessidade de chão de fábrica;
- Custo de material e maquinário menor em comparação às demais tecnologias, além da variedade de materiais disponíveis e em constante desenvolvimento.
- Disponibilidade de códigos e projetos disponíveis gratuitamente para fabricação caseira de novos equipamentos.

Os pontos desfavoráveis do processo por extrusão de material são:

- Há materiais suscetíveis a empenamento e delaminação, alguns não são possíveis de trabalhar em impressoras abertas de baixo custo;
- Precisão dimensional menor em relação a outros processos, como os que imprimem em pó metálico ou resina.

Uma revisão apresentada por WEYHRICH e LONG em 2022, discutiu esforços recentes para simplificar a utilização de polímeros de alta performance na manufatura aditiva. Suas posições únicas em mercados importantes, como as indústrias de saúde, automobilística e aeroespacial, levaram a discussões de três famílias, PSUs, PEEKs e PIs. A combinação de propriedades mecânicas e biocompatibilidade posicionaram o PEEK em o foco de aplicações relacionadas à odontologia, como implantes, próteses e ortodontia aponta (HALEEM, 2019) .

Porém essas famílias de polímeros trazem barreiras para as impressora mais comuns, pois necessitam de extrusor com temperatura de trabalho maior que as impressoras de baixo custo, além de enclausuramento da área de trabalho e controle de temperatura por serem mais suscetíveis ao descolamento da mesa e entre as camadas sobrepostas por conta do seu alto coeficiente de expansão térmica.

Com o desenvolvimento de um impressora 3D que possa trabalhar com os polímeros que exigem maiores temperaturas de trabalho, com a qualidade de fabricação e com um custo total de produção menor frente ao disponível no mercado, o trabalho mostra-se promissor para a comunidade da manufatura aditiva.

1.1. OBJETIVO

1.1.1. Objetivo Geral

Integração de melhorias necessárias à impressora 3D delta invertida para fabricação de peças em polímeros de alta temperatura.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Implementação das melhorias mecânicas, troca dos motores, acoplamento flexível e rolamento linear.
- b) Impressão de peças em ABS, para verificar a solução das ondulações.
- c) Avaliação dimensional das peças e repetibilidade da impressora 3D.
- d) Atualização da mesa aquecida com temperatura elevada.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O grupo de pesquisa em processos de fabricação e tecnologia dos materiais (PFBMAT) possui um grande foco na área de manufatura aditiva, principalmente com a tecnologia de extrusão de material e conta com diversas impressoras de diferentes cinemáticas, contribuindo para a realização de projetos com a comunidade acadêmica e científica do IFSC.

Fischer (2018) realizou os primeiros testes com polímeros de engenharia com uma extrusora de alta temperatura e observou a necessidade de enclausuramento da máquina para estabilizar a temperatura interna e possibilitar impressões desses polímeros, não havia máquina no laboratório que permitisse esse tipo de impressão.

Thomazetti (2019) deu início ao projeto de uma máquina delta invertida desenvolvida no laboratório PFBMAT, com o intuito de ser utilizada como uma impressora 3D por extrusão de material para materiais de alta temperatura que necessitam de um ambiente com temperatura controlada para evitar deformações na peça durante a fabricação e auxiliar na união entre camadas, além de maior capacidade de aquecimento do bico extrusor e da mesa de fabricação. Obteve sucesso em impressão de peças, porém foi identificado padrões ondulatórios nas faces das peças, necessidade de mesa com temperatura mais alta.

Feistauer (2020), definiu algumas melhorias a serem realizadas na impressora para que esta chegue ao objetivo final. Foi indicado os modelos de motor de passo, acoplamento flexível e rolamento linear, e ainda sugeriu outras melhorias que possam ser aplicadas futuramente.

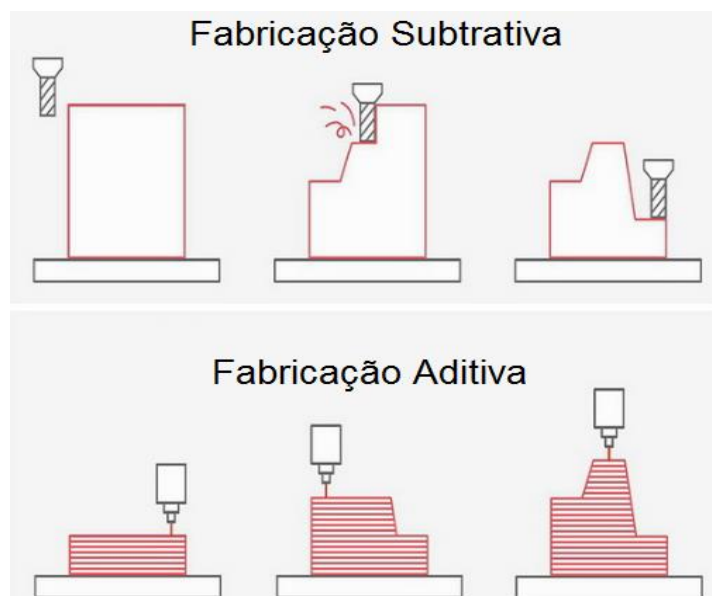
O presente trabalho propõe continuar o desenvolvimento da impressora 3D delta invertida, implementando as melhorias na impressora 3D com cinemática delta invertida para impressão de polímeros de engenharia que trabalham em alta temperatura. Ao âmbito da comunidade da manufatura aditiva sugerir uma configuração de cinemática que possa ser mais eficiente para esse tipo de material.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Manufatura Aditiva

A definição de Manufatura Aditiva, pela norma ASTM F 2792-12a, significa "processo de união de materiais para fabricação de objetos a partir de um modelo 3D, camada sobre camada, em oposição às tecnologias de fabricação subtrativa", a norma ainda traz como sinônimos: fabricação aditiva, processos aditivos, técnicas aditivas e fabricação de forma livre. Apresenta-se abaixo na Figura 3 a distinção entre processo de fabricação subtrativa que parte de um bloco primário e após usinagem para retirada de material chega-se à peça final, já a fabricação aditiva cria a peça a partir da adição do material de forma ordenada para a obtenção da peça final.

Figura 3 - Distinção da fabricação subtrativa e aditiva



Fonte: Adaptado Createproto (2022).

Desde a década de 80 mais de vinte diferentes técnicas de manufatura aditiva foram desenvolvidas, dentre as quais se cita a estereolitografia (SL) desenvolvida pela empresa 3D Systems, a modelagem por fusão e deposição (FDM) pela empresa Stratasys, a cura sólida na base (SGC) elaborada pela empresa Cubital, a manufatura de objetos em lâminas (LOM) pela empresa Helisys, a sinterização seletiva a laser (SLS) da antiga empresa DTM, entre outras (WOHLERS REPORT, 2014).

Havia uma carência de categorização para agrupar as tecnologias. A norma ASTM F 2792-12a compila as tecnologias de MA distinguindo em 7 grupos:

- a) processo de jateamento de ligante no qual um agente de ligação líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó.
- b) deposição de energia direcionada, processo de manufatura aditiva no qual a energia térmica focalizada é usada para elevar a temperatura dos materiais e permitir a modelagem à medida que são depositados. Energia térmica focada significa que uma fonte de energia (por exemplo, laser, feixe de elétrons ou arco de plasma) é focada para alterar o estado dos materiais para semi líquido ou pastoso e após serem depositados.
- c) extrusão de material, o material é depositado seletivamente através de um bocal ou orifício.
- d) jateamento de material, processo no qual gotículas de material de construção são depositadas seletivamente. Exemplos de materiais incluem fotopolímero e cera.
- e) fusão em leito de pó, processo de manufatura aditiva no qual a energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó.
- f) laminação de folha, folhas de material são unidas para formar um objeto.
- g) fotopolimerização de cuba, o fotopolímero líquido em uma cuba é curado seletivamente por polimerização ativada por luz.

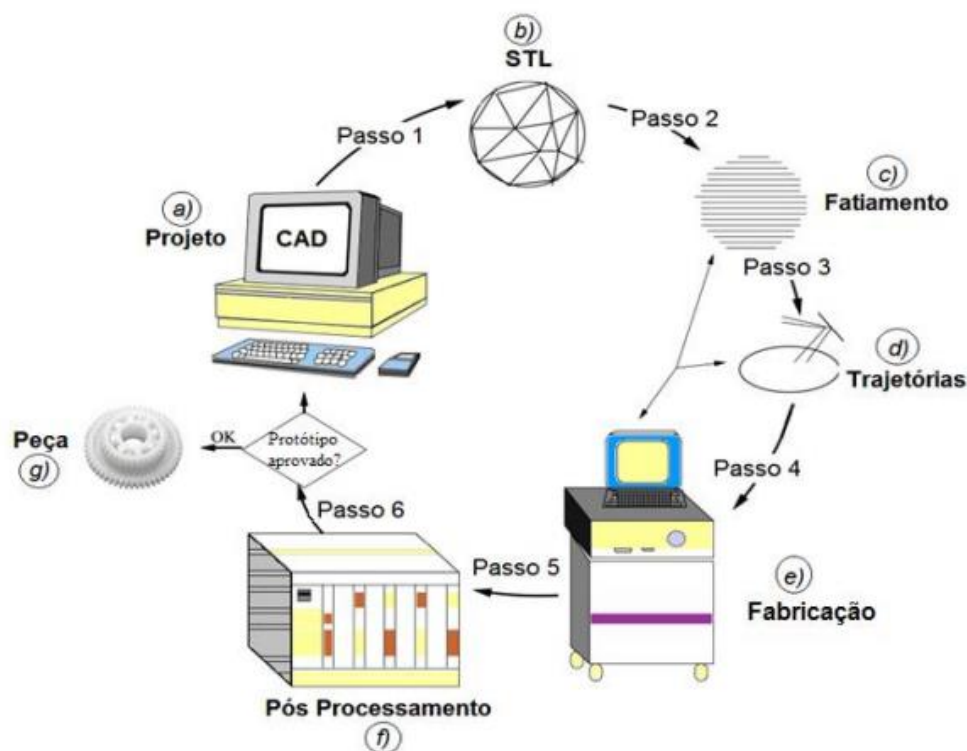
Esses grupos são úteis para fins educacionais e de desenvolvimento de padrões e destinam-se a esclarecer quais tipos de máquina compartilham semelhanças, as categorias de processo permitem discutir uma categoria de máquinas, em vez de precisar explicar uma extensa lista de variações comerciais de uma metodologia de processo.

Conforme especifica Leite et al. (2011), algumas etapas básicas formam o processo por extrusão de material e podem ser vistas na Figura 4, conforme as seguintes descrições:

- a) modelagem CAD;

- b) conversão para STL;
- c) fatiamento em camadas;
- d) geração do programa de processamento;
- e) fabricação do objeto;
- f) pós-processamento;
- g) peça fabricada.

Figura 4 - Etapas do processo de fabricação por manufatura aditiva



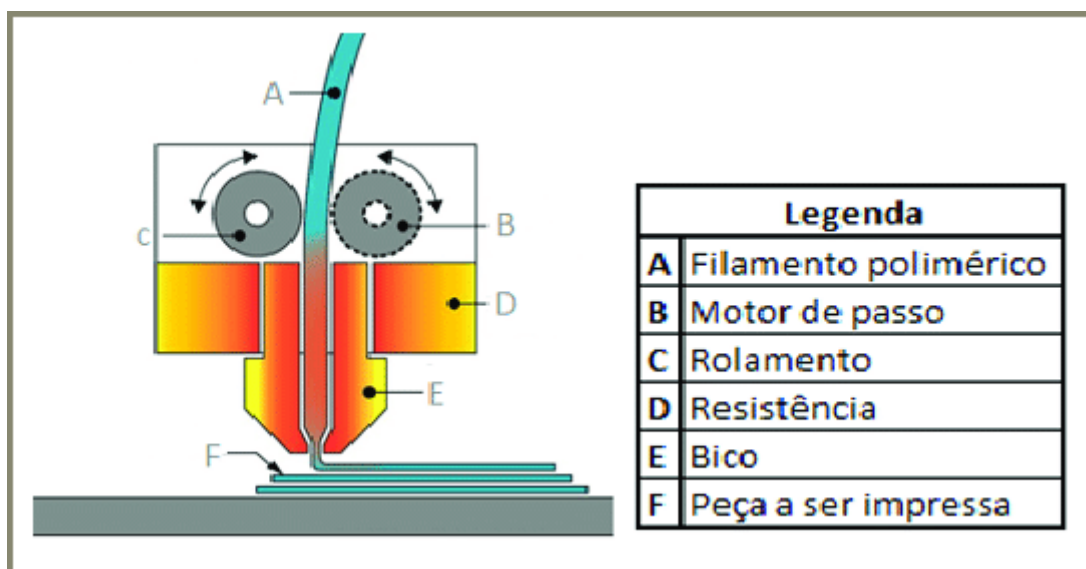
Fonte: Adaptada de Pandey, Reddy e Dhande, (2003).

2.2. Processo por Extrusão de material

Como já posto, a norma ASTM define o processo de extrusão de material onde ocorre a deposição de material através de um orifício de forma seletiva, o tema engloba os processos FDM (*Fused Deposition Modeling*) ou FFF (*Fused Filament Fabrication*). O processo em si, pode ser aplicado em diferentes áreas, alimentícia com a extrusão de chocolate, na construção civil com depósito de concreto para construir casas, e principalmente e mais utilizado na fabricação de peças em material polimérico.

O processo com a utilização de polímeros como matéria prima ocorre a partir do filamento que é tracionado por um motor de passo acoplado a um elemento ranhurado que com um apoio de um rolamento que gira livremente ou até uma peça fixa direciona o material até o bico. O material então é aquecido por uma resistência fazendo-o atingir um estado semi líquido ou pastoso para que possa ser extrudado através do bico e depositado na mesa de fabricação, para melhor entendimento é apresentado na Figura 5 o processo.

Figura 5 - Processo de extrusão de material

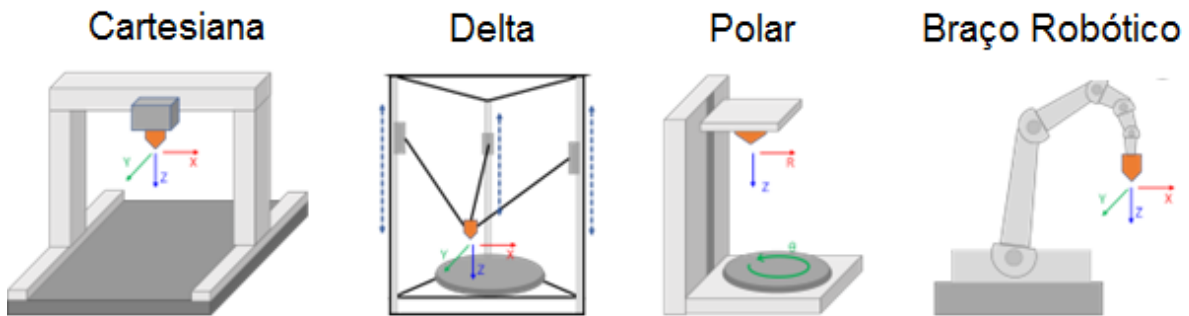


Fonte: Adaptado JON (2016).

2.3. Configurações de cinemáticas de impressoras 3D

Existem diversas opções de configurações cinemáticas entre as impressoras 3D, pode-se citar como exemplos cartesiana, core xy, delta, polar, braço robótico e novos sistemas de impressão estão sendo constantemente desenvolvidos, alguns são apresentados na figura 6 (Fabweaver, 2022).

Figura 6 - Configurações de impressoras por extrusão de material



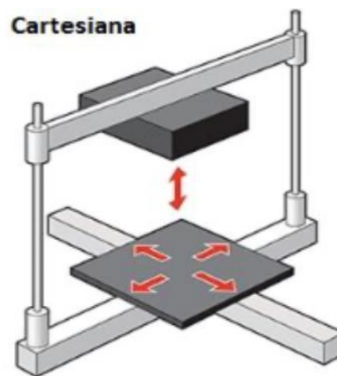
Fonte: Adaptado de Fabweaver (2022).

Dois dos tipos mais populares de sistemas de impressão são cartesiano e delta:

a) Configuração Cartesiana

Na configuração cartesiana, Figura 7, há um conjunto mecânico para acionamento de cada um dos eixos X, Y e Z, possuindo volume de impressão cúbico, com ponto inicial do sistema (0,0,0) começando em um dos cantos inferiores e os valores crescem em ambos os eixos (BELL,2015).

Figura 7 - Exemplo de impressora 3D de configuração cartesiana

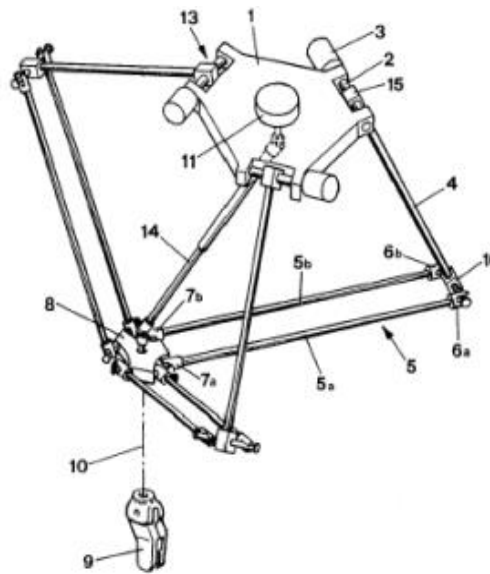


Fonte: adaptado de Bell (2015).

b) Configuração Delta

O robô de configuração delta (Figura 8) surgiu no início dos anos 80, criado pelo professor da Escola Politécnica Federal de Lausanne, na Suíça, Reymond Clavel (BONEV, 2001). A ideia foi utilizar paralelogramos para construir um robô paralelo com quatro graus de liberdade, três translacionais e um rotacional, o qual foi batizado de Delta. (PESSINA, 2013).

Figura 8 - Patente de configuração delta.



Fonte: Patentes US nº 4.976.582.

A arquitetura de um robô é definida pela forma como se movem suas estruturas cinemáticas e seus respectivos atuadores. Robôs delta possuem cadeia cinemática paralela, onde os atuadores precisam trabalhar em conjunto para atingir a movimentação esperada, pois um atuador influencia no outro (TOMEI, 2015, p. 13).

A máquina desenvolvida por Thomazetti foi inspirada em um projeto de código aberto do grupo DIYouware denominado *Twin Teeth PCB Mini-Factory*. O projeto da TwinTeeth (Figura 9) consiste em uma máquina de configuração delta invertida capaz de realizar vários processos, tais como usinagem, impressão 3D, deposição de material pastoso entre outros (Thomazetti, 2019).

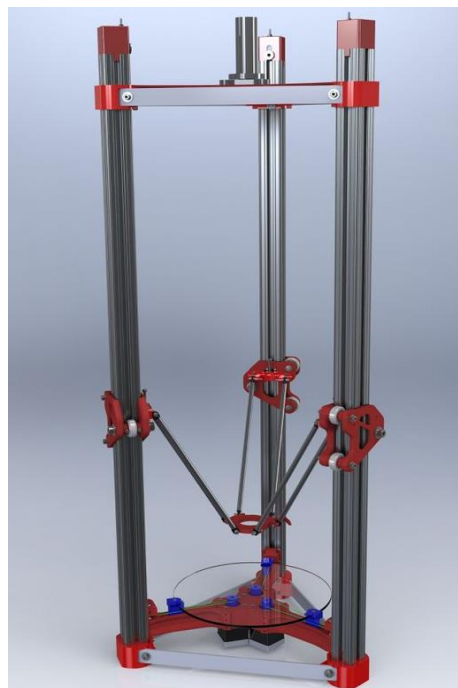
Figura 9 – TwinTeeth PCB Mini-Factory



Fonte: DIYOUWARE (2019)

As impressoras 3D do tipo delta invertida possuem volume de impressão cilíndrico e o ponto inicial do seu sistema (0, 0, 0) encontra-se ao centro e o topo do cilindro. Assim, os valores de X e Y são simétricos, ou seja, vão de -X à +X e de -Y à +Y, e apenas o eixo Z varia de zero até o valor máximo.

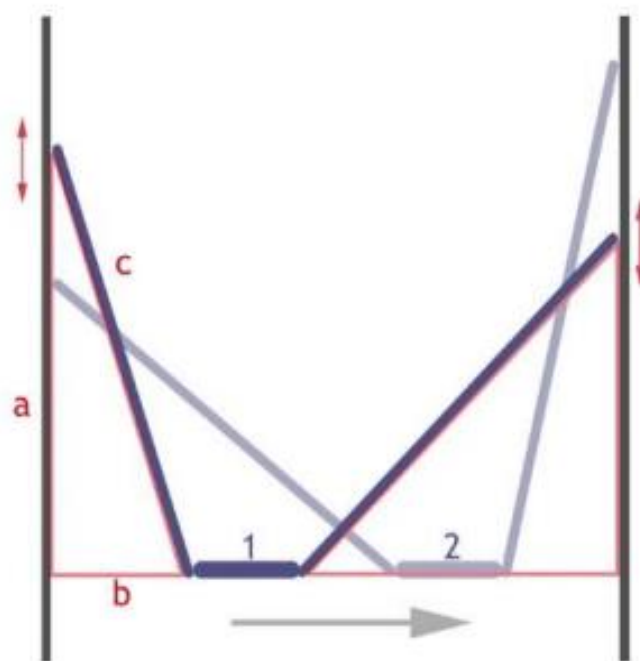
Figura 10 - Exemplo de impressora 3D de configuração delta



Fonte: Grabercars (2012).

Esse tipo de impressora apresenta três atuadores posicionados verticalmente e equidistantes em torno de um círculo, ao contrário das impressoras cartesianas, em que os atuadores estão paralelos a cada um dos três planos ortogonais. Através do controle dos atuadores, é possível enviar o bico extrusor para qualquer ponto do volume de impressão. A movimentação é composta pelo posicionamento de cada eixo, formando um triângulo retângulo (Figura 11) entre a hipotenusa (haste de fixação) (c) e a linhas imaginárias verticais e horizontais como catetos, as linhas horizontais (b) dos três triângulos movimentam-se em conjunto ligados pelo efetuador (1), somente os tamanhos verticais (a) são variáveis, garantindo três graus de liberdade à máquina (BELL, 2015).

Figura 11 - Movimentação de uma máquina delta

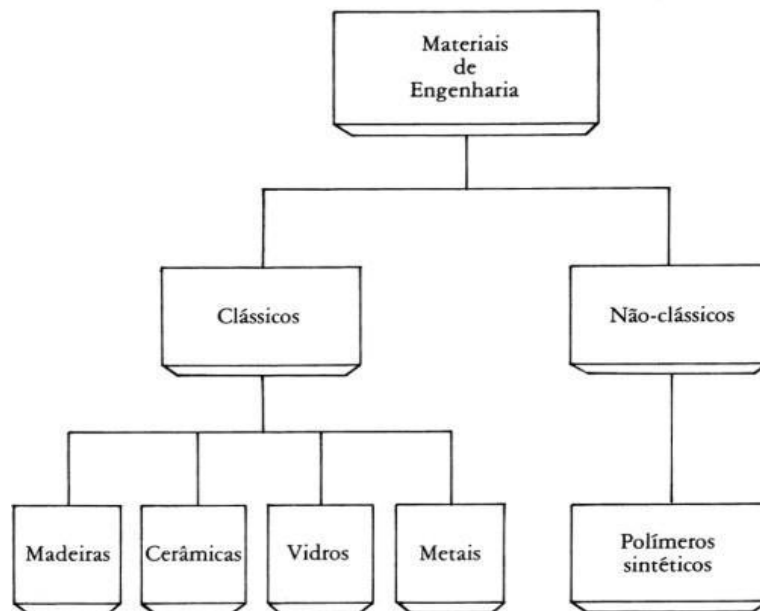


Fonte: CNC Cookbook (2019).

2.4. Materiais poliméricos

Dentre os diversos materiais que são utilizados na engenharia como mostra a Figura 12, a manufatura aditiva pela tecnologia de extrusão de material, é principalmente utilizada com a classe dos polímeros.

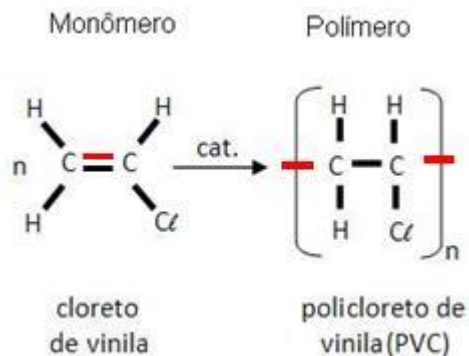
Figura 12 - Classificação dos materiais de engenharia



Fonte: MANO (2019).

Polímeros (poli: muitos, mero: partes) são macromoléculas, moléculas de alto peso molecular por conta das repetições de estruturas menores. Podem ser encontrados na natureza como seda, celulose, fibra de algodão, ou mesmo criados sinteticamente como o politereftalato de etileno (PET) ou policloreto de vinila (PVC) (Figura 13). Os polímeros podem variar de classificação de acordo com a forma molecular, encadeamento das unidades, arranjo dos átomos e estrutura química, classificações estas que representam diferentes propriedades físicas no material resultante (LUCAS; SOARES; MONTEIRO, 2001).

Figura 13- Monômero cloreto de vinila e unidade de repetição do PVC



Fonte: FOGAÇA, 2018.

Os polímeros podem ser divididos em duas classes, amorfos e cristalinos. As cadeias de um polímero no estado sólido podem estar dispostas em um estado desordenado, enoveladas ao acaso, formando um polímero amorfo; ou alinhadas, formando um registro regular no espaço, com periodicidade determinada, formando um polímero contendo cristalinidade (AKCELRUD, 2007).

Os polímeros que apresentam linearidade molecular são classificados como termoplásticos, ou seja, permitem sucessivos reprocessamentos mediante aplicação de calor suficiente à fusão do mesmo (BATHISTA; SILVA, 2003, p.11).

2.4.1. Polímeros de engenharia

Por definição, polímeros de engenharia são polímeros que possuem características capazes de substituir materiais clássicos de engenharia, em particular o aço, podendo atuar como engrenagens ou peças estruturais. (MANO, 2019)

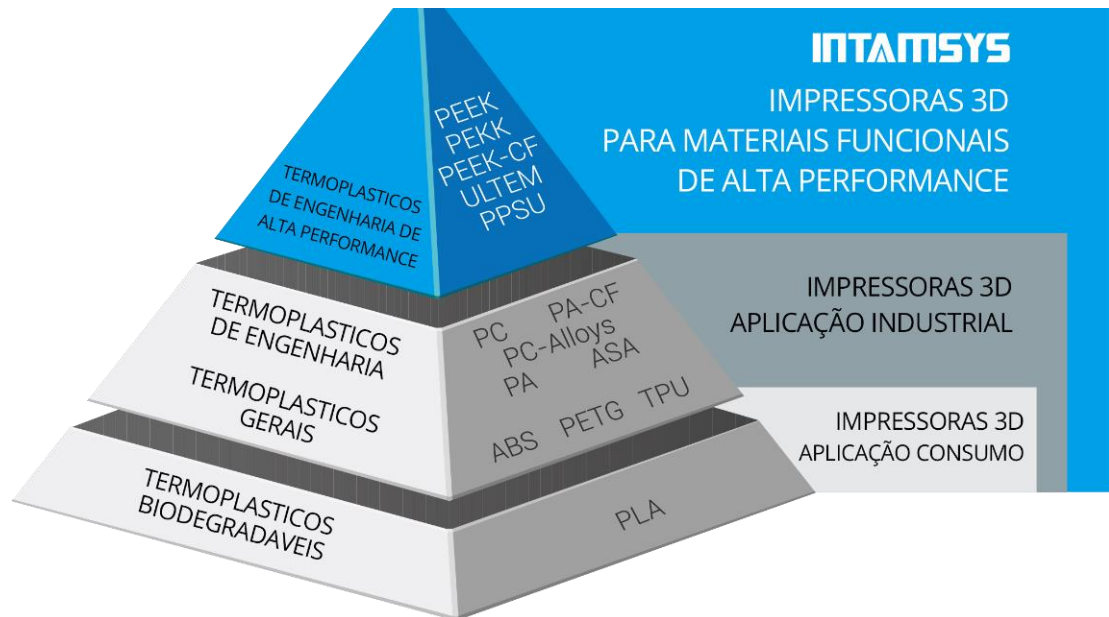
De acordo com ARNOLD (2007) um dos mais utilizados é a poli(aril éter éter cetona) ou PEEK, um polímero semicristalino com um ponto de fusão de cerca de 340 °C e possui uma combinação entre resistência, rigidez e tenacidade com boa resistência química e desempenho de alta temperatura.

No mundo da impressão 3D FDM/FFF existe desde há uns anos uma família de materiais que destaca claramente acima de todos, a família PAEK (polyaryletherketone ou poliaril éter cetona). Os materiais que pertencem a esta classe são plásticos semi-cristalinos, que resistem a altas temperaturas (cerca de 200 °C) mantendo altos valores de resistência mecânica. Dentro da família PAEK existe o PEEK, o PEKK e o PEI (ULTEM 1010 e ULTEM 9085). Todos estes apresentam alta resistência mecânica, resistência química e alta temperatura de inflamabilidade.

Na figura 14, a empresa INTAMSYS apresenta um esquema com alguns polímeros. Pela base temos o PLA, um dos mais utilizados principalmente por conta da facilidade de utilização sendo que a maior parte dos modelos de impressoras permitem sua impressão, além de ser biodegradável. Já no nível de impressoras com

aplicação industrial temos ABS, PETG, que trabalham com temperaturas um pouco mais elevadas, no topo da pirâmide encontramos a família PEEK, com temperatura de trabalho no bico extrusor acima dos 350°C e temperatura da mesa acima dos 130°C, além da necessidade de aquecimento da câmara.

Figura 14 - Classificação dos polímeros de engenharia



Fonte: Intamsys (2019).

De acordo com a Tabela 2 abaixo é apresentado o comparativo entre as temperaturas de impressão entre os principais polímeros.

Tabela 2 - Temperaturas de trabalho de alguns polímeros

Material	Bico extrusor (°C)	Mesa (°C)	Câmara (°C)
PLA	180 - 215	60	não necessita
ABS	230 - 260	95 - 110	50
PETG	230 - 270	90	50-70
PA (Nylon)	250 - 270	75 - 90	90-100
PEEK	365 - 440	133	133 - 160

Fonte: Elaboração própria, com Dados de Prusa Research, MiniFactory, AON3D, Simplify3D, 3D native.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Impressora 3D Delta Invertida

A máquina delta invertida desenvolvida no PFBMAT (Figura 15) foi construída justamente com o intuito de ser utilizada como uma impressora 3D por extrusão de filamento para materiais de alta temperatura, por essa razão tem como principais diferenças do projeto inspirador a maior robustez na estrutura e o enclausuramento das partes eletroeletrônicas e da área de trabalho.

Figura 15 – Impressora 3D Delta Invertida
Esquerda - Parte externa; Direita - Parte Interna

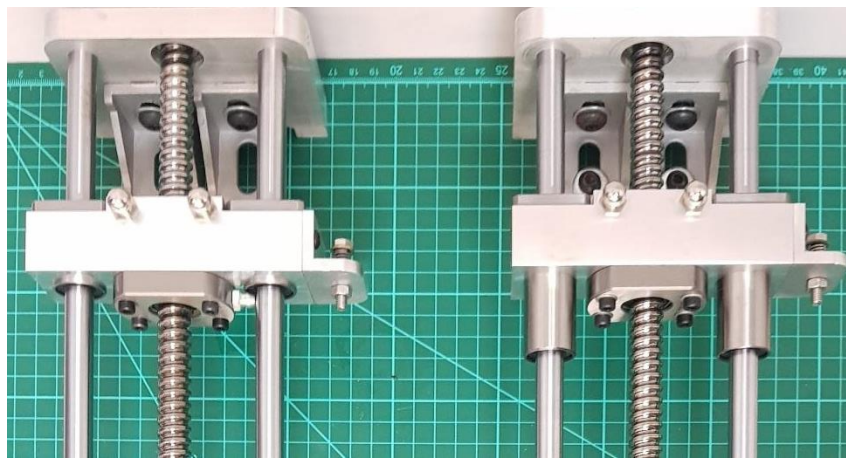


Fonte: acervo próprio (2022)

3.2. Alterações mecânicas

A atualização na máquina iniciou-se pela troca dos rolamentos lineares das guias de movimentação, Figura 16, pois observou-se inicialmente folgas nos carros que ocasionava em um grau de rotação perpendicular ao plano de movimentação, o rolamento modelo anterior era o LME12UU com apenas 22 mm e realizou-se a troca para um o rolamento linear longo LMEK12LUU com 57 mm de comprimento indicado por Feistauer em 2020.

Figura 16 – Alteração do rolamento linear do módulo de movimentação.

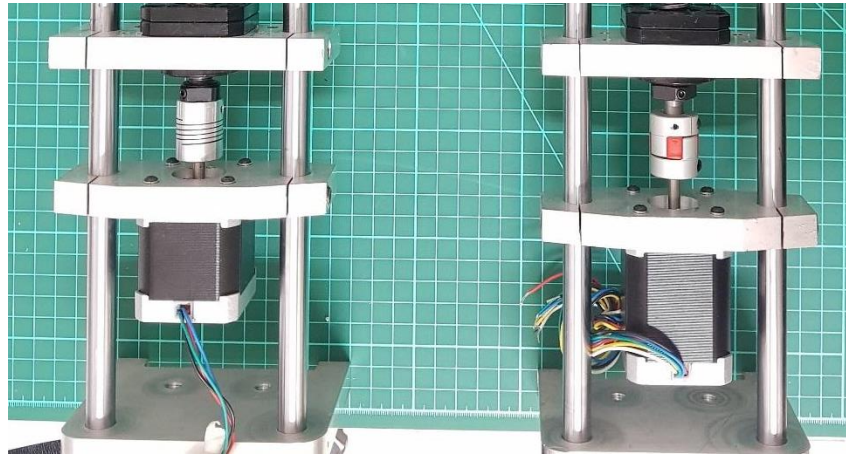


Fonte: Acervo próprio (2022).

Segundo informações da Kalatec Automação (2020), os acoplamentos flexíveis corrigem o desalinhamento da máquina, evitando a propagação de vibração e seus impactos, os quais podem prejudicar os resultados esperados. O acoplamento flexível utilizado anteriormente era de baixa qualidade feito inteiramente em alumínio como pode ser visualizado na figura ao lado esquerdo e possuía uma resposta ao movimento menor. Foram implementados nos módulos de movimentação o novo acoplamento flexível modelo ADS da Kalatec Automação, composto por duas peças em alumínio e um elemento de transmissão feito em elastômero vermelho com dureza

PU 90 Shore, possui uma resposta mais rápida e gerando menos deformação, pode-se observar na Figura 17 ao lado direito em vermelho e prata.

Figura 17 – Alteração dos motores e acoplamento flexível.



Fonte: Acervo próprio (2022).

3.3. Componentes utilizados para integração eletromecânica

3.3.1. Acionamento Mecânico

Como acionamento dos módulos lineares de movimentação, Alterou-se os motores de passo para o NEMA 17 de 6,5 kgf.cm da marca *Vurtz Motors* modelo VZS1760-065-1206, apresentado na figura 15 ao lado direito, que possui 200 passos por revolução e necessita de aproximadamente 1,2A para acionamento.

3.3.2. Fim de Curso

Foram mantidas as mesmas chaves implementadas modelo KW11-7 com alavanca de 27 mm e capacidade para chavear tensões de até 250V a corrente de até 16A.

3.4. Componentes utilizados para integração eletroeletrônica

3.4.1. Placa processadora

Manteve-se o Arduino modelo MEGA 2560 R3 que possui um microcontrolador ATmega2560. Possui 256 kB (kilobytes) de memória flash para armazenar programas e configurações, 8kB de RAM (*Random Access Memory*) para

processamento de comandos em até 16 MHz (MegaHertz), juntamente com um grande número de entradas e saídas digitais e analógicas, protocolos de comunicação I2C (*Inter- Integrated Circuit*) e SPI (*Serial Peripheral Interface*), 4 canais de comunicação serial e regulador de tensão de alimentação de entrada.

3.4.2. Placa controladora

Utilizou-se a placa controladora Ramps versão 1.4 própria para impressoras 3D facilitando a integração ao arduino mega 2560 e os módulos de acionamento dos motores, além de conter as entradas e saídas necessárias para os demais recursos como os sensores de temperaturas, os fins de curso, e afins.

3.4.3. Módulos de acionamento

Utilizou-se os *drivers* de motor de passo A4988 da marca Pololu por serem de baixo custo e fornecerem 1A (Ampere) por fase em uso contínuo e 2A de corrente de pico, para a utilização dos novos motores houve a necessidade de adequar a tensão de referência (V_{ref}) do driver.

A corrente máxima ($I_{máx}$) encontrada no *datasheet* do motor é de 1,2 A e a resistência (R) 0,1 ohm de acordo com o resistor do Driver A4988, então calculou-se o valor através da equação 1:

$$V_{ref} = I_{máx} \times 8 \times R \quad \text{Equação (1)}$$

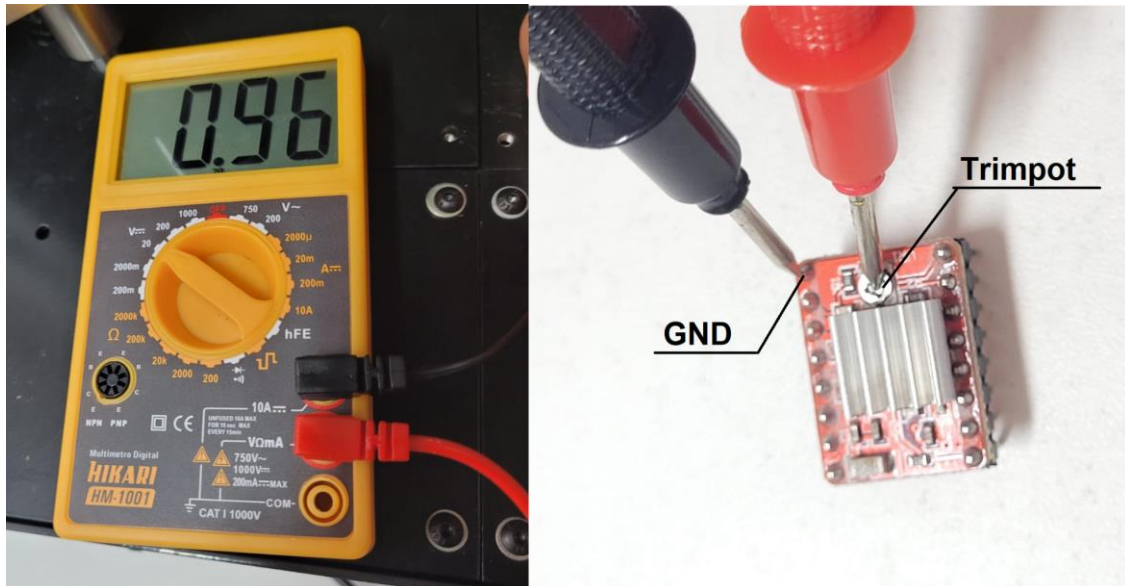
$$V_{ref} = 1,2 \times 8 \times 0,1$$

$$V_{ref} = 0,96 \text{ V}$$

Para atualizar o valor da tensão, primeiramente utilizou-se um multímetro digital da marca Hikari modelo HM-1001 para verificar a tensão de referência no driver, com a ponta de prova preta ligada ao borne COM (Terra/Negativo), a ponta de prova vermelha ligada ao borne do meio e a chave seletora na posição para tensão contínua até 20 V, com a placa controladora ligada ao notebook através do cabo usb, para que houvesse energia sendo recebida no drive permitindo a medição da tensão. As pontas de testes foram aplicadas com mostra a figura 16 lado direito, a ponta preta no pino GND do driver e a ponta vermelha do trimpot (potenciômetro em miniatura na placa eletrônica que permite ser ajustado), caso a tensão medida

não seja a calculada, com o auxílio de uma chave de fenda pequena, faz-se o ajuste rotacionando o trimpot e repetindo a medição, foi refeito o procedimento até alcançar o valor desejado como apresenta a Figura 18 no lado esquerdo.

Figura 18 – Medição da tensão de referência do A4988



Fonte: acervo próprio (2022).

3.4.4. Módulo de potência

A placa controladora Ramps possui *mosfets* para gerenciar a potência fornecida aos aquecedores, porém são projetados para trabalho com 40W, ou seja, 3,5A a 12V (Volts). Como o extrusor utilizado possui 100W (8,5A a 12V) de potência, optou-se por utilizar módulos periféricos de *mosfets* da marca MFT que permitem trabalhar com correntes de até 25A, deixando a cargo da Ramps somente o controle da alimentação por PWM (traduzido como Modulação por largura de pulso).

3.4.5. Sensores de temperatura

Para monitoramento da temperatura da mesa aquecida utilizou-se um termistor NTC de 100k Ω com encapsulamento de vidro, que suporta temperaturas de até 300°C. Já para o extrusor que alcança 400°C, optou-se por utilizar um termopar tipo K com capacidade de leitura de até 800°C em conjunto com um módulo MAX6675 que, além de corrigir a linearidade da leitura, possui conversor analógico-digital de 12 bits que garante uma resolução de 0,25°C (MAXXIM, 2002).

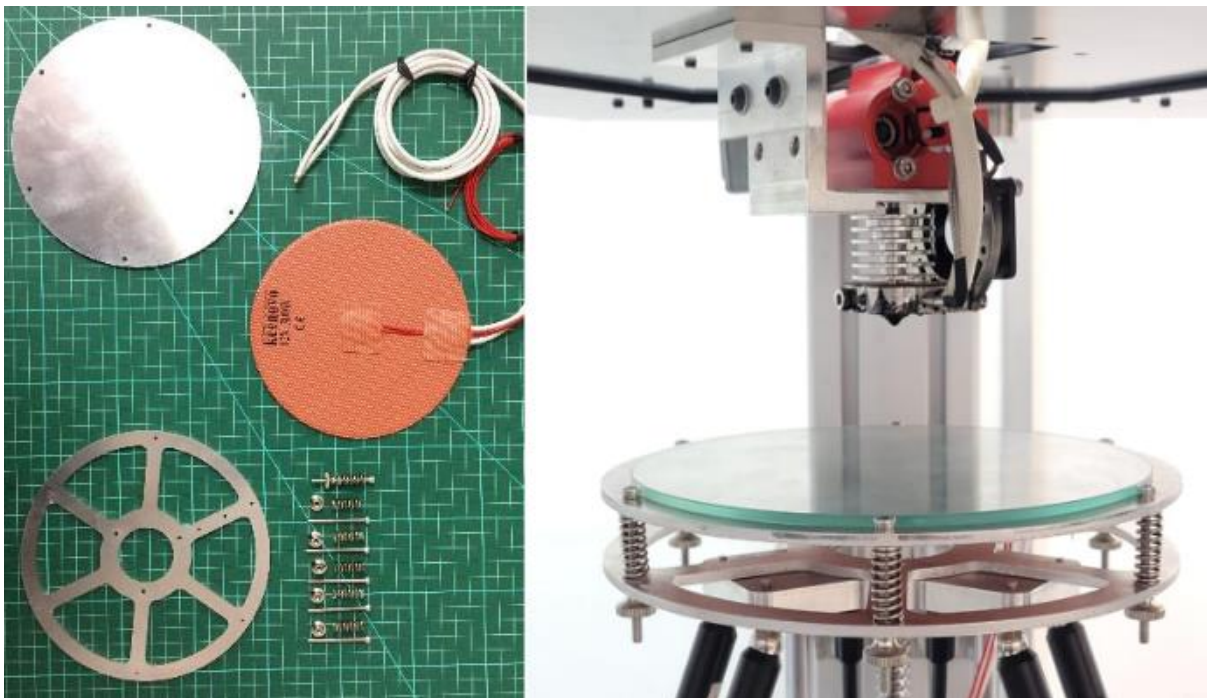
3.4.6. Extrusora para alta temperatura

A máquina é equipada com o extrusor da marca Micron E.M.E modelo Cobra Extruder, que trabalha de forma direta com o filamento ao invés do tipo *bowden*, que trabalha em 12V e possui 100W de potência, fornecendo até 400 °C. O conjunto conta com um motor com redução planetária de 1:13 e possui um *cooler* integrado para resfriar o dissipador que separa o extrusor e o bico extrusor de 0,5mm.

3.4.7. Mesa aquecida

Utilizou-se uma mesa aquecida redonda modelo Keenovo de 220 mm de diâmetro e funcionamento em 24V. Tal mesa utiliza-se da sua resistência para aquecer a superfície, consumindo até 8A e alcançando 180°C, esse modelo é levemente maleável e autocolante, foi colada em uma chapa de alumínio e presa ao suporte, onde as hastes de sustentação são conectadas, com parafusos e mola melhorando a usabilidade para o nivelamento da mesa. O conjunto é apresentado na Figura 19 abaixo tanto suas peças separadas quanto a montagem na máquina.

Figura 19 – Nova base de fabricação fixada por hastes



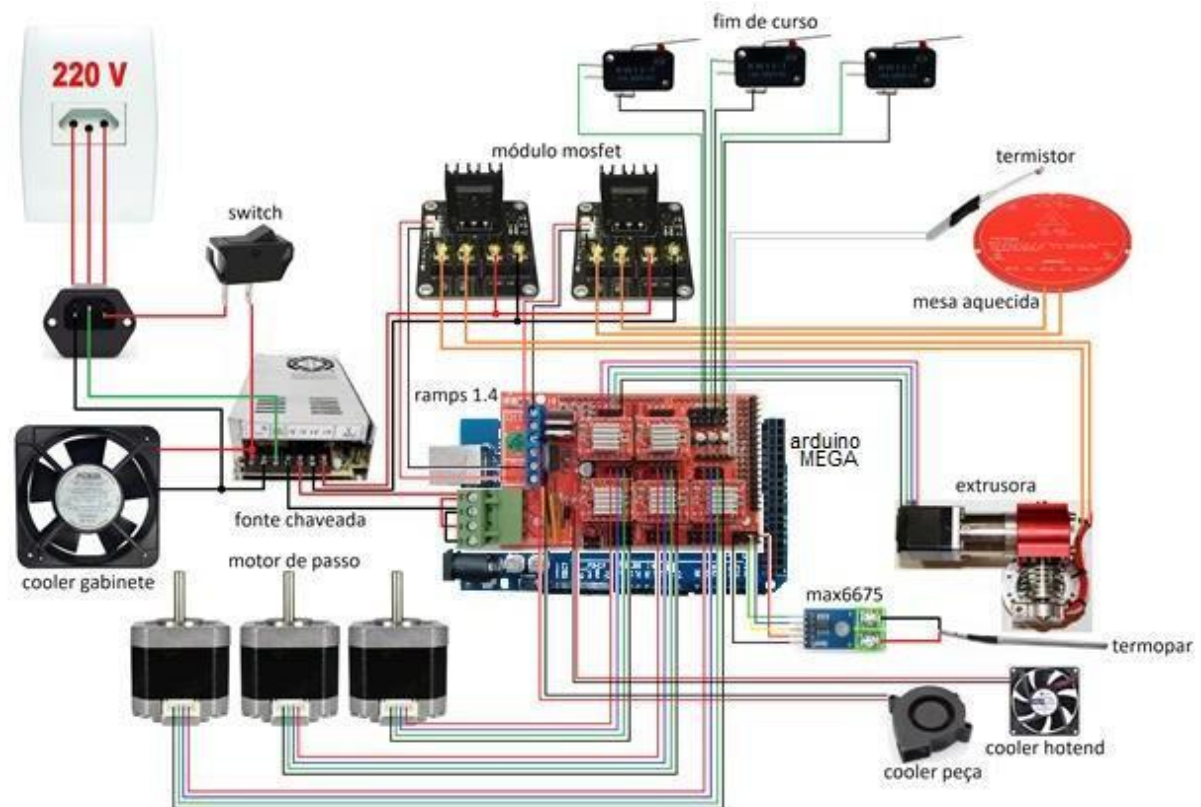
Fonte: Acervo próprio (2022).

Com atualização para a nova mesa possibilita o trabalho com polímeros que necessitem de temperaturas mais elevadas que a mesa anterior não era capaz de fornecer, foi um ponto de melhoria apontado por Thomazetti em 2019, o modelo foi indicado por Feistauer em 2021

3.5. Integração dos componentes à máquina

A eletrônica (Figura 20) necessária para o acionamento da impressora 3D se manteve, foram realizadas algumas correções em conexões que apresentavam mau contato. Os motores por serem novos não haviam o conector na ponta para ligar na placa, logo foi preciso realizar as conexões necessárias.

Figura 20 - Esquema elétrico da impressora 3D



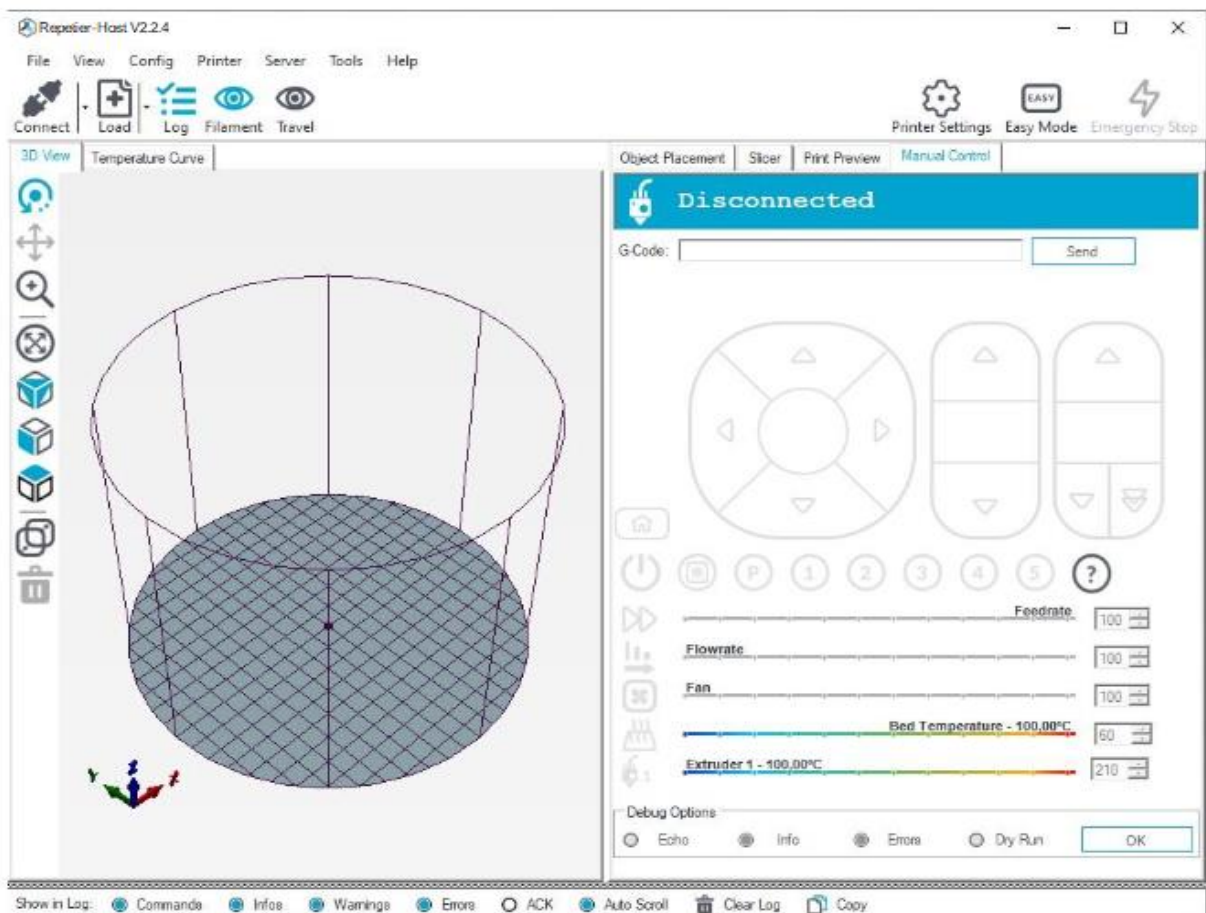
Fonte: Thomazetti (2019).

3.6. Integração ao software

Repetier-Host Versão 2.2.4 (Figura 21), é um software gratuito para controle de impressoras 3D que facilita a realização de testes de movimentação e permite a

configuração personalizada como a área de trabalho, tamanho da mesa, velocidade de comunicação serial, o tipo de configuração cinemática e muito mais ideal para impressoras de fabricação própria. Além de já ser integrado aos programas de fatiamento de peças Slicer e CuraEngine, que geram o código G para fabricação da peça a partir do modelo em STL.

Figura 21 – Interface do programa Repetier-Host V2.2.4



Fonte: Elaboração própria (2022).

Configurou-se a máquina seguindo os parâmetros de Thomazetti em 2019. Em “*config/printer settings*”, na aba “*connection*” selecionou-se o *Baud Rate* 250000 como configurado no *firmware*. O protocolo de transferência e o número da porta serial permaneceram como detecção automática.

Na aba “*printer*” definiu-se as velocidades de deslocamento de viagem e do eixo Z como 1500mm/min e as temperaturas padrão para o extrusor e para a mesa, 230°C e 75°C respectivamente.

Na aba “*extruder*” selecionou-se um extrusor e um *cooler*, definiu-se as temperaturas máximas de 400°C para o extrusor e 180°C para a mesa, e inseriu-se o valor do diâmetro do bico como sendo 0,5mm.

Na aba “*printer shape*” selecionou-se “*circular printer shape*” em *printer type* e inicialmente determinou-se 100mm como raio de impressão e 150mm como altura de impressão.

Em “*scripts*”, no código de fim de impressão adicionou-se o código G “G1 F800 X0 Y0 Z80” e “G28”, que significam respectivamente mover em velocidade 800 mm/min para a posição X0 Y0 Z80 e em seguida mover para *home*. No código cancelar impressão (*run on kill*) adicionou-se somente o primeiro comando, pois não necessariamente queria-se que a máquina voltasse para o *home*.

3.7. Configuração do firmware

Como firmware utilizou-se a versão mais recente do Marlin. Inicialmente substituiu-se os arquivos “*Configuration.h*” e “*Configuration_adv.h*” da pasta raiz do *firmware* por outros homônimo localizados na pasta “*example_configurations/delta/generic*”, configurando assim, um código genérico para impressora 3D com cinemática delta pré definido, a partir disso apenas modificou-se as particularidades da máquina utilizada.

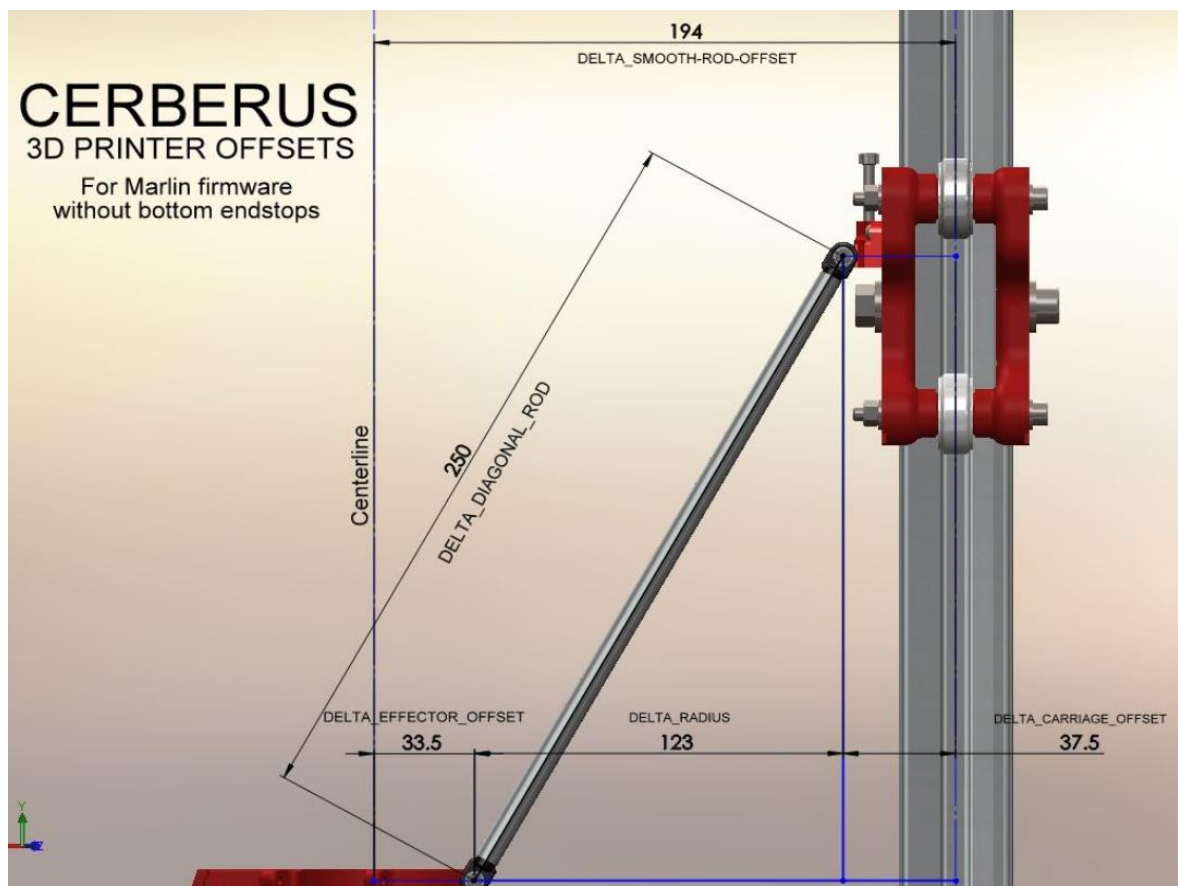
Contendo uma vasta documentação disponível e devido ao código ser totalmente comentado o processo de configuração é facilitado. Configurou-se o *baudrate* em 250000, que diz respeito à velocidade de comunicação e o tipo de placa controladora utilizada como “BOARD_RAMPS_14_EFB” que significa Ramps versão 1.4 com extrusor, ventilador e mesa aquecida (*Extruder, Fan, Bed*).

Em seguida, definiu-se a quantidade de extrusores utilizados e a espessura do filamento utilizado de 1,75 mm de diâmetro, os tipos de sensores de temperatura utilizados, sendo o termopar com MAX6675 como sensor 0 (opção -2) e termistor de 100kΩ como sensor de mesa (opção 1). Quanto às temperaturas mínimas do extrusor e da mesa aquecida configurou-se 5°C, o que garante que os sensores estão funcionando, pois se em temperatura ambiente a leitura for menor há grande

chance de haver algum problema de conexão nos mesmos. Definiu-se as temperaturas máximas como 400°C para o extrusor e 180°C para a mesa aquecida.

Na sessão “*delta settings*” alterou-se o parâmetro DELTA_HEIGHT que representa a altura ou distância entre a superfície da mesa e o bico aquecido. Com as chaves de fim de curso na posição de máximo curso do eixo Z, quando realiza-se o *homing*, a mesa se afasta do bico apresentando a altura máxima e este é o meio de calibração via software para a distância desejada entre o bico e a mesa. O parâmetro DELTA_DIAGONAL_ROD representa o tamanho da haste entre os centros das juntas. Já os demais parâmetros dimensionais anteriormente citados referem-se às medidas específicas da máquina delta que são ilustradas na Figura 22 a seguir.

Figura 22 - Variáveis de movimentação da delta



Fonte: Grabercars (2012).

4. Materiais e métodos

4.1. Altura máxima da impressora

Para regular a altura máxima de movimentação da impressora, inicia-se alterando no firmware os valores das variáveis “DELTA_HEIGHT” e “Z_MAX_POS”, representando a altura de movimentação da máquina e a posição máxima em Z respectivamente. A altura de movimentação da máquina encontra-se realizando o *homing* que é a movimentação dos eixos ao ponto inicial da máquina através do *software* e medindo com o auxílio de um régua a distância entre a mesa e o bico, sendo no caso aproximadamente 200 mm, a partir disso determina-se um valor maior para a posição máxima do eixo Z como 250mm, assim garantindo que para um valor de $Z = 0$ a mesa encoste no bico com uma folha de papel entre eles.

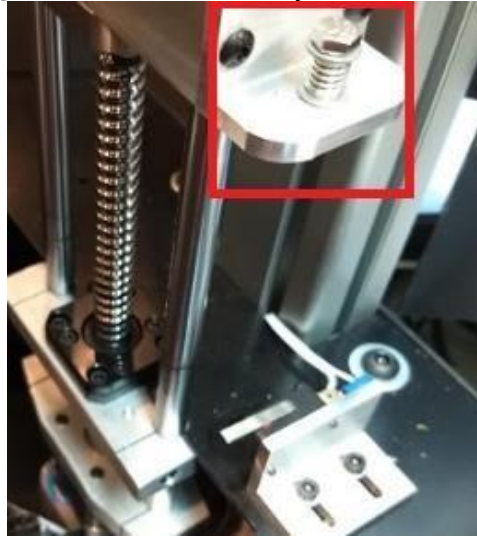
Com os devidos valores declarados no firmware *marlin* dentro do arquivo *configuration.h* e realizado o carregamento através da IDE do arduino para o arduino mega 2560, realiza-se novamente o homing da impressora. Então decrementa-se o valor de Z máximo até a mesa aproximar do bico extrusor verificou-se que a distância era 180 mm. Modificou-se a variável “DELTA_HEIGHT” para o valor real encontrado.

4.2. Nivelamento da mesa

No próximo passo calibrou-se o nivelamento da mesa. Para essa tarefa elevou-se a mesa a 5mm de distância do bico e moveu-se a mesa próxima a uma das 3 torres, refazendo o processo para cada torre. Sempre que verificado em um dos lados distância maior ou menor que 5 mm se regulava o parafuso de ajuste de fim de curso, movia-se a mesa para *home* e iniciava-se a operação novamente até que em todos os lados (incluindo o centro) a mesa apresentasse um movimento plano e com distância constante do bico.

Quanto à regulagem dos parafusos (Figura 23), para se elevar um lado da mesa deve-se soltar o parafuso do fim de curso do lado oposto ao desejado. Para abaixar a mesa deve-se apertar o parafuso de fim de curso oposto.

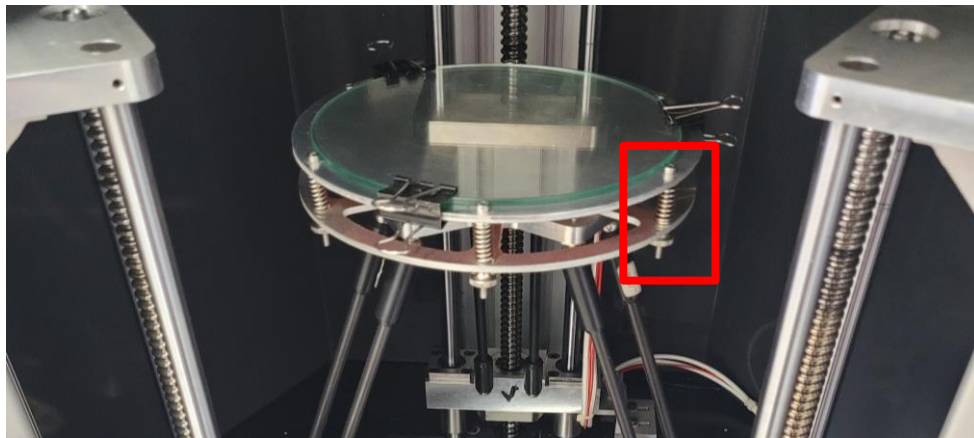
Figura 23 - Parafuso de ajuste de fim de curso



Fonte: Thomazetti (2019).

Para um ajuste mais refinado utiliza-se os parafusos do conjunto montado da própria mesa, como pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 - Parafuso de ajuste fino da mesa



Fonte: Acervo próprio (2022).

4.3. Quantidade de material extrudado

Verificou-se a movimentação do motor extrusor quanto a quantidade de material extrudado. Utilizando o material PLA e com *hotend* em 200 °C, a partir da entrada do filamento no canal do extrusor mediu-se com um paquímetro 100 mm e realizou-se uma marca com o filamento esticado. Então através do software comandou-se a extrusão de 100mm de material, ao fim da movimentação, mediu-se a distância entre a entrada e a marca , realizando o processo 5 vezes e os valores são apresentados na Tabela 3

Tabela 3 – Diferença medida.

Teste	Valor Nominal
1	3,18
2	3,60
3	3,16
4	3,24
5	3,06

Fonte: Elaboração própria (2022).

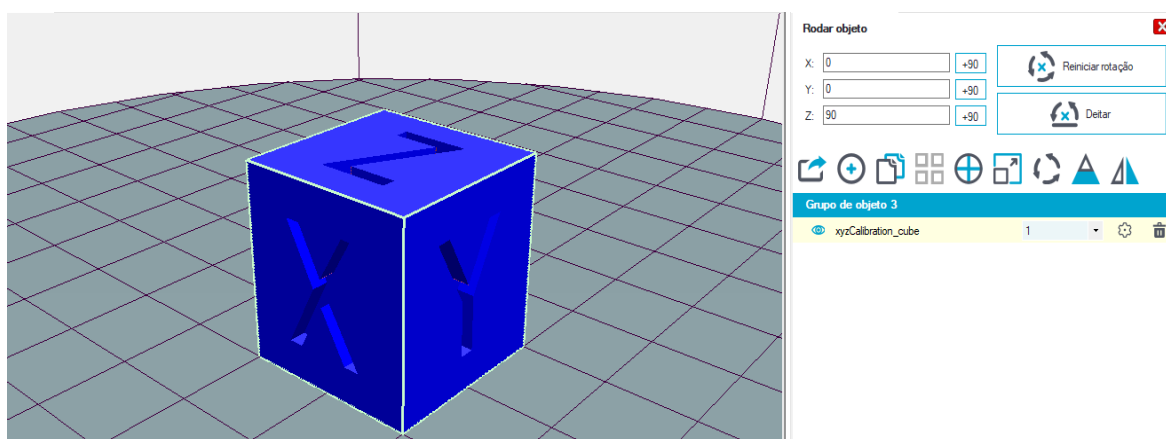
Calculou-se a média dos valores, sendo 3,24mm. Foi observado que o valor apresentado faltou extrudar e implica que o parâmetro para movimentação do motor extrusor não estava calibrado, logo o parâmetro deve estar abaixo do valor necessário. No arquivo “*Configurations.h*” do firmware há o parâmetro DEFAULT_AXIS_PER_UNITS com os valores (640,640,640,1460) o último valor é referente a quantidade de passos necessários para o motor do extrusor mover 1mm. A diferença entre o valor comandado de 100mm e restante de material não extrudado 3,24mm resulta em 96,76mm, ou seja 96,76%. Para 1460 o parâmetro resultava em extrusão de 96,76%. Por regra de 3, chega-se a 1.508 aproximadamente. Com o valor atualizado no firmware para 1508 o material extrudado após o comando de 100mm ficou com uma sobra de material não extrudado abaixo de 0,5mm após uma repetição do procedimento com uma medição.

5. Resultados e discussões

5.1. Teste de impressão

Para começar os testes de impressão utilizou-se o cubo XYZ com 20 x 20 x 20 milímetros apresentado na Figura 25, o *download* foi feito do site *thingiverse*. É a principal peça utilizada no meio da impressão 3D para validação das medidas nos eixos, pois há nas faces comuns aos eixos as letras correspondentes X, Y e Z, facilitando avaliar em relação a qual eixo está relacionado possíveis erros de medidas.

Figura 25 – Arquivo STL “xyzCalibration_cube”



Fonte: Elaboração própria (2022).

Ao importar o arquivo STL para o Repetier Host V2.2.4, os eixos estavam em desacordo com as referências da mesa de impressão, para corrigir rotacionou-se 90 graus em relação ao eixo z, como mostra a Figura 26 no canto superior direito.

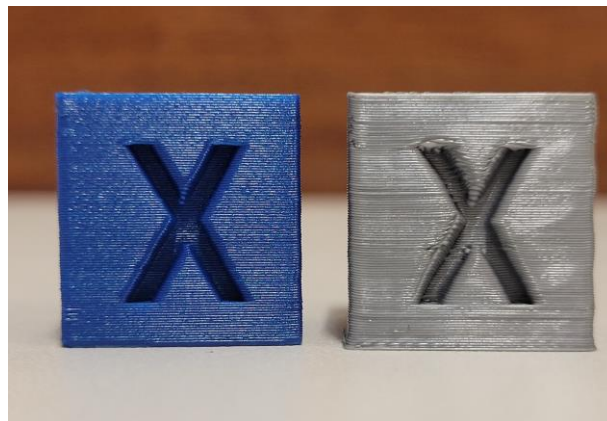
Configurou-se os parâmetros de fatiamento de acordo com os apresentados por Thomazetti em 2019 para a fabricação com ABS da empresa 3D fila. O CuraEngine foi escolhido dentre as opções de fatiador disponibilizado pelo Repetier. Na aba “*speed and quality*” selecionou-se a faixa de velocidade de todas as operações entre 30mm/s e 50mm/s.

Em “*Selected quality Settings*” definiu-se a altura da camada em 0,2mm, a altura da primeira camada como 0,35mm e a largura da primeira camada em 100%. Na aba “*structures*” configurou-se a espessura de casca como 0,8mm, e retração desabilitada pois foi impressa uma peça por vez.

Na aba “*filament*” definiu-se o diâmetro como 1,75mm e as temperaturas como 230°C no extrusor e 100°C na mesa. O fluxo de extrusão permaneceu com o valor padrão de 100%. Selecionou-se o preenchimento em 10% e duas camadas de parede, fundo e topo.

O vidro da mesa aquecida foi preparado com adesivo líquido para impressão 3D da SLIM 3D, composta por Polímero não iônico e Álcool Etílico, próprio para auxiliar a adesão com PLA e ABS em mesas de vidro ou espelho e em seguida iniciou-se a impressão. Ao final realizaram-se medições na peça utilizando um paquímetro da marca Digimess com 0,02mm de resolução. Verificaram-se as dimensões de 19,52mm no eixo X, 19,52 mm no eixo Y e 20,08 mm no eixo Z, foram medidas 3 vezes em cada eixo e considerou-se o valor central, observando-se o erro mais expressivo foi em relação aos eixos X e Y. A peça é apresentada na Figura 26 na cor azul ao lado esquerdo em comparação ao fabricado por Thomazetti em 2019 na cor cinza ao lado direito, visualmente percebe-se uma melhora na qualidade do cubo impresso.

Figura 26 - Cubo de teste impresso em ABS



Fonte: Acervo próprio (2022).

5.2. Avaliação do erro de medida

Para avaliar melhor o comportamento do erro das medidas real de cada eixo foram repetidas as impressões para amostras a partir de 5 mm cúbicos até 50 mm cúbicos, incrementando de 5 em 5 milímetros. Para ter medidas diferentes a partir do cubo padrão de 20 milímetros alterou-se a escala, então para a amostra 1 com 5 milímetros cúbicos definiu-se a escala para 0.25, assim seguiu-se incrementado de

0.25 em 0.25 até a amostra 10 e após a impressão de todas as amostras foram realizados as medições dos eixos utilizando o mesmo paquímetro.

Os erros em percentual foram calculados em relação à dimensão nominal. Todas as informações foram compiladas na tabela 4.

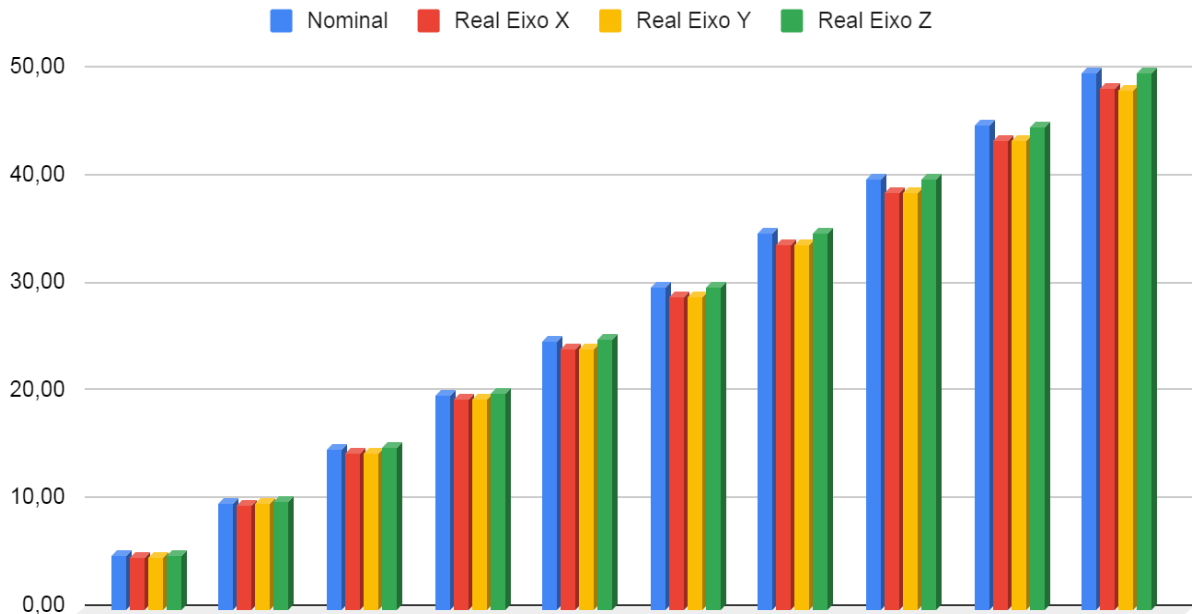
Tabela 4 - Resultados coletado dos cubos de teste

Amostra	Dimensão Nominal	Dimensão real Eixo X (mm)	Dimensão real Eixo Y (mm)	Dimensão real Eixo Z (mm)	Erro Eixo X (%)	Erro Eixo Y (%)	Erro Eixo Z (%)
A1	5	4.80	4.80	4.98	-4,00	-4,00	-0,40
A2	10	9.80	9.86	10.20	-2,00	-1,40	0,60
A3	15	14.54	14.66	15.14	-2,93	-2,40	0,67
A4	20	19.52	19.52	20.08	-2,40	-2,40	0,40
A5	25	24.28	24.32	25.10	-2,88	-2,72	0,40
A6	30	29.14	29.12	30.02	-2,87	-2,93	0,07
A7	35	33.90	33.94	35.00	-3,14	-3,03	0,00
A8	40	38.82	38.80	39.98	-2,95	-3,00	-0,05
A9	45	43.64	43.52	44.96	-3,07	-3,11	-0,22
A10	50	48.44	48.40	49.94	-3,12	-3,20	-0,12

Fonte: Elaboração própria (2022).

Para melhor visualização do comportamento do erro dimensional em relação ao tamanho nominal da amostra, é apresentado na Figura 27, um gráfico para comparação das medidas de cada eixo em relação ao valor de referência, é perceptível que o erro de medida encontra-se nos eixos X e Y, e que o valor é proporcional ao tamanho da peça impressa.

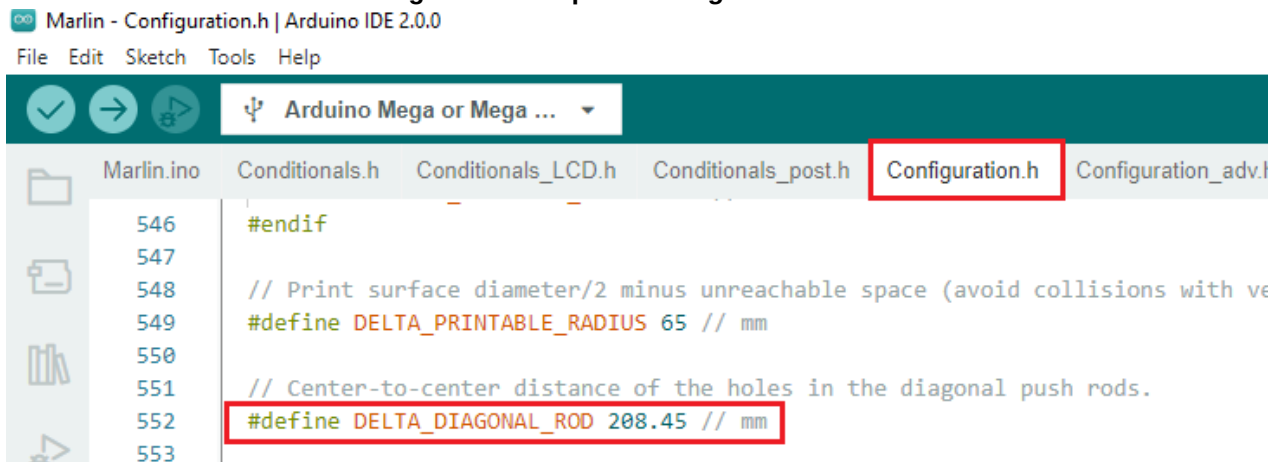
Figura 27 – Gráfico comparativo entre o valor nominal e cada eixo



Fonte: Elaboração própria (2022).

A partir dos valores encontrados para os eixos X e Y apresentados na tabela anterior, calculou-se a média do erro percentual dos eixos X e Y resultando foi de 2,95 por cento de erro. Para corrigir o erro, foi necessário alterar o valor na variável DELTA DIAGONAL ROD, o valor anterior era 214,80, subtraindo-se 2,95%, chegou-se em 208.45. Com o valor corrigido para a variável DELTA_DIAGONAL_ROD, foi realizado a atualização no firmware como mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Arquivo Configuration.h



Fonte: Elaboração própria (2022).

Após ajuste do valor da variável apresentados foi realizado novamente as impressões de novas amostras de A1 até A10 para análise da correção das medidas,

as medições das dimensões em relação aos eixos e os erros foram calculados e apresentados na Tabela 5.

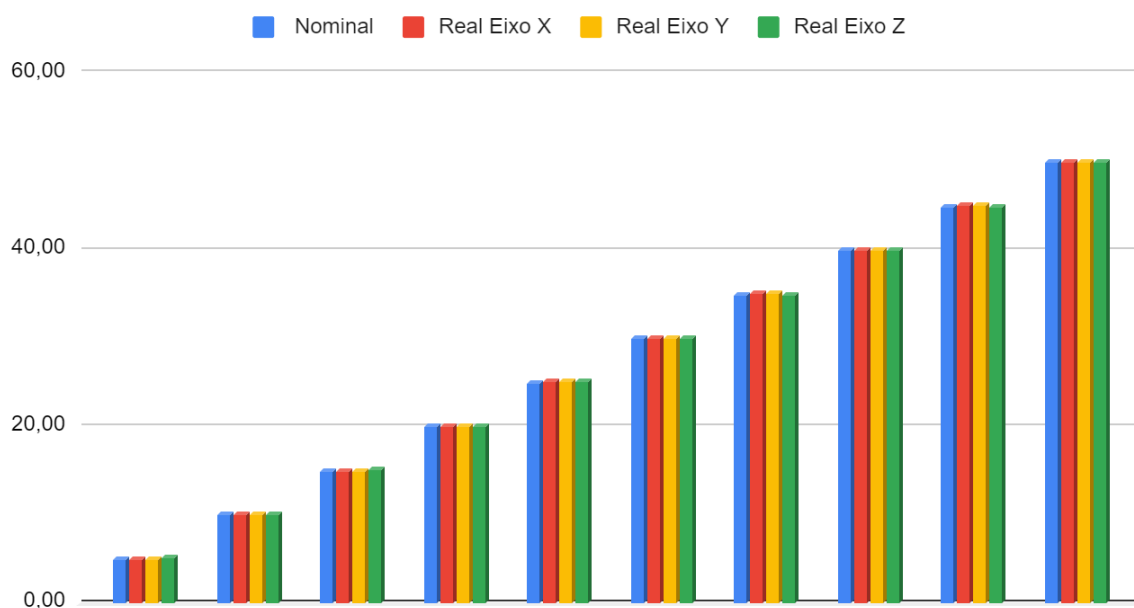
Tabela 5 - Resultados coletadas dos cubos de teste corrigida

Amostra	Dimensão Nominal	Dimensão real Eixo X (mm)	Dimensão real Eixo Y (mm)	Dimensão real Eixo Z (mm)	Erro Eixo X (%)	Erro Eixo Y (%)	Erro Eixo Z (%)
A1	5	4,96	5,00	5,10	-0,80	0,00	2,00
A2	10	10,00	10,02	10,14	0,00	0,20	1,40
A3	15	14,96	15,04	15,08	-0,27	0,27	0,53
A4	20	20,02	20,04	20,04	0,10	0,20	0,20
A5	25	25,06	25,06	25,08	0,24	0,24	0,32
A6	30	30,06	30,06	30,06	0,20	0,20	0,20
A7	35	35,04	35,06	34,94	0,11	0,17	-0,17
A8	40	40,00	40,06	40,02	0,00	0,15	0,05
A9	45	45,06	45,10	45,00	0,13	0,22	0,00
A10	50	50,06	50,04	50,02	0,12	0,08	0,04

Fonte: Elaboração própria (2022).

Com a reprodução das impressões dos cubos de teste e posterior medição e avaliação, a média dos erros dos eixos X e Y ficaram em 0,14%, a diferença maior entre a medida real e nominal foi de apenas 0,1mm, apresentado na Figura 29 o gráfico para comparação contra as medidas anteriores.

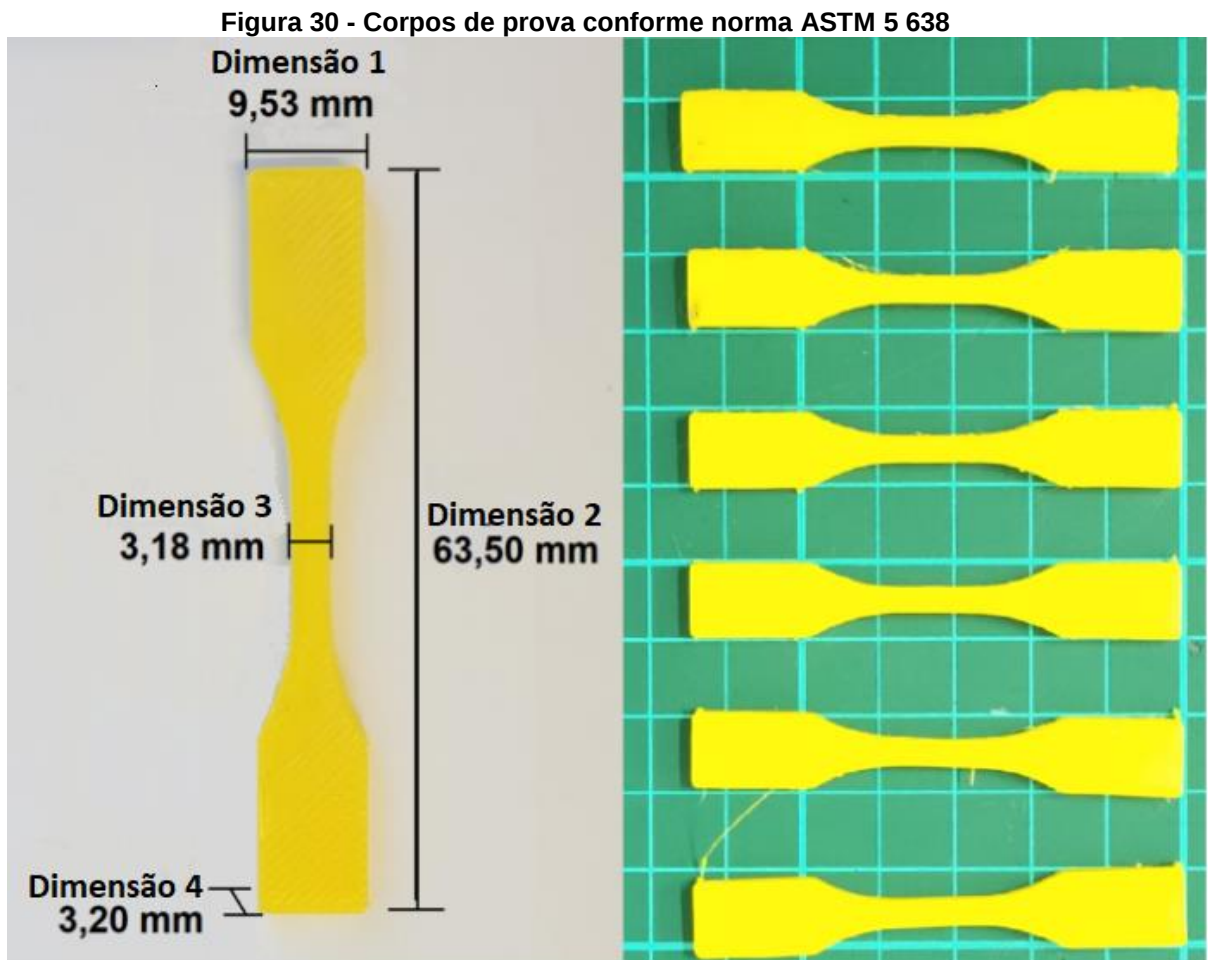
Figura 29 – Gráfico comparativo após calibração



Fonte: Elaboração própria (2022).

5.3. Avaliação da adesão à mesa

Logo após imprimiu-se seis corpos de prova , Figura 30, conforme a norma ASTM D638 tipo 5 com filamento de ABS em uma mesma impressão para verificar a adesão utilizando uma área maior da mesa.



Fonte: Elaboração própria (2022)

Constatou-se que ocorreu boa adesão utilizando uma maior área da superfície da mesa, após finalizada a impressão aplicou-se tração manualmente nas peças para retirar do vidro, porém as peças descolaram da mesa apenas após o resfriamento. Analisando a tabela 6 percebe-se que as dimensões das peças apresentaram pouca diferença uma das outras e bem próximas das medidas nominais.

Tabela 6 - Resultados coletadas dos corpos de prova ASTM D638 tipo 5

Local	Nominal (mm)	Peça 1 (mm)	Peça 2 (mm)	Peça 3 (mm)	Peça 4 (mm)	Peça 5 (mm)	Peça 6 (mm)
Dimensão 1	9,53	9,50	9,50	9,54	9,54	9,54	9,54
Dimensão 2	63,50	63,52	63,50	63,48	63,46	63,52	63,56
Dimensão 3	3,18	3,20	3,26	3,24	3,28	3,20	3,20
Dimensão 4	3,20	3,24	3,20	3,22	3,22	3,24	3,16

Fonte: Elaboração própria (2022).

Nos valores da Tabela 7 percebe-se que a média das medidas se aproximaram do valor nominal do modelo STL, e a diferença entre o maior e o menor valor variou 0,10 mm.

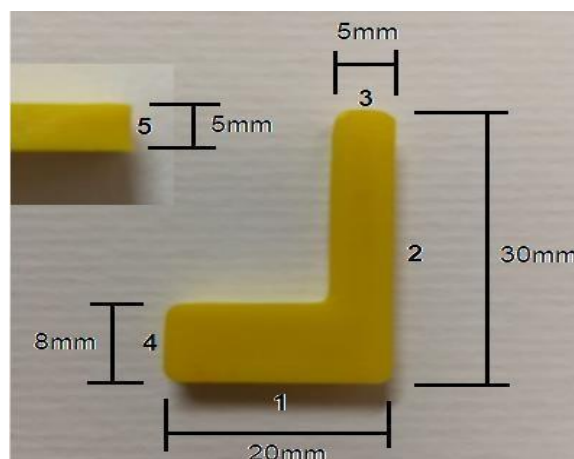
Tabela 7- Análise dos valores obtidos nos corpos de prova ASTM D638 tipo 5

Local	Nominal (mm)	Média (mm)	Erro (%)	Menor valor (mm)	Maior valor (mm)	Diferença (mm)
Dimensão 1	9,53	9,53	0,00	9,50	9,54	0,04
Dimensão 2	63,50	63,51	0,01	63,46	63,56	0,10
Dimensão 3	3,18	3,23	1,57	3,20	3,28	0,08
Dimensão 4	3,20	3,21	0,42	3,16	3,24	0,08

Fonte: Elaboração própria (2022).

5.4. Avaliação da repetitividade

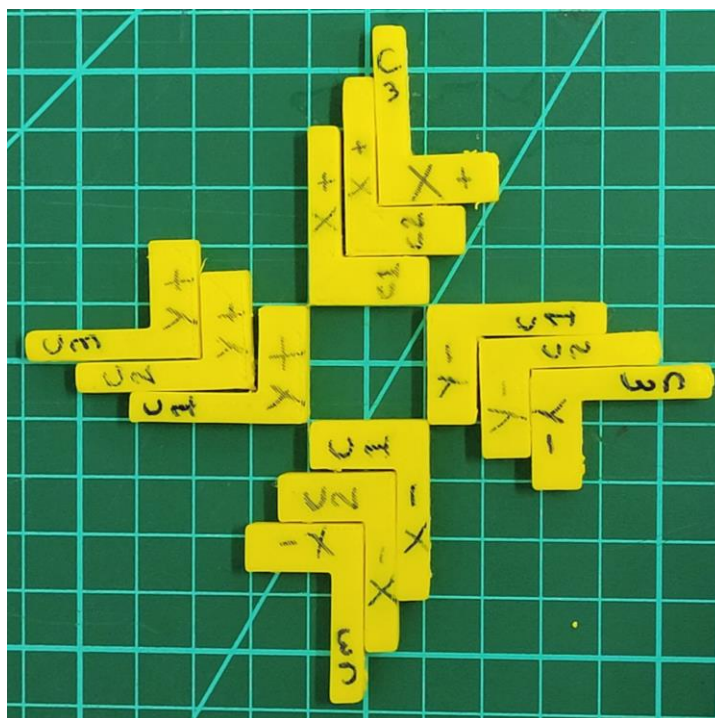
Para verificar a repetitividade da máquina Thomazetti em 2019 projetou uma peça no programa *Solidworks*. A peça apresenta cinco dimensões com medidas definidas, como mostra a Figura 31.

Figura 31 – Peça projetada para teste de repetitividade

Fonte: Thomazetti (2019).

As peças fabricadas são apresentadas na Figura 32, imprimiu-se três vezes em cada direção da mesa. Com o auxílio de um paquímetro, coletaram-se as medidas das amostras em todas as dimensões enumeradas na figura 26 de acordo com as direções de impressão de cada uma, as medidas foram compiladas na tabela 8.

Figura 32 – Amostras fabricadas para teste de repetitividade



Fonte: Thomazetti (2019).

Tabela 8 - Resultados coletadas das peças nas diferentes seções

	X Positivo			Y Positivo			X negativo			Y negativo		
Local	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 1	Peça 2	Peça 3
Dimensão 1	20,04	20,06	20,04	19,98	20,02	20,00	20,06	20,08	20,08	20,06	20,04	20,00
Dimensão 2	30,04	30,02	30,00	30,02	30,04	30,04	30,08	30,10	30,04	30,00	30,08	30,02
Dimensão 3	5,06	5,04	5,10	4,98	4,96	5,02	5,06	5,04	5,08	5,06	5,06	5,06
Dimensão 4	8,02	8,00	8,02	8,04	8,02	8,06	8,02	8,00	8,04	8,06	8,00	8,10
Dimensão 5	5,02	5,04	5,04	5,10	5,02	5,08	5,10	5,06	5,08	5,04	5,04	5,02

Fonte: Elaboração própria (2022).

Para avaliar o erro sistemático, ou tendência (***Td***), primeiramente calculou-se a média aritmética ($\bar{x}$) das amostras de cada dimensão e logo após subtraiu-se o resultado do valor nominal (***Vn***), como mostrado na Equação 1.

$$Td = (\bar{x}) - Vn \quad (1)$$

A seguir calculou-se o desvio padrão (***σ***) obtendo-se a raiz quadrada do somatório das medidas (x_i) menos a média ao quadrado, divididos pelo número de medições (***n***) totais realizadas (Equação 2).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

Por fim calculou-se a repetitividade. Utilizou-se uma distribuição ***t*** de Student, para o número de graus de liberdade, segundo a Equação 3 tem-se que:

$$gl = n - 1 \quad (3)$$

Os testes foram realizados com 3 amostras, logo verifica-se que o valor de ***t*** para dois graus de liberdade na tabela, ou seja, na segunda linha e considerando uma confiança de 95% utiliza-se a coluna de 0,05, encontra-se o valor 4,303 .

Tabela 9 - Coeficiente t de Student

	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,656	127,321	318,289	636,578
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,089	22,328	31,600
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,214	12,924
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,894	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073

Fonte: Thomazetti (2019).

Sendo assim, observa-se na Equação 4 que a repetitividade (**Re**) é o valor simétrico de **t** multiplicado por **σ**:

$$Re = t * \sigma \quad (4)$$

Considerando-se as três amostras de cada dimensão adquiridas em cada direção de impressão, realizaram-se os cálculos apresentados na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 - Cálculos referente às quatro direções avaliadas

		Nomina l(mm)	Média (mm)	Diferenç a(mm)	Tendênci a(mm)	Desvio Padrão(mm)	Repetitividad e(mm)
X+	Dimensão 1	20	20,05	-0,05	0,05	0,01	± 0,04
	Dimensão 2	30	30,02	-0,02	0,02	0,02	± 0,07
	Dimensão 3	5	5,07	-0,07	0,07	0,02	± 0,11
	Dimensão 4	8	8,01	-0,01	0,01	0,01	± 0,04
	Dimensão 5	5	5,03	-0,03	0,03	0,01	± 0,04
X-	Dimensão 1	20	20,07	-0,07	0,07	0,01	± 0,04
	Dimensão 2	30	30,07	-0,07	0,07	0,02	± 0,11
	Dimensão 3	5	5,06	-0,06	0,06	0,02	± 0,07
	Dimensão 4	8	8,02	-0,02	0,02	0,02	± 0,07
	Dimensão 5	5	5,08	-0,08	0,08	0,02	± 0,07
Y+	Dimensão 1	20	20,00	0,00	0,00	0,02	± 0,07
	Dimensão 2	30	30,03	-0,03	0,03	0,01	± 0,04
	Dimensão 3	5	4,99	0,01	-0,01	0,02	± 0,11
	Dimensão 4	8	8,04	-0,04	0,04	0,02	± 0,07
	Dimensão 5	5	5,07	-0,07	0,07	0,03	± 0,15
Y-	Dimensão 1	20	20,03	-0,03	0,03	0,02	± 0,11
	Dimensão 2	30	30,03	-0,03	0,03	0,03	± 0,15
	Dimensão 3	5	5,06	-0,06	0,06	0,00	± 0,00
	Dimensão 4	8	8,05	-0,05	0,05	0,04	± 0,18
	Dimensão 5	5	5,03	-0,03	0,03	0,01	± 0,04

Fonte: Elaboração própria (2022).

Para obter-se uma avaliação completa da repetitividade da máquina realizaram-se os cálculos considerando-se todas as medidas realizadas por seção, no caso sendo o número de amostra sendo 12, logo o grau de liberdade é 11 e o valor de t segunda a tabela 5 fica 2,201. Refez-se os cálculos e são apresentados na (Tabela 11).

Tabela 11 - Cálculos referente à todas as medidas por seção

Local	Nominal (mm)	Média (mm)	Tendência (mm)	Desv. Padrão (mm)	Repetitividade
Dimensão 1	20	20,04	0,04	0,03	$\pm 0,07$
Dimensão 2	30	30,04	0,04	0,03	$\pm 0,07$
Dimensão 3	5	5,04	0,04	0,04	$\pm 0,08$
Dimensão 4	8	8,03	0,03	0,03	$\pm 0,06$
Dimensão 5	5	5,05	0,05	0,03	$\pm 0,06$

Fonte: Elaboração própria (2022).

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho foi de grande valor para concretização de alguns temas particulares referentes à área da manufatura aditiva pelo discente, além das aplicações dos diversos domínios vistos durante o curso e que quase inteiramente pode ser visualizado em uma máquina de manufatura aditiva. Os objetivos inicialmente planejados se fizeram alcançados ao final do projeto.

A partir dos dados obtidos através das medições realizadas, seguindo os cálculos e comparado ao resultado alcançado por Thomazetti em 2019, constatou-se que em 95% dos casos o erro aleatório que havia anteriormente foi melhorado de $\pm 0,27$ mm para $\pm 0,08$ mm.

Recomenda-se o desenvolvimento e integração do controle de temperatura da área de impressão, como apresentado para possibilitar impressão de PEEK. Quanto às hastes magnéticas, deve-se avaliar sua continuidade de trabalho em temperaturas de impressão mais elevadas, podendo haver necessidade de substituição.

O conjunto do extrusor de dentro da câmara de impressão é indicado que seja retirado da parte interna do espaço de impressão, atentando-se ao espaço necessário para que a mesa de fabricação alcance o bico extrusor, visando um aumento do espaço de trabalho e proteção do motor extrusor e coolers quanto à temperatura da câmara.

REFERÊNCIAS

BONEV, I. Delta Parallel Robot - the Story of Success. 2001. Disponível em: Acesso em: 6 dez de 2022.

BOCK, T. (2015). "The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics". Automation in Construction, Vol. 59, pp. 113-121.

DEC, Marlus. Avaliação e otimização da exatidão geométrica de impressora 3D utilizando medição por coordenadas [DIS] / Marlus Dec; orientação de Aurélio da Costa Sabino Netto; coorientação de Milton Pereira. – Florianópolis, 2016.

FEISTAUER, Gustavo B. APRIMORAMENTO DE IMPRESSORA 3D COM CINEMÁTICA DELTA INVERTIDA; orientação de AURÉLIO DA COSTA SABINO NETTO - Florianópolis, SC, 2020. 81 p.

FISCHER, Matheus. Estudo para readequação de uma impressora 3D de baixo custo para impressão de materiais poliméricos de alta temperatura de processamento. 2018. 91f. TCC (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) – IFSC, Florianópolis.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. Polímero PVC (Policloreto de Vinila). Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/polimero-pvc-policloreto-vinila.htm>. Acesso em: 07 jul. 2022

HALEEM, Abid; JAVAID, Mohd. Polyether ether ketone (PEEK) and its manufacturing of customised 3D printed dentistry parts using additive manufacturing. Clinical Epidemiology and Global Health, v. 7, n. 4, p. 654-660, 2019.

IDTechEx Reserche. 3D Printing and Additive Manufacturing 2023-2033: Technology and Market Outlook. Disponível em: <https://www.idtechex.com/en/research-report/3d-printing-and-additive-manufacturing-2023-2033-technology-and-market-outlook/882>

JON, A.T. (2016). 3D PRINTING GUIDE. Disponível em: Instructables: <https://www.instructables.com/id/3D-Printing-101-1-Introduction/>. Acesso em 23 nov 2022.

KALATEC. Por que um acoplamento flexível e de precisão é importante na minha aplicação com servomotor. Disponível em: <<https://blog.kalatec.com.br/por-que-um-acoplamento-flexivel-e-de-precisao-e-importante-na-minha-aplicacao-com-servo-motor/>>. Acesso em: 26 set. 2022.

LUCAS, Elizabete F.; SOARES, Bluma G.; MONTEIRO, Elisabeth EC. Caracterização de polímeros: determinação de peso molecular e análise térmica. Rio de Janeiro: E-papers Editora, 2001.

MANO, Eloisa. B. (1991). Polímeros como Materiais de Engenharia. Editora Edgard Blücher, 1ª Edição, São Paulo.

Norma ASTM F292-12a, 2015, " Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies" (Terminologia padrão para manufatura aditiva), ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2003, DOI:.

PANDEY, P. M., REDDY, N. V., DHANDE, S. G., Slicing procedures in layered manufacturing: Rapid Prototyping Journal. MCB UP Ltd, v.9, n.5, p.274-288, 2003.

PESSINA, L.; Reymond Clavel, creator of the Delta Robot reflects on his career. 2013 Disponível em <https://sti.epfl.ch/reymond-clavel-creator-of-the-delta-robot-reflects-on-his-career/>
Acesso em: 07 dez de 2022.

RODRIGUES, Vinícius P. et al. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. Revista Gestão da Produção, Operações e Sistemas, [S.l.], v. 12, n. 3, p. 1, set. 2017. ISSN 1984-2430. Disponível em: <https://revista.feb.unesp.br/index.php/gepros/article/view/1657/784>. Acesso em: 08 set. 2021.

THOMAZETTI, João L. S. INTEGRAÇÃO ELETROELETRÔNICA EM IMPRESSORA 3D COM DELTA INVERTIDA; orientação de AURÉLIO DA COSTA SABINO NETTO. - Florianópolis, SC, 2019. 74 p.

TOMEI, Gabriel Pimentel De Souza. Desenvolvimento de um protótipo de um robô de cinemática paralela do tipo delta para impressão tridimensional de peças. 2015. 88f. TCC (Bacharelado em Engenharia de Automação e Controle) – UNIVATES, Lajeado.

VOLPATO, Neri. Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D. 1ª ed. Digital. São Paulo: Blucher Editor, 2017.

ZOUBAREF, L. E. (2021). BIOIMPRESSÕES EM 3D: PRESENTE E PERSPECTIVAS PARA REMODELAMENTO E APLICAÇÃO DE DIFERENTES COMPONENTES FISIOLÓGICOS NA MEDICINA REGENERATIVA. Revista Multidisciplinar De Educação E Meio Ambiente, 2(1), 53. <https://doi.org/10.51189/rema/1144>

WOHLERS, T. Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry; Wohlers Associates. Inc.: Fort Collins, CO, USA, 2014.

WEYHRICH, Cody W.; LONG, Timothy E. Additive manufacturing of high-performance engineering polymers: present and future. **Polymer International**, v. 71, n. 5, p. 532-536, 2022