

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

GABRIEL MAXIMIANO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO COREXY
PARA IMPRESSORA 3D**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(TCC2 – Nº DE INSCRIÇÃO – 19)

CURITIBA

2015

GABRIEL MAXIMIANO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO COREXY
PARA IMPRESSORA 3D**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Industrial Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. M.Eng. David Kretscheck

CURITIBA

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO COREXY PARA IMPRESSORA 3D", realizado pelo aluno Gabriel Maximiano, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. M.Eng. David Kretschek

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR

Orientador

Prof. M.Tech. Carlos Alberto Vargas

Departamento Acadêmico de Desenho Industrial, UTFPR

Avaliador

Prof. Antonio Verguetz Silva

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 10 de setembro de 2015.

AGRADECIMENTO

Aos meus pais, pelo sacrifício feito para educar seus filhos e por nos fornecer as melhores condições possíveis, com base na integridade humana, para o nosso desenvolvimento como profissionais e, principalmente, como pessoas.

Aos demais integrantes da família, de sangue e de coração, pelo suporte, paciência e pelos incentivos ao longo de toda trajetória.

Aos amigos, pelo compartilhamento de experiências, conhecimento, recursos e também pelo apoio que tornaram este trabalho possível.

À UTFPR, por fornecer estrutura e educação ao longo do curso para desenvolver um bom profissional.

Ao Professor Orientador David Kretschek e ao GIP3D, pelo apoio técnico e pelos recursos cedidos para a construção deste projeto.

RESUMO

MAXIMIANO, Gabriel. Desenvolvimento de Sistema de Movimentação CoreXY para Impressora 3D. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

A manufatura aditiva é uma tecnologia relativamente nova e promissora. Ela passou a atuar em várias fases de projeto, desde a prototipagem até a concepção do produto na fase final das mais variadas áreas do mercado. Seu crescimento expressivo no mercado aliado a falta de informação em território nacional nos dá grandes oportunidades para desenvolver a impressão tridimensional. Uma das opções de impressão 3D, a modelagem por fusão e deposição é um processo caracterizado pela adição de material em camadas sucessivas de material fundido a fim de obter um objeto específico. Graças ao aumento de sua popularidade, uma de suas vertentes se voltou para entusiastas, que queriam impressoras de baixo custo e compactas para criar pequenos objetos. Se baseando nesta vertente, o Grupo de Impressão 3D da Universidade Tecnológica Federal do Paraná se reuniu para projetar e construir sua própria impressora 3D dentro de suas dependências para fins acadêmicos. O grupo em questão é formado por alunos e professores voluntários para dar suporte a outros alunos que queiram se iterar no assunto e desenvolver seus próprios projetos. O foco deste trabalho é voltado para o sistema de movimentação cartesiano X e Y para a impressora do grupo, sendo que estes devem ser simples e fácil de montar.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Impressão 3D. Modelagem por fusão e deposição.

ABSTRACT

MAXIMIANO, Gabriel. CoreXY Motion System Design for 3D Printer. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Additive manufacturing is a relatively new and promising technology. It started to be part of many project phases, from rapid prototyping to the conception of the final product in many different areas. Your expressive growth allied with the lack of information inside the Brazilian territory gives us the opportunity to develop 3D printing. As one option of 3D printing, fused deposition modeling is a process where an object is made from fused material that is laid down by layers. Due to the increasing popularity, one of its options was created directly to attend enthusiasts, which wanted cheap and compact printers to print small objects. Based on that, the Grupo de Impressão 3D from Universidade Tecnológica Federal do Paraná gathered to design and build their own 3D printer inside the university for academic purposes. Volunteers founded this group to support and assist interested students. The main focus of this paper work is directed to the XY cartesian motion system for the group's printer, which must be simple and easy to assemble.

Keywords: Additive manufacturing. 3D printing. Fused deposition modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparativo entre empresas de grande e pequeno porte quanto a adoção da impressão 3D em suas atividades	12
Figura 2 – Esquemático conceitual do processo FDM	16
Figura 3 – Processo de estereolitografia	17
Figura 4 – Esquema de impressão por Clip	18
Figura 5 – Comparativo dos processo SL e Clip	18
Figura 6 – Comparativo entre acabamentos de Clip e FDM	19
Figura 7 – Influência da direção da força trativa na fratura	20
Figura 8 – Vista em corte da turbina GE9X, da companhia GE	23
Figura 9 – Vista traseira do carro Koenigsegg One:1, com a ponteira do sistema de exaustão em titânio	23
Figura 10 – Arranjo cartesiano X	28
Figura 11 – Representação do arranjo cartesiano XY	29
Figura 12 – Representação do arranjo cartesiano XY tradicional	29
Figura 13 – Representação do arranjo H-Bot	30
Figura 14 – Cinemática do arranjo H-Bot	31
Figura 15 – Efeito das forças trativas sobre o arranjo H-Bot	31
Figura 16 – Representação do arranjo CoreXY	32
Figura 17 – Cinemática e equações de movimento para H-Bot e CoreXY	32
Figura 18 – Representação de forças trativas no arranjo CoreXY	34
Figura 19 – Representação do arranjo cartesiano XZ	35
Figura 20 – Complexidade versus rigidez de estruturas	36
Figura 21 – Exemplar de impressora com arranjo Delta	37
Figura 22 – Exemplar de impressora com arranjo Polar	38
Figura 23 – Exemplar de impressora com arranjo Braço Robótico	38
Figura 24 – Exemplar de impressora com arranjo Scara	39
Figura 25 – Impressora na fase inicial da montagem.	40
Figura 26 – RepRap 1.0 “Darwin”	43
Figura 27 – A Darwin original exposta a esquerda e a sua réplica a direita	43
Figura 28 – Makerbot Replicator 5th Generation	44
Figura 29 – Ultimaker 2	44
Figura 30 – Prusa Mendel Iteration 2	45
Figura 31 – Prusa Mendel Iteration 3	46
Figura 32 – RepRapPro Huxley	47
Figura 33 – PrintrBot Simple Metal	48
Figura 34 – SeeMeCNC Orion Delta	48
Figura 35 – Quadro comparativo entre impressoras RepRap.	49
Figura 36 – Quadro comparativo entre impressoras comerciais.	50
Figura 37 – Modelagem da impressora (componentes)	51
Figura 38 – Modelagem da impressora (montagem)	52
Figura 39 – Definição do espaço disponível para o sistema	52
Figura 40 – Chassis preliminar do sistema CoreXY	53
Figura 41 – Chassis, eixos e peças em ABS preliminares	53
Figura 42 – Sistema CoreXY preliminar	54
Figura 43 – Prusa i3 do GIP3D	55
Figura 44 – Abertura de rosca M5x0,8	56
Figura 45 – Etapas do processo de fabricação das peças plásticas	56
Figura 46 – Peças feitas em ABS prontas	56

Figura 47 – Máquina CNC com a chapa em processo de fabricação	57
Figura 48 – Acabamento das peças estruturais	58
Figura 49 – Partes estruturais prontas para montagem	58
Figura 50 – Acoplamentos para os motores de passo	59
Figura 51 – Tubos do conjunto deslizante	60
Figura 52 – Erro causado por perda de passo no eixo X da impressora	61
Figura 53 – Polia com os dentes retrabalhados (esquerda) ao lado da polia recém-fabricada (direita)	62
Figura 54 – Peças da ponta do eixo X	63
Figura 55 – Leitura da espessura da parede com distorções dimensionais.....	63
Figura 56– Detalhe da peça após remoção de material com lima.....	64
Figura 57 – Ponta de eixo montada	64
Figura 58 – Interferência na montagem das buchas na ponta de eixo.....	64
Figura 59 – Processo de torneamento para retrabalho da peça	65
Figura 60 – Estrutura CoreXY montada na impressora	66
Figura 61 – Variação dimensional do furo para o eixo Y	66
Figura 62 – Eixo Y montado após retrabalho nos furos	67
Figura 63 – Conjunto deslizante montado	67
Figura 64 – Sistema CoreXY montado.....	68
Figura 65 – Novas polias ao lado das polias antigas.....	69
Figura 66 – Computador e sistema CoreXY conectados e prontos para os testes	70
Figura 67 – Esquemático para montagem da RAMPS	70
Figura 68 – Teste com linhas horizontais	71
Figura 69 – Linearidade das retas horizontais.....	71
Figura 70 – Teste com linhas verticais.....	72
Figura 71 – Linearidade das retas verticais	73
Figura 72 – Teste com linhas diagonais.....	73
Figura 73 – Linearidade e perpendicularidade das linhas	74
Figura 74 – Teste com circunferências concêntricas	74
Figura 75 – Circularidade das linhas	75

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
AM	Manufatura Aditiva
CAD	Desenho Assistido por Computador
Clip	<i>Continuous Liquid Interface Production</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DADIN	Departamento Acadêmico de Desenho Industrial
FDM	Modelagem por fusão e deposição
GE	General Electric Co.
GIP3D	Grupo de Impressão 3D
IGES	Especificação Inicial de Intercambio Gráfico
MDF	Fibra de Média Densidade
PLA	Ácido Polilático
PMMA	Polimetilmetacrilato
Prota	Programa de Tecnologia Assistiva
Prusa i2	Prusa Mendel Iteration 2
Prusa i3	Prusa Mendel Iteration 3
PVA	Acetato de Polivinila
PwC	Price Waterhouse Cooper
RAMPS	<i>RepRap Arduino Mega Pololu Shield</i>
RepRap	<i>Replicating Rapid Prototyper</i>
RP	Prototipagem Rápida
Scara	<i>Selective Compliant Articulated Robot Arm</i>
SL	Estereolitografia (Processo)
STL	Estereolitografia (Arquivo)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1.	CONTEXTO DO TEMA	10
1.2.	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	11
1.3.	OBJETIVO	13
1.4.	JUSTIFICATIVA	13
1.5.	ETAPAS DO PROJETO	14
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1.	MANUFATURA ADITIVA	15
2.2.	MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO	16
2.3.	ESTEREOLITOGRAFIA	16
2.4.	PRODUÇÃO CONTÍNUA EM INTERFACE LÍQUIDA (CLIP)	17
2.5.	MODELAGEM E PROCESSAMENTO	20
2.6.	A IMPRESSORA 3D	21
2.6.1.	Aplicações no Ensino	21
2.6.2.	Aplicações na Área Médica	21
2.6.3.	Aplicações em <i>Design</i>	22
2.6.4.	Aplicações na Indústria Aeronáutica	22
2.6.5.	Aplicações na Indústria Automotiva	23
2.7.	<i>REPLICATING RAPID PROTOTYPING</i>	24
2.7.1.	Materiais Estruturais	24
2.7.1.1.	Ácido polilático (PLA)	25
2.7.1.2.	Acrílico	25
2.7.1.3.	Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)	26
2.7.1.4.	Alumínio	26
2.7.1.5.	Madeira	26
2.8.	ARRANJO MECÂNICO	27
2.8.1.	Cartesiano com Cabeçote no eixo X	27
2.8.2.	Cartesiano com Cabeçote no plano XY	28
2.8.3.	Cartesiano com Cabeçote no plano XZ	35
2.8.4.	Delta	36
2.8.5.	Outras opções	37
3.	METODOLOGIA	40
3.1.	BENCHMARKING	40
3.2.	MODELAGEM DA IMPRESSORA	40
3.3.	DEFINIÇÃO DO SISTEMA	41
3.4.	FABRICAÇÃO	41
4.	PROJETO	42
4.1.	BENCHMARKING	42
4.1.1.	Cartesiano com cabeçote no plano XY	42
4.1.2.	Cartesiano com cabeçote no plano XZ	44
4.1.3.	Delta	48
4.1.4.	Quadros Comparativos	49
4.2.	MODELAGEM DA IMPRESSORA	50
4.2.1.	Medição da Impressora Física	50
4.2.2.	Modelagem dos Componentes	51
4.2.3.	Montagem dos Componentes	51
4.3.	DEFINIÇÃO DO SISTEMA	52
4.4.	FABRICAÇÃO	54

4.4.1.	Peças Plásticas	54
4.4.2.	Peças em Madeira.....	57
4.4.3.	Peças em Alumínio.....	59
5.	RESULTADOS.....	61
5.1.	MONTAGEM	61
5.2.	TESTE	68
6.	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	78
	APÊNDICE.....	81
	APÊNDICE A – Parâmetros de impressão utilizados.....	81
	APÊNDICE B – Manual de Instruções para Montagem	85

1. INTRODUÇÃO

Impressão tridimensional é um processo de manufatura aditiva que tem como objetivo produzir objetos tridimensionais através da adição de sucessivas camadas de material (REPRAP, 2014). Mas, com o avanço tecnológico mundial motivado pela escassez de recursos e tempos de produção rigorosos, essa tecnologia vem passando por drásticas mudanças e alcançando níveis de produção e precisão comparados aos dos processos convencionais.

Graças à economia de material, facilidade de implementação e operação associado à rapidez, a promessa de revolucionar a manufatura está se tornando realidade (FORBES, 2014). De acordo com Shepherd, analista Sênior da Canalys (2014), os avanços na tecnologia estão trazendo tempos de impressão menores e permitindo que objetos sejam impressos em maiores combinações de materiais, cores e acabamentos. Isto, conseqüentemente, ainda segundo Canalys (2014), faz os preços caírem, tornando a impressão 3D uma opção cada vez mais viável para uma larga variedade de empresas e consumidores. Para Volpato et al. (2007), a indústria de prototipagem almeja a evolução de seus sistemas com o objetivo de não mais focar somente na fase da prototipagem em si, mas também na produção rápida com a fabricação final de produtos. De fato, a impressão 3D já não se contenta somente com a fase de idealização do produto e passou a participar das outras etapas de projeto, fornecendo suporte em estudos logísticos, preparação de moldes, divulgação de produto e também entregando o produto acabado.

A impressão tridimensional não se limita apenas para grandes empresas. Uma das tendências futuras, as impressoras 3D de bancada, alternativa de baixo custo, conseguiram chamar a atenção de estudantes, professores e empreendedores. Em 2013, houve 116.000 encomendas de impressoras de bancada realizadas, quantidade que superou o número de encomendas nos quatro anos anteriores combinados (3D PRINTING INDUSTRY, 2014).

1.1. CONTEXTO DO TEMA

Na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), um grupo de voluntários teve a iniciativa de explorar a área de prototipagem e divulgar a tecnologia

com a criação de um laboratório dedicado à impressão 3D. Criado em meados de 2014, o Grupo de Impressão 3D (GIP3D) tem como objetivo dar suporte a atividades de ensino, pesquisa e extensão, ambas direcionadas para a impressão 3D e projetos auxiliados por computador. Por ser novo, o laboratório conta atualmente com poucas pessoas envolvidas na causa e poucas máquinas operantes.

Atualmente, o GIP3D tem interesse em desenvolver uma impressora de bancada e disponibilizar seus recursos para que novos interessados possam aprender mais sobre o processo. A intenção é de reunir mais interessados e fazer uso de seu inventário para educar, tornando os então alunos em melhores profissionais, seja na área de pesquisa ou na área fabril.

1.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Apesar de possuir um futuro promissor, as impressoras 3D ainda não são populares para instituições de ensino e pequenas empresas. A escassez de livros didáticos voltados ao assunto, juntamente com a falta de pessoas qualificadas nas áreas envolvidas, restringe o desenvolvimento da impressão. Uma pesquisa internacional realizada pela Price Waterhouse Cooper (PwC) com 116 empresas estrangeiras, ilustrada pela Figura 1, mostra que a maior iniciativa de adotar essa tecnologia vem de empresas com mais de 500 funcionários, ilustrando a dificuldade de adotar a impressão tridimensional como forma de manufatura para as empresas menores (FORBES, 2014).

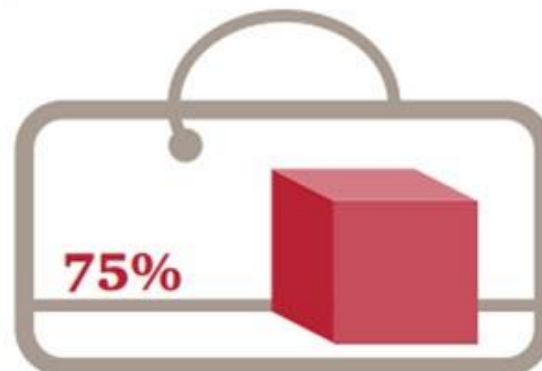
Adoção da impressão 3D: Pequenas empresas acompanhando as grandes

Adoção da impressão 3D em **pequenas** empresas
(menos de 500 empregados)

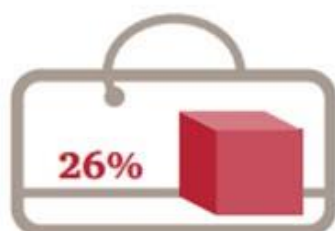


59% das empresas estão adotando de alguma forma (Experimentando para determinar o modo de aplicação ou usando para prototipagem de produção de produtos finais.)

Adoção da impressão 3D em **grandes** empresas
(500+ empregados)

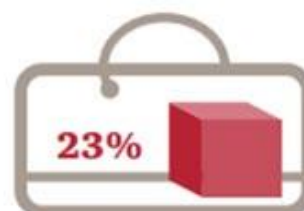


75% das empresas estão adotando de alguma forma (Experimentando para determinar o modo de aplicação ou usando para prototipagem de produção de produtos finais.)



26% das empresas planejam adotar no futuro de alguma forma

- 7% até o próximo ano
- 14% até 3 anos
- 5% algum dia depois de 3 anos



23% das empresas planejam adotar no futuro de alguma forma

- 4% até o próximo ano
- 7% até 3 anos
- 12% algum dia depois de 3 anos



15% das empresas não planejam adotar



2% das empresas não planejam adotar

Figura 1 – Comparativo entre empresas de grande e pequeno porte quanto a adoção da impressão 3D em suas atividades

Fonte: Adaptado de Forbes (2014).

Quando se trata de trazer a tecnologia para dentro do território nacional, essa dificuldade é amplificada. Segundo Volpato et al. (2007), é necessário que o mercado interno brasileiro esteja forte e imune a oscilações, além de incentivo direto na indústria e em instituições de ensino para impulsionar o crescimento e combater a obsolescência dos equipamentos que temos.

Apesar disso, algumas universidades brasileiras têm trabalhado para desenvolver os processos referentes à prototipagem e têm coordenado pesquisas voltadas para a tecnologia (VOLPATO et al., 2007). De fato, o GIP3D é um grupo com a intenção de aproximar a tecnologia e têm trabalhado para construir sua própria impressora, porém a movimentação dos eixos X e Y ainda não foi pensada e isso limita suas atividades já que a máquina não está pronta.

1.3. OBJETIVO

Partindo do projeto de impressora 3D não finalizado pelo grupo, o principal objetivo é projetar um sistema de movimentação do cabeçote, no plano XY, da impressora 3D do GIP3D.

De modo mais específico, o sistema de movimentação precisa seguir as premissas da máquina em construção de tal maneira que haja coerência entre o sistema em questão e a impressora. Assim, o produto deverá ser simples de montar, prático para realizar ajuste e ser modular.

1.4. JUSTIFICATIVA

Com base nos objetivos explicitados acima, o projeto dará continuidade ao trabalho de construir uma impressora de bancada, para fins acadêmicos, através da adaptação de um sistema de movimentação do cabeçote no plano XY em uma impressora existente, ampliando assim a atuação e o desenvolvimento do GIP3D.

A atividade do grupo está alinhada com a questão de aprendizagem, de explorar a tecnologia e fazer o intermédio inicial entre os alunos, instituição de ensino e impressão 3D. A introdução do assunto para os estudantes dentro das dependências da universidade é uma das formas de minimizar a defasagem tecnológica entre o país e os países desenvolvidos.

O projeto em si precisa ser simples para que aqueles que decidirem por montar uma impressora sem ter conhecimento aprofundado no tema não tenham dificuldades em montar e usar o produto.

1.5. ETAPAS DO PROJETO

A estrutura desta monografia é composta por seis capítulos. O capítulo 2 trata de apresentar ao leitor assuntos e conceitos pertinentes para a imersão no trabalho. Em sequência, o capítulo 3 discute a metodologia empregada para a realização do projeto, apresentando brevemente a intenção em cada etapa. Já o capítulo 4 descreve o projeto em detalhes, seguindo a mesma ordem de apresentação proposta na metodologia e descrevendo os produtos de cada etapa do projeto. O capítulo 5 diz respeito aos resultados. Nele, serão documentados também os problemas referentes à montagem e testes do projeto. Finalmente, o capítulo 6, com base nos capítulos anteriores, discorre sobre os resultados e extrai as conclusões da monografia.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa seção do trabalho serão apresentados alguns conceitos pertinentes para a compreensão do assunto e alternativas de construção estrutural presentes no mercado. Assim, os exemplos citados e devidamente analisados poderão servir como *benchmarking* e poderão dar suporte para tomadas de decisões.

2.1. MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva (AM, de *Additive Manufacturing*) é o termo adotado pela ASTM International (ASTM) para descrever o processo de manufatura que, partindo de um modelo tridimensional, gera um objeto qualquer sem a necessidade de um planejamento de processo (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

Inicialmente, o termo que descrevia tal processo era “prototipagem rápida” (RP, de *Rapid Prototyping*), mas o termo RP deixa a entender que o processo se limita somente à prototipagem enquanto AM engloba também as etapas posteriores à prototipagem. Sendo assim, este trabalho tratará este processo como sendo AM em respeito à terminologia adotada pela ASTM.

A AM é uma técnica de conversão de modelos tridimensionais de CAD (Desenho Assistido por Computador ou, do inglês, *Computer Aided Design*) em um modelo físico, na maioria das vezes através do fatiamento do modelo tridimensional em várias camadas bidimensionais, adicionando-as em sequência (NASR; KAMRANI, 2007).

De acordo com Chua et al. (2010) independente de qual seja a técnica aplicada para a AM, ela segue três passos básicos de execução do processo: a primeira parte é definida pela modelagem do objeto com CAD, seguido pela conversão desse arquivo para o formato STL (Estereolitografia ou, do inglês, *Stereolithography*) ou IGES (Especificação Inicial de Intercambio Gráfico ou, do inglês, *Initial Graphics Exchange Specifications*) a fim de aproximar a geometria do objeto em polígonos e, finalmente, o fatiamento do arquivo gerado na conversão para poder criar o modelo físico através da adição por camadas.

2.2. MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO

A FDM (modelagem por fusão e deposição ou, do inglês, *Fused Deposition Modeling*), como o próprio nome sugere, deve ser um processo de modelagem baseada na deposição do fundido de um material inicialmente sólido. De fato, segundo Chua et al. (2010), um material termoplástico em forma de filamento é derretido em um cabeçote e extrudado em um bocal para dar forma às camadas criadas no fatiamento comentado anteriormente (figura 2). Repara-se na figura que o material deixa o extrusor em estado semilíquido, permitindo que ele se solidifique ao entrar em contato com a base e com o ar.

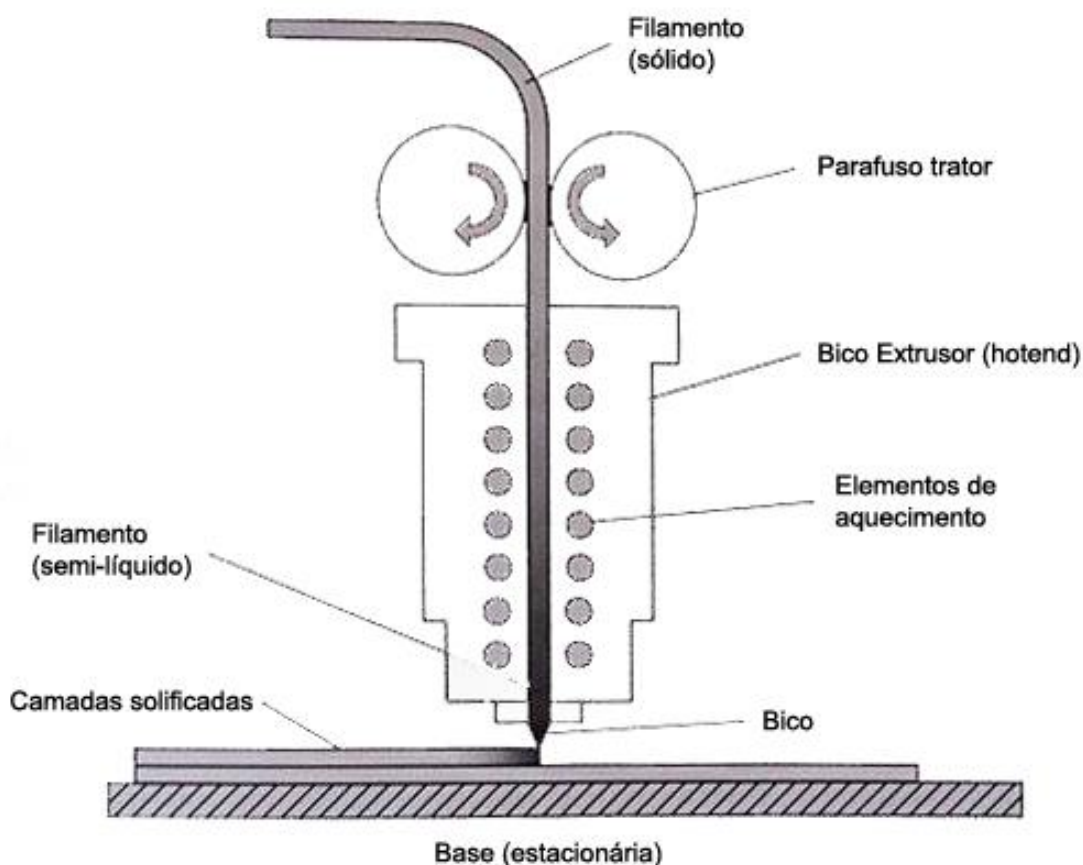


Figura 2 – Esquemático conceitual do processo FDM
 Fonte: Adaptado de Chua et al. (2010, p.143).

2.3. ESTEREOLITOGRAFIA

Ao contrário da FDM, a estereolitografia (SL, do inglês *Stereolithography*) é um processo de AM que não faz uso de material sólido, mas sim utiliza resina líquida

fotocurável para formar objetos tridimensionais. A resina se encontra em um recipiente e recebe feixes de luz que a solidifica nos locais desejados para formar uma fina camada e, com a repetição desse processo sucessivas vezes, forma um objeto tridimensional (CHUA *et al.*, 2010).

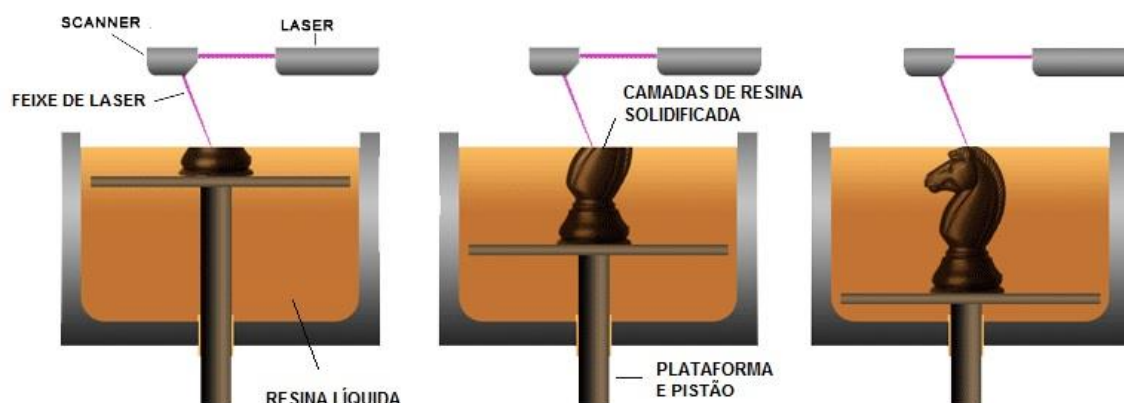


Figura 3 – Processo de estereolitografia
 Fonte: Adaptado de 3D Material Technologies (2013).

Ainda de acordo com Chua *et al.* (2010), peças providas da SL apresentam boas tolerâncias dimensionais e bons acabamentos superficiais, porém para alguns casos é necessário adotar estruturas de suporte para evitar que a peça entre em colapso durante o processo. Caso ela realmente necessite de suporte, será preciso também remover os suportes após a impressão. Além disso, dependendo do material, o processo exige mais uma etapa para cura completa da resina.

2.4. PRODUÇÃO CONTÍNUA EM INTERFACE LÍQUIDA (CLIP)

Assim como na SL, a Clip (do inglês *Continuous Liquid Interface Production*) não utiliza filamento termoplástico, mas sim resina líquida.

Na verdade, a manufatura aditiva, já visto na seção 2.1 deste trabalho, é a adição de uma camada bidimensional e a repetição desse processo diversas vezes, podendo levar horas para se fazer um objeto com alguns centímetros de altura. Com o uso de luz UV (ultravioleta), oxigênio e um recipiente contendo resina líquida, as máquinas baseadas no processo Clip revelam o objeto de forma contínua, ou seja, sem as separações por camadas (figura 4).

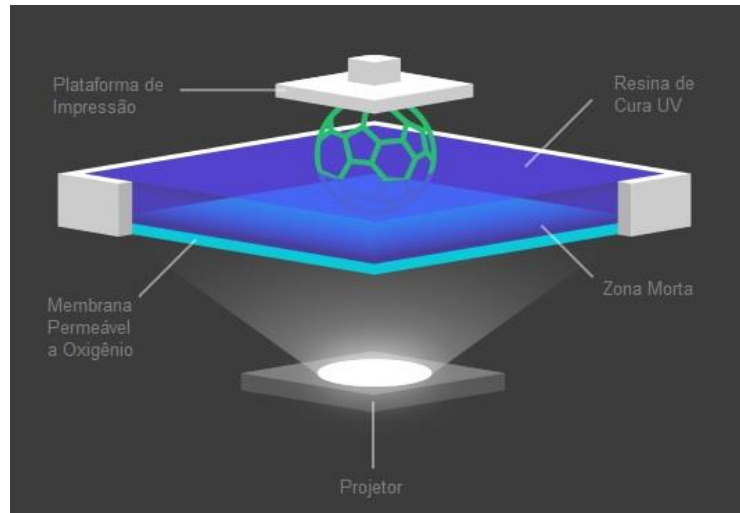


Figura 4 – Esquema de impressão por Clip
Fonte: Adaptado de Carbon3D (2015).

O fato de ser contínuo elimina algumas etapas de processo, resultando em uma razão de 25 a 100 vezes mais rápido do que os processos convencionais de manufatura aditiva (BUSINESSWIRE, 2015). No processo SL convencional, após a cura de uma camada, essa camada é então deslocada para que um novo filme de resina líquida ocupe a posição para a cura de uma nova camada, ilustrado pela Figura 5.

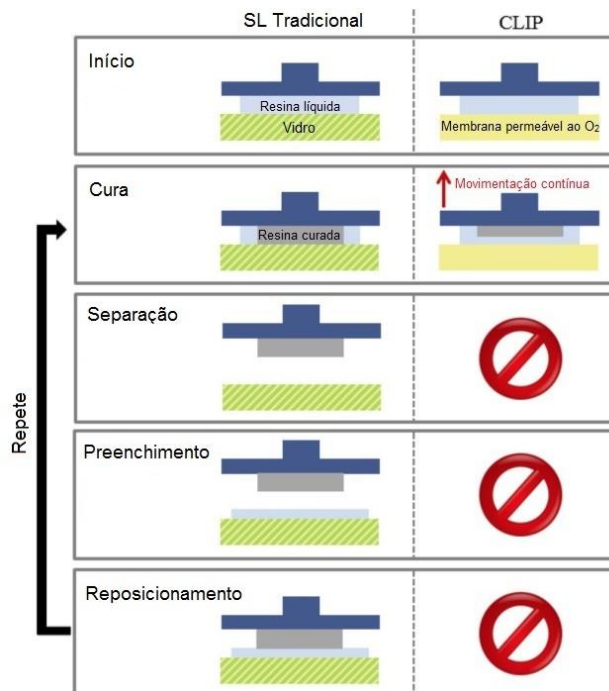


Figura 5 – Comparativo dos processo SL e Clip
Fonte: Adaptado de FCiências (2015).

O processo, que elimina o fatiamento do objeto, é capaz de oferecer melhor acabamento superficial como consequência do seu preenchimento homogêneo e não em camadas (figura 6).

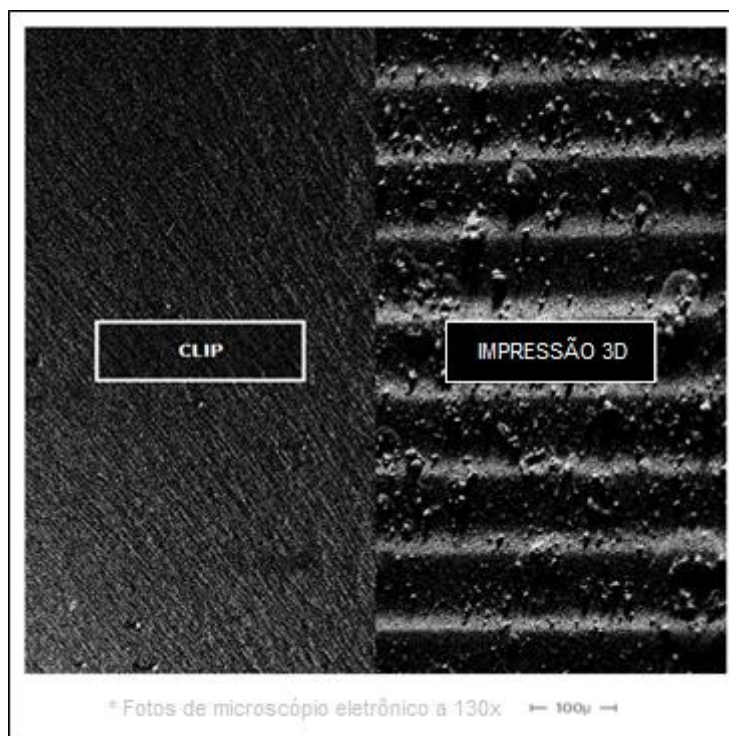


Figura 6 – Comparativo entre acabamentos de Clip e FDM
Fonte: Adaptado de Carbon3D (2015).

Isso também impacta na resistência mecânica do objeto, pois o processo de impressão por FDM gera comportamento anisotrópico na peça impressa devido a influência da orientação de preenchimento (SCULPTEO, 2015). Na Figura 7 é exibido dois tipos de fratura que podem ocorrer numa peça produzida por FDM, onde em um caso há desprendimento da camada quando a tração é aplicada perpendicularmente à direção de preenchimento, graças a falhas de fusão entre camadas, e em outro caso vários filamentos apresentam boa resistência à tração aplicada axialmente.

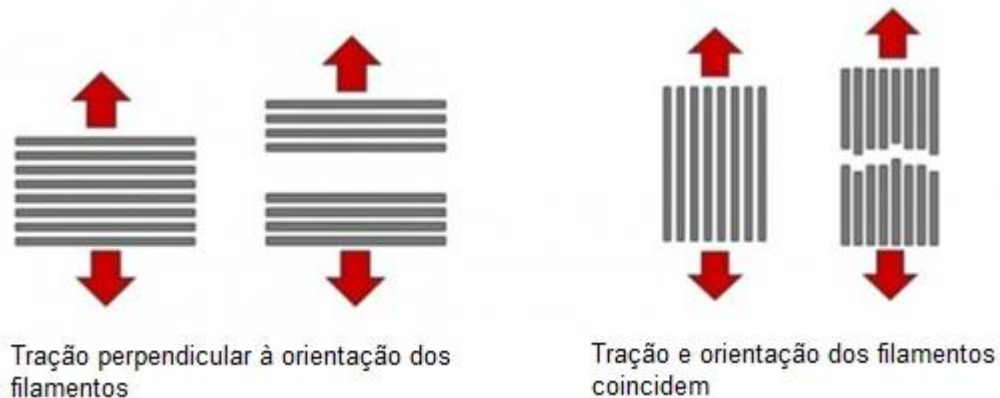


Figura 7 – Influência da direção da força trativa na fratura
Fonte: Adaptado de Sculpteo (2015).

2.5. MODELAGEM E PROCESSAMENTO

O ciclo de desenvolvimento genérico, de acordo com Gibson *et al.* (2010), de produtos da AM contém oito etapas:

- CAD – todas as peças devem ter início na modelagem através de um *software* capaz de recriar a geometria fechada;
- Conversão para STL – é preciso converter o sólido maciço em superfície fechada para que ela possa servir de base para o fatiamento do objeto;
- Transferência do arquivo – o arquivo STL é transferido para a máquina para a manipulação de alguns parâmetros referentes a posição, tamanho e orientação;
- Ajuste da máquina – define-se os parâmetros de preenchimento e temperatura, por exemplo, para poder dar sequência no processo;
- Construção – a peça começa a adquirir a forma desejada com o processo automatizado. A supervisão torna-se necessária apenas para evitar que algum problema siga para as etapas posteriores;
- Remoção – remover a peça pode requerer interação com a máquina e cuidados com o manuseio da mesma;
- Pós-processamento – peças mais complexas dependem de estruturas de suporte para prevenir que não ocorra erros durante a construção. Essa parte do ciclo se refere a limpeza e remoção desses apêndices;
- Aplicação – as peças já estão prontas para aplicação, porém essa é a etapa de acabamento e detalhamento, como pintura e inspeção.

2.6. A IMPRESSORA 3D

O termo “impressora 3D” foi utilizado, patenteado e, em 1999, liberado para tornar-se um termo de domínio público pela Stratasys Inc. para definir a máquina que seria capaz de criar objetos a partir da adição de material (STRATASYS, 2014). A manufatura aditiva era inicialmente utilizada na fase de prototipagem, mas com o tempo passou a ganhar espaço em outras fases de desenvolvimento, tais como prototipagem funcional, produtos pré-acabados ou produtos finais (3DSYSTEMS, 2014).

Como o avanço da tecnologia de impressão tridimensional vem crescendo com o passar dos anos, suas aplicações passaram a desempenhar funções mais técnicas e com especificações mais rigorosas em várias áreas distintas, desde a área médica até engenharia aeronáutica. A seguir, serão citados apenas alguns casos singulares que não cobrem toda sua aplicabilidade.

2.6.1. Aplicações no Ensino

Uma das áreas de atuação para a impressão 3D está na educação. De acordo com Stratasys (2015), uma das pioneiras da tecnologia, introduzir a manufatura aditiva para os alunos expõe o mesmo tipo de tecnologia de ponta que eles encontrarão no futuro em suas carreiras. Mais ainda, estimula a criatividade, a pesquisa e, em consequência disto, a busca pelos limites intelectuais.

Um caso local de uso da impressão para a educação é o GIP3D, que busca criar uma nova ferramenta ou metodologia educacional para os alunos da instituição.

2.6.2. Aplicações na Área Médica

Nesta área de atuação, a impressão tridimensional, juntamente com outros métodos contidos no universo da AM, atua não apenas voltada para o lucro e produtividade, mas também para a área de inclusão social (VOLPATO et al., 2007), tendo em vista que há limitações impostas pela sociedade que impedem o desenvolvimento social de uma pessoa com alguma deformidade facial, por exemplo. A tecnologia permite os médicos de planejar cirurgias craniofaciais com modelos

precisos, reconstrução facial devido à má formação congênita ou acidentes, construção de implantes, fabricação de espaçadores intervertebrais, endopróteses expansíveis, próteses dentárias e outros (CHUA et al., 2010).

2.6.3. Aplicações em *Design*

Como aplicação inicial, a AM visava à materialização do design criado virtualmente para os projetistas poderem visualizar, analisar e avaliar o protótipo de acordo com seus requisitos técnicos e funcionais (CHUA et al., 2010). Assim, o projetista tem a possibilidade de identificar limitações nos processos de fabricação, bem como elaboração de dispositivos de fixação ou caminho das ferramentas.

Com o modelo materializado, também é possível usá-lo para promover o produto em eventos, realizar estudos logísticos como empacotamento e fluxo, distribuição de tensão, entre outros (CHUA et al., 2010). Partindo disto, o responsável será capaz de identificar pontos estruturais frágeis e reduzir custos logísticos como deslocamento e estoque.

2.6.4. Aplicações na Indústria Aeronáutica

Na indústria aeronáutica, a AM pode ser encontrada desde a verificação de design e prototipagem de tomadas de ar até a obtenção de componentes de motores a jato (CHUA et al., 2010). Logicamente, suas aplicações não são reduzidas a apenas o que foi mencionado, pois há também estudos de fabricação de moldes, modelos para estudos de fluidez e outras aplicações relacionadas direta ou indiretamente ao produto.

A empresa General Electric Co. (GE), principal fornecedora de turbinas para a empresa Boeing, tem pesquisas direcionadas para a fabricação das pás da turbina de baixa pressão GE9X (figura 8), para o Boeing 777X a partir da manufatura aditiva (3DPRINT.COM, 2014).

De acordo com Jayakumar (2014), empresas como aeroespaciais também estão utilizando a impressão para fazer pequenas peças, como a empresa Lockheed.



Figura 8 – Vista em corte da turbina GE9X, da companhia GE
Fonte: 3DPrint (2014).

2.6.5. Aplicações na Indústria Automotiva

No setor automotivo, a AM é aplicada principalmente na parte de prototipagem para estudo de geometrias, empacotamento, aquisição de dados e criação de moldes (CHUA et al., 2010).

Um caso de manufatura aditiva voltada para o produto final está presente em um dos carros da marca sueca Koenigsegg, o One:1. Nele, é possível encontrar peças do sistema de propulsão impressas em titânio, como a ponteira do sistema de exaustão (figura 9) e o turbo de geometria variável (3DERS.ORG, 2014).



Figura 9 – Vista traseira do carro Koenigsegg One:1, com a
ponteira do sistema de exaustão em titânio
Fonte: 3Ders (2014).

Além disso, a empresa sueca utiliza a impressão 3D para prototipagem inicial de peças a fim de manipular as formas manualmente, passá-las por um scanner 3D para imprimir as peças novamente (3DERS, 2014).

2.7. REPLICATING RAPID PROTOTYPER

As impressoras intituladas de *Replicating Rapid Prototyper* (RepRap) são máquinas acessíveis capazes de fabricar suas próprias partes para se replicar (REPRAP, 2015), ou seja, uma vez construída, ela será capaz de criar suas próprias peças plásticas para a construção de outras impressoras com o mesmo propósito entre outros objetos.

Idealizadas para serem impressoras de baixo custo que funcionem com softwares livres, as RepRap contam com uma crescente comunidade de entusiastas para compartilhar soluções, melhorias, experiências, dificuldades e para ensinar os novos interessados.

Esse tipo de impressora tem como aplicação produzir protótipos ou objetos de pequenas e médias proporções que não necessitem de tolerâncias geométricas e dimensionais muito precisas. Usualmente, os produtos de uma RepRap são feitos em ácido poliláctico (PLA) ou acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS). Os materiais citados serão comentados na próxima seção.

A aplicação de seus produtos cobre as mais diversas áreas como, por exemplo, itens decorativos, acessórios de escritório, brinquedos, pequenos componentes estruturais, modelos em escala, pequenos mecanismos, bugigangas, bijuterias ou até componentes da própria impressora.

2.7.1. Materiais Estruturais

Os componentes selecionados para sustentar todo o sistema são denominados de componentes estruturais. Além de compor a máquina, eles influenciam no nível de acabamento e precisão geométrica do produto feito pela máquina. Por isso, é importante ter conhecimento dos materiais disponíveis e para que fim eles serão empregados.

Para a estrutura, há algumas opções que poderão ser consideradas. Com base nos produtos disponíveis no mercado de Reprap, as opções mais empregadas para fabricar as peças estruturais são: ABS, PLA, acrílico, alumínio e madeira MDF (Fibra de Média Densidade ou, do inglês, *Medium-Density Fiberboard*). Além dessas

opções, as Reprap fazem o uso de componentes de fixação, união e movimentação disponíveis no mercado, como parafusos, porcas, arruelas, guias lineares e barras roscadas.

2.7.1.1. Ácido polilático (PLA)

O PLA é um polímero biodegradável derivado do ácido láctico, fazendo dele uma ótima alternativa a ser explorada em uma época preocupada com sustentabilidade. Com temperatura de fusão na faixa de 180°C até 220°C, e temperatura de transição vítrea entre 60°C a 65°C, esse polímero apresenta boas características para se trabalhar com impressão (REPRAP, 2014).

Em comparação com o ABS, o PLA apresenta maiores níveis de dureza e fricção. Nesse último caso, o material tem a capacidade de aderir a superfície onde está sendo impresso, que é um ponto a favor, mas também adere facilmente no extrusor provocando entupimentos, que é um ponto contra o seu uso. Outra desvantagem desse material é quanto a umidade, pois ele consegue extrair a umidade do ar ao seu redor, podendo afetar a qualidade na impressão (REPRAP, 2014).

Para uso em estruturas, o PLA apresenta boas características, pois é mais rígido do que o ABS, apresenta menor índice de desgaste, é dimensionalmente estável com variações de temperatura (REPRAP, 2014) e pouco solicitado durante o funcionamento da máquina.

2.7.1.2. Acrílico

O acrílico, também conhecido como polimetilmetacrilato (PMMA), é um polímero cuja aplicação é direcionada mais para a transmissão de luz. Possui propriedades estruturais apenas regulares, servindo para a fabricação de recipientes, acessórios de desenhos e lentes (CALLISTER, 2002).

O acrílico tem como um de seus principais pontos fracos o alto coeficiente de expansão térmica, por volta de $117 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$, que é aproximadamente dez vezes o valor de coeficiente de expansão térmica para aços (CALLISTER, 2002). Apesar disso, a fabricação dos componentes é razoavelmente fácil e rápida. É facilmente encontrado no comércio a um bom preço e garante um apelo visual ímpar para a máquina.

2.7.1.3. *Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)*

O ABS é um termoplástico de excelentes propriedades estruturais, tais como tenacidade, resistente a distorções térmicas, e também possui boas propriedades elétricas (CALLISTER, 2002). Seu coeficiente de fricção é inferior ao do PLA, garantindo assim bons resultados para pequenas impressões e tem menor risco de entupimento no extrusor (REPRAP, 2014).

Com um ponto de transição vítrea de aproximadamente 105°C e ponto de fusão desconhecido por ser amorfo, porém com 230°C como padrão para impressão, o manuseio para impressões torna-se um inconveniente, pois, dependendo do material dos componentes que estiverem próximos, pode prejudicar o processo de fabricação. Contudo, esses pontos superiores são benéficos caso o ABS seja escolhido como componente estrutural, dispensando até mesmo sistema de resfriamento no extrusor (REPRAP, 2014).

2.7.1.4. *Alumínio*

O alumínio é um metal não ferroso. Suas ligas apresentam baixa densidade comparada a metais ferrosos, boa resistência a corrosão, boa resistência mecânica específica e podem ser facilmente conformadas por conta da alta ductilidade (CALLISTER, 2002), permitindo assim a criação de perfis extrudados, que são amplamente aplicados em estruturas.

Os elementos extrudados podem adquirir diferentes formatos para se adequar a diferentes aplicações, como, por exemplo, o perfil V pode ser usado como guia linear, perfil L para montagem de cantos e o perfil quadrado para o esqueleto da máquina.

Para esse tipo de material, as máquinas tendem a ser extremamente robustas, tanto esteticamente como estruturalmente.

2.7.1.5. *Madeira*

Madeira é o material mais explorado pelos membros do GIP3D para construir novos projetos, como gabinetes para a parte eletrônica das impressoras do laboratório

e estruturas para novas impressoras. Muito disto se deve pela facilidade de manuseio e disponibilidade do material.

A madeira pode ser cortada a laser ou ter sua forma definida por fresas de comando numérico computadorizado (CNC), deixando a placa com dimensões fiéis àquelas especificadas. Possui propriedades mecânicas suficientes para suportar o sistema da impressora e é um material leve.

Uma recomendação para sua aplicação em estruturas é aplicar uma camada protetora em suas superfícies a fim de impedir a ação da umidade sobre a madeira.

2.8. ARRANJO MECÂNICO

A composição dos elementos de movimentação e transmissão definem o arranjo mecânico da impressora. Assim como nos componentes estruturais, o arranjo mecânico tem influência sobre o resultado do produto fabricado pela impressora, já que ele define a disposição dos eixos e o modo de como seus componentes se movimentarão. Alguns sistemas podem ser econômicos em espaço e em número de peças, porém o arranjo pode limitar alguns parâmetros de operação para evitar vibração ou deslocamentos indesejados, por exemplo.

A seguir, serão apresentados alguns dos arranjos mecânicos mais comuns disponíveis no mercado.

2.8.1. Cartesiano com Cabeçote no eixo X

Nessa concepção, a máquina possui três eixos formando o espaço reticulado definido pelo sistema de coordenadas cartesiano: o eixo X, correspondendo a largura; o eixo Y, a profundidade; o eixo Z, a altura. Para formar o volume de impressão, o cabeçote, onde fica localizado o bico extrusor da impressora, se desloca sobre guias lineares na direção do eixo X, a mesa de impressão se desloca sobre guias lineares na direção do eixo Y e o conjunto do eixo Y (guias e mesa de impressão) se desloca no eixo Z (figura 10).

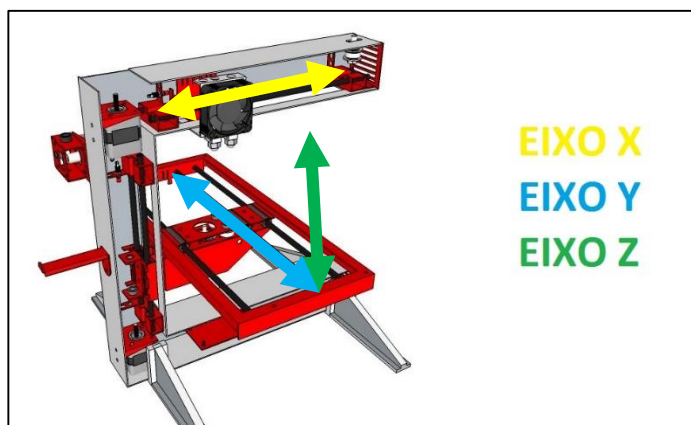


Figura 10 – Arranjo cartesiano X
Fonte: Adaptado de Eventorbot (2015).

Pela figura 10, percebe-se que a ponte por onde o cabeçote percorre está em balanço graças a ausência de uma coluna, que poderia fornecer também um segundo apoio para a plataforma do eixo Y. Nesta concepção ilustrada, altas velocidades nos eixos X e Y poderiam resultar em esforços de flexão e torção na única coluna do conjunto e geraria deformidades na peça impressa. Obviamente, o arranjo cartesiano com cabeçote no eixo X não está limitado a apenas este design.

Outra questão que preocupa é quando o conjunto de um eixo se conecta com o de outro. O acréscimo de massa no segundo eixo, decorrente da união com o primeiro, exige mais de seus componentes, sejam eles os próprios motores de passo, correias ou polias. Além disso, a união de dois eixos é mais complexa, numa tentativa de manter boas tolerâncias geométricas de elementos associados, como perpendicularidade e paralelismo.

2.8.2. Cartesiano com Cabeçote no plano XY

Nessa configuração, a máquina possui três eixos formando o espaço reticulado definido pelo sistema de coordenadas cartesiano: o eixo X, correspondendo a largura; o eixo Y, a profundidade; o eixo Z, a altura. Para formar o volume de impressão, o cabeçote, onde fica localizado o *hotend* da impressora, se desloca sobre guias lineares nas direções do eixo X e do eixo Y, enquanto a mesa de impressão se desloca apenas no eixo Z (figura 11).

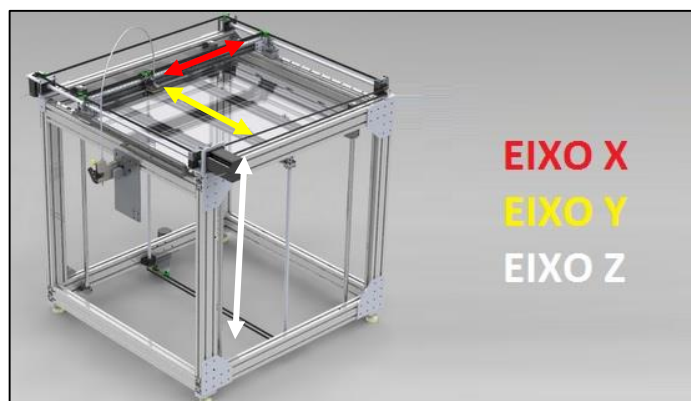


Figura 11 – Representação do arranjo cartesiano XY
Fonte: Adaptado de 3D Printer List (2015).

Geralmente, impressoras que adotam esse arranjo apresentam grandes dimensões externas para acomodar todo o *hardware* em seu interior, formato prismático de base retangular e possuem boa rigidez estrutural.

Com estas características, este arranjo foi bem explorado e se tornou uma das configurações mais populares no mercado. A presença de variações para o mecanismo é um reflexo de quanto esta concepção foi estudada. Para reforçar a ideia, mesmo buscando explorar as variedades disponíveis, três das nove impressoras que serão descritas posteriormente adotam esta configuração.

A primeira variação para a configuração possui pelo menos um motor de passo estacionário para a translação na direção do eixo Y enquanto um outro motor de passo, que se movimenta ao longo do eixo Y, fica responsável por movimentar o cabeçote no eixo X (figura 12).

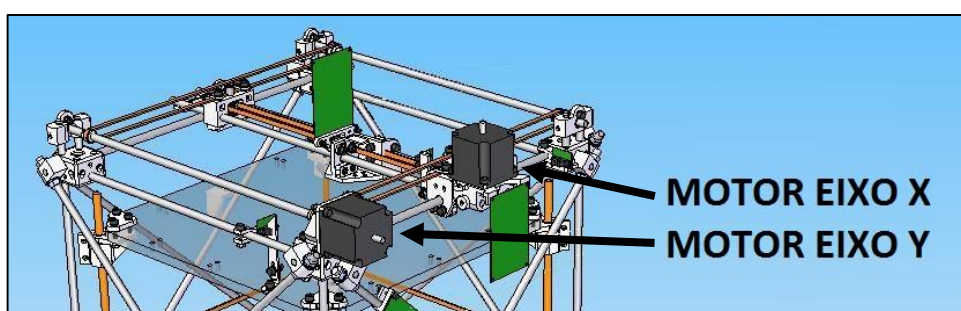


Figura 12 – Representação do arranjo cartesiano XY tradicional
Fonte: RepRap (2015).

Da Figura 12, duas correias sincronizadoras estão conectadas, através de um eixo provido de polias sincronizadoras, ao motor de passo do eixo Y. Na ponte, encontra-se o motor de passo do eixo X montado em uma das pontas da ponte, que

está sincronizada a uma das correias do eixo Y. De modo similar, a outra ponta da ponte se prende à outra correia sincronizadora. Assim, as duas pontas são movimentadas pelo motor de passo do eixo Y através das polias.

A segunda variação apresentada é uma melhoria da anterior. De acordo com BuildA3DPrinter (2015), quanto mais pesada a peça móvel for, mais difícil será de fazê-la parar ou de mudar de direção. Sendo assim, sua intenção foi de realocar o motor da ponte de modo que este estaria preso a estrutura, reduzindo a massa móvel total do sistema X. Fazendo isso, acelerações e desacelerações do sistema Y aumentariam como consequência da massa retirada da ponte. Resumidamente, a segunda variação para a configuração, batizada de H-Bot, possui dois motores de passo estacionários para a translação do cabeçote nas direções X e Y (figura 13).

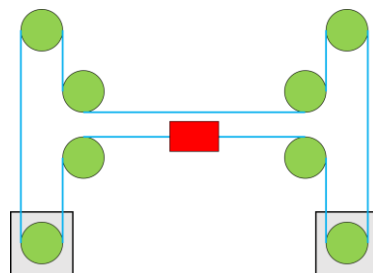


Figura 13 – Representação do arranjo H-Bot
Fonte: Do autor (2015).

Partindo da Figura 13, o sistema é composto por oito polias sincronizadoras (em verde) que, com a rotação dos dois motores estacionários (em cinza), transmitem o movimento para o cabeçote (em vermelho) através de uma única correia sincronizadora (em azul). Já pela Figura 14, observa-se a influência da rotação dos motores na movimentação da ponte ou do cabeçote. Para os casos em que os motores atuem com mesma velocidade angular e sentido de rotação, o cabeçote se move somente na direção do eixo X, enquanto nos casos em que os motores rotacionam em sentidos opostos o cabeçote se move na direção Y. As equações de movimento serão exibidas em breve, juntamente com a terceira variação.

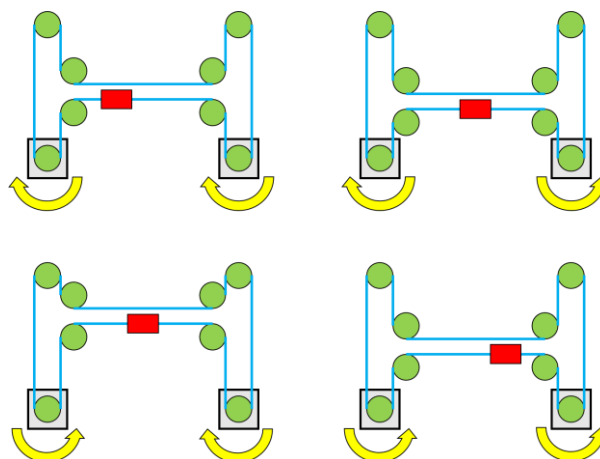


Figura 14 – Cinemática do arranjo H-Bot
Fonte: Do autor (2015).

Como mencionado anteriormente, a principal vantagem para se adotar esse mecanismo se deve pelo alívio de massa na ponte com a retirada do motor de passo. No entanto, a atuação para a movimentação do cabeçote no eixo X gera um momento indesejável na ponte (figura 15), desalinhando a estrutura e comprometendo a confiabilidade da impressão além de gerar atrito no eixo Y.

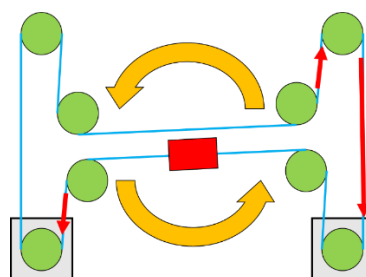


Figura 15 – Efeito das forças trativas sobre o arranjo H-Bot
Fonte: Do autor (2015).

A terceira variação é derivada da H-Bot. Chamada de CoreXY, a configuração prevê anular o momento binário descrito anteriormente. Com a adoção de mais uma correia sincronizadora e um par de polias, as correias se cruzam em planos distintos para solucionar tal problema e deixam espaço livre para a translação do cabeçote (COREXY, 2012). Sua intenção também foi de realocar o motor da ponte de modo que este estaria preso a estrutura, reduzindo a massa móvel total do sistema X. Assim como a H-Bot, a CoreXY possui dois motores de passo estacionários para a translação do cabeçote nas direções X e Y (figura 16).

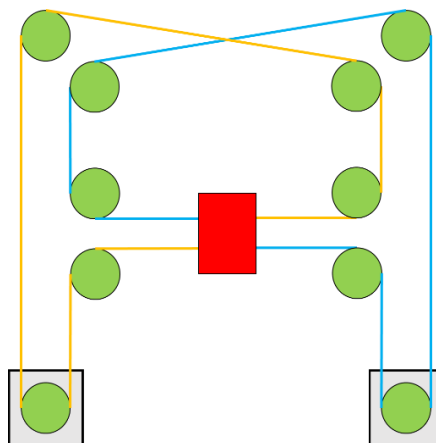
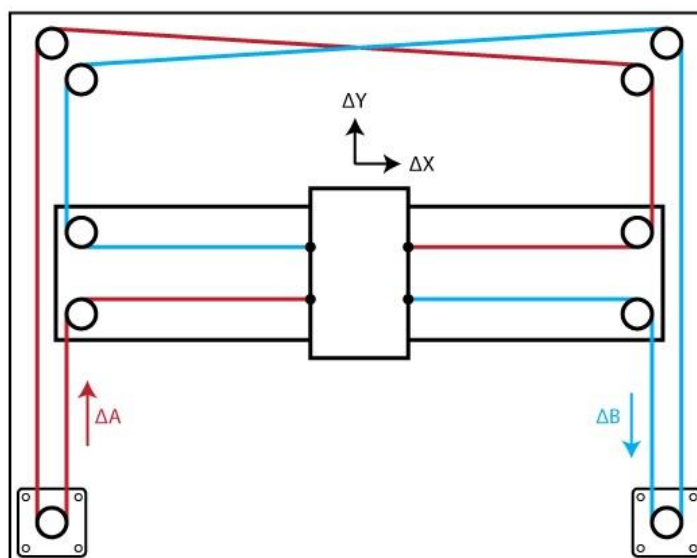


Figura 16 – Representação do arranjo CoreXY
Fonte: Do autor (2015).

Partindo da Figura 12, o sistema é composto por dez polias sincronizadoras (em verde) que, com a rotação dos dois motores estacionários (em cinza), transmitem o movimento para o cabeçote (em vermelho) através de duas correias sincronizadoras (azul em um plano e laranja em outro plano). A cinemática deste sistema respeita a Figura 17.



Equações de movimento:

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta B), \quad \Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta B)$$

$$\Delta A = \Delta X + \Delta Y, \quad \Delta B = \Delta X - \Delta Y$$

Figura 17 – Cinemática e equações de movimento para H-Bot e CoreXY
Fonte: Adaptado de CoreXY (2015).

As equações de movimento, exibidas na Figura 17, são aplicadas tanto para o CoreXY quanto para o H-Bot. Para comprovar a veracidade delas, será dado valores a fim de observar as consequências em ΔX e ΔY :

- I. Os dois motores são acionados com mesma velocidade angular e em sentidos iguais ($\Delta B = \Delta A$), esperando movimentação somente em X.

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta B);$$

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta A);$$

$$\Delta X = \Delta A \quad \leftarrow$$

$$\Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta B);$$

$$\Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta A);$$

$$\Delta Y = 0 \quad \leftarrow$$

- II. Os dois motores são acionados com mesma velocidade angular e em sentidos opostos ($\Delta B = -\Delta A$), esperando movimentação somente em Y.

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta B);$$

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta A);$$

$$\Delta X = 0 \quad \leftarrow$$

$$\Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta B);$$

$$\Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta A);$$

$$\Delta Y = \Delta A \quad \leftarrow$$

De fato, as equações de movimentação confirmaram as afirmações, tanto para a segunda variação quanto para a terceira. Assim, pode-se extrapolar para uma terceira situação, quando apenas um motor de passo realiza trabalho.

- III. Um motor é acionado ($\Delta A = a$) e o segundo motor se mantém imóvel ($\Delta B = 0$).

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta B);$$

$$\Delta X = \frac{1}{2}(a + 0);$$

$$\Delta X = \frac{a}{2} \quad \leftarrow$$

$$\Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta B);$$

$$\Delta Y = \frac{1}{2}(a - 0);$$

$$\Delta Y = \frac{a}{2} \quad \leftarrow$$

Para o terceiro caso, observa-se que as variações em X e em Y são iguais, ou seja, o movimento resultante é uma diagonal.

Finalizando a discussão, a adição da segunda correia permitiu que, para a movimentação do cabeçote no eixo X, as correias fossem tracionadas no mesmo lado da ponte, porém em sentidos opostos. Assim, a ponte se mantém alinhada (figura 18).

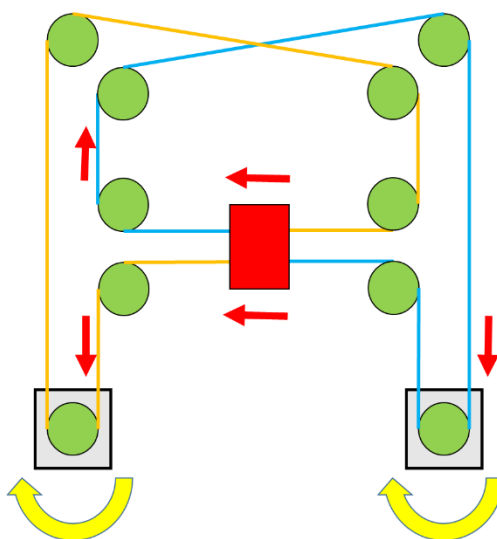


Figura 18 – Representação de forças trativas no arranjo CoreXY
 Fonte: Do autor (2015).

2.8.3. Cartesiano com Cabeçote no plano XZ

Nessa configuração, a máquina possui três eixos formando o espaço reticulado definido pelo sistema de coordenadas cartesiano: o eixo X, correspondendo a largura; o eixo Y, a profundidade; o eixo Z, a altura. Para formar o volume de impressão, o cabeçote, onde fica localizado o *hotend* da impressora, se desloca sobre guias lineares nas direções do eixo X, estas que formam uma ponte, são sustentadas pelas pontas e se movem na direção do eixo Z, enquanto a mesa de impressão se desloca apenas no eixo Y (figura 19).

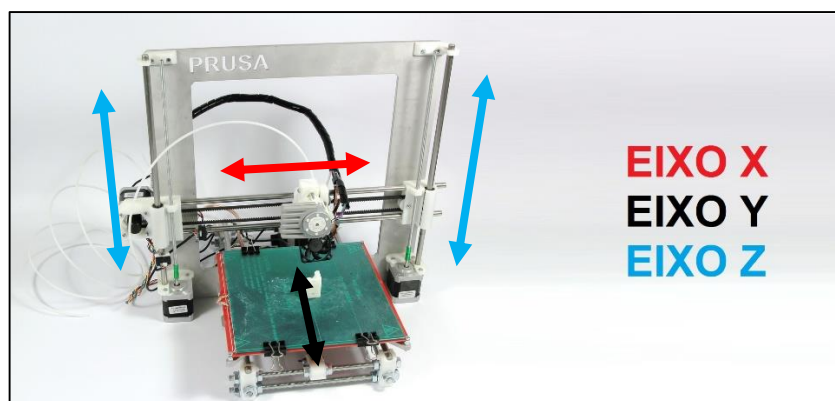


Figura 19 – Representação do arranjo cartesiano XZ
Fonte: Adaptado de Extreme Tech (2015).

Geralmente, impressoras que adotam esse arranjo apresentam dimensões externas mais compactas, muitas vezes mantendo parte dos *hardwares* expostos. Pode-se dizer que suas peças são acessíveis para fazer reparos e substituições, mas o fato delas não estarem envoltas por algo as deixam desprotegidas de impurezas e choques mecânicos.

Outro ponto importante a se notar é que, de acordo com RepRap (2013), a máquina apresenta níveis de rigidez diferentes de acordo com sua construção e complexidade (figura 20). Ao contrário dos outros arranjos comentados, onde o cabeçote era a principal fonte de vibração decorrente da movimentação, a movimentação rápida da mesa também pode provocar grandes perturbações.

Complexidade x Rigidez das estruturas das RepRaps (2013)

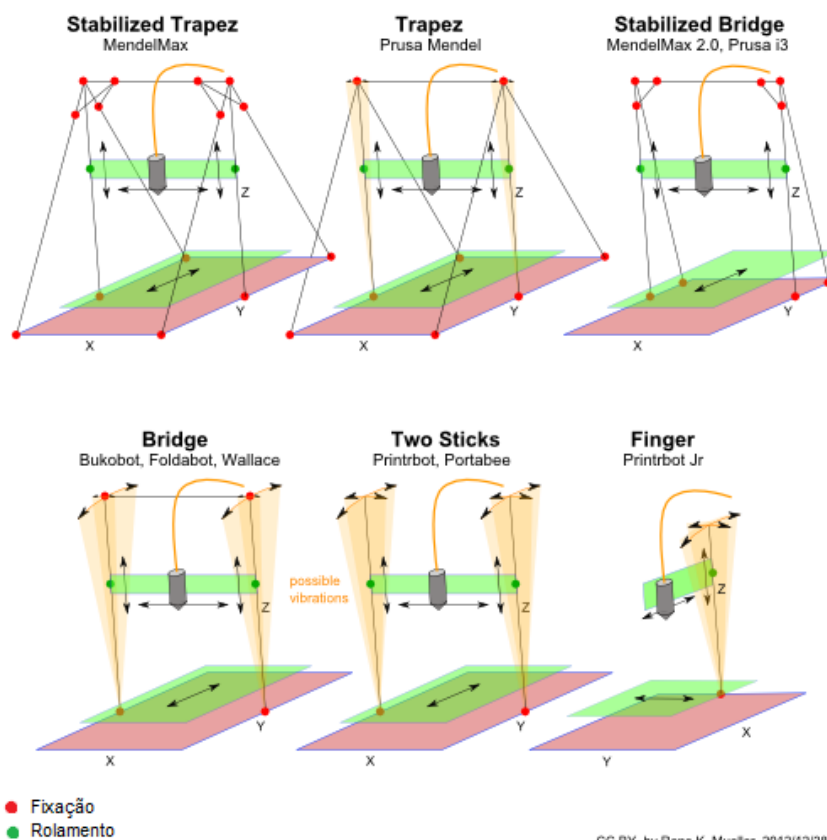


Figura 20 – Complexidade versus rigidez de estruturas
Fonte: Adaptado de RepRap (2015).

Pela Figura 20, é possível extrair que estruturas treliçadas estabilizam a estrutura em pelo menos uma direção. Os graus de liberdade (representados em laranja) tendem a diminuir à medida que se adiciona pontos de fixação, porém deixam a máquina mais complexa.

Assim como o arranjo da configuração cartesiana com o cabeçote no plano XY, essa concepção é popular pelo fato de ser simples e barato. No quadro comparativo que será mostrado posteriormente, as quatro impressoras avaliadas que configuram esse arranjo são as quatro impressoras mais baratas.

2.8.4. Delta

As impressoras no formato Delta são impressoras que usam uma abordagem diferente para movimentar o cabeçote do ponto A até o ponto B. Nas configurações cartesianas, o principal problema citado neste trabalho a ser resolvido gira em torno

das massas móveis que, com movimentos abruptos, gera perturbação na estrutura da máquina. Entretanto, este problema não fica tão evidenciado no arranjo Delta.

As partes móveis da Delta são leves e conseqüentemente ela é capaz de se mover mais rapidamente e com maior precisão (BUILDA3DPRINTER, 2015). Ela possui basicamente uma mesa fixa e três braços articulados dispostos equilateralmente que conectam os fusos com o cabeçote. Para alcançar os pontos no seu volume de impressão, os fusos giram e fazem os braços se movimentarem para cima ou para baixo, mantendo o cabeçote sempre paralelo com a mesa de impressão. A combinação da rotação dos fusos permite imprimir sobre uma área circular (figura 21).

A impressora ainda consegue ser simples de montar, embora o mecanismo não seja tão intuitivo, devido a pequena quantidade de peças quando comparado com as outras impressoras.

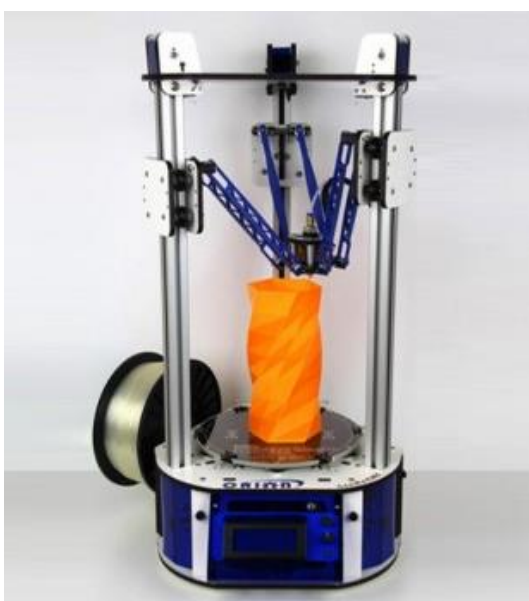


Figura 21 – Exemplar de impressora com arranjo Delta
Fonte: SeeMeCNC (2015)

2.8.5. Outras opções

Nas subseções anteriores, foi mostrado brevemente os principais tipos de impressoras disponíveis no mercado e que cobrem boa parte do que será visto nos próximos capítulos. Contudo, as formas de se imprimir não estão limitadas somente a estas. Alguns dos outros arranjos são:

- Arranjo Polar: impressoras que usam o sistema de coordenadas polar cilíndrica, compostas por uma mesa de impressão giratória que dita o ângulo, um eixo X representando o raio e um eixo Z para a altura (figura 22);



Figura 22 – Exemplar de impressora com arranjo Polar
Fonte 3Ders (2013).

- Braço Robótico: braço articulado com um extrusor em sua ponta, movido por servo-motores e microcontroladores (figura 23);

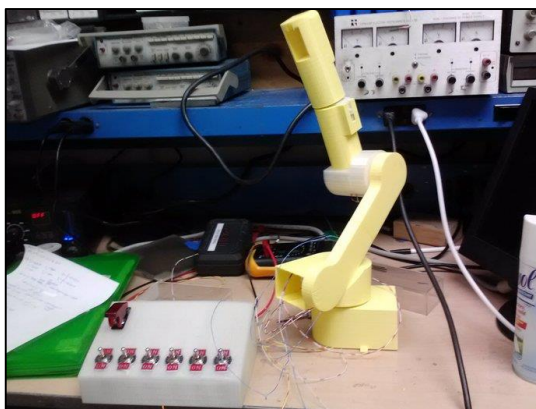


Figura 23 – Exemplar de impressora com arranjo Braço Robótico
Fonte: Makerbot Thingiverse (2012).

- Arranjo Scara (*Selective Compliant Articulated Robot Arm*): princípio similar à configuração Polar e Braço Robótico, porém a mesa se move no eixo Z e os braços articulados determinam o raio e a angulação (figura 24);



Figura 24 – Exemplo de impressora com arranjo Scara
Fonte: 3Ders (2013).

3. METODOLOGIA

Este capítulo do trabalho é reservado para descrever a metodologia de trabalho empregada neste projeto e também todos os materiais utilizados para a realização da tarefa.

3.1. BENCHMARKING

Primeiramente, antes mesmo de dar os primeiros passos na materialização do sistema de movimentação no plano XY, sentiu-se a necessidade de buscar conhecimento sobre o assunto. Para isso, fez-se o levantamento do estado da arte através de um *benchmarking*, que resultou numa breve análise técnica das máquinas e permitiu montar um quadro comparativo.

3.2. MODELAGEM DA IMPRESSORA

A seguir, o foco estava voltado para a análise da impressora na fase inicial da montagem (figura 25).

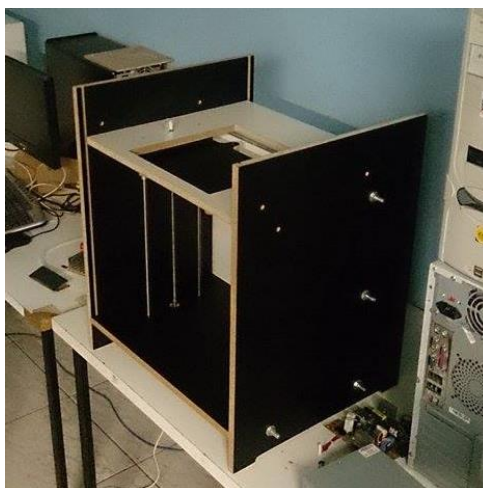


Figura 25 – Impressora na fase inicial da montagem.

Fonte: Do autor (2015).

Neste estado, com o auxílio de uma trena e paquímetro, foi possível mensurar a máquina e modelar tridimensionalmente utilizando o programa gráfico SolidWorks

2014, com a finalidade de estudar suas dimensões e definir o espaço disponível para a instalação do sistema em questão.

3.3. DEFINIÇÃO DO SISTEMA

Após estudar as alternativas analisadas no *benchmarking* e a modelagem da impressora, foi discutido a escolha do sistema XY com o auxílio dos membros do GIP3D, levantando questões de viabilidade, complexidade, vantagens e desvantagens.

Ainda nesta etapa do projeto, com base nas primeiras conversas, modelou-se preliminarmente o sistema levando em consideração o modelo tridimensional da impressora. Assim, o sistema seria apresentado e avaliado pelos membros do grupo, fechando um ciclo iterativo de melhoria do sistema até se chegar na solução desejada. Com a solução definida, fez-se o detalhamento do projeto para que as peças customizadas pudessem ser fabricadas.

3.4. FABRICAÇÃO

A fabricação foi realizada dentro das instalações da UTFPR. Foram utilizadas as dependências da modelaria do Departamento Acadêmico de Desenho Industrial (DADIN), provida de máquinas CNC para realizar o corte das estruturas em madeira, e o GIP3D, com as impressoras disponíveis e bancada para montagem.

4. PROJETO

Este capítulo está dedicado à exposição do produto de cada uma das etapas descritas no capítulo anterior, compondo o projeto completo.

4.1. BENCHMARKING

O *benchmarking* é uma boa prática utilizada para se obter melhorias a partir de um processo contínuo de avaliação de produtos, serviços ou processos de trabalho de organizações reconhecidas por ter os melhores resultados (PINTO, 2005). Sendo assim, foram selecionados alguns exemplares de impressoras 3D populares ou com os melhores índices de desempenho, de acordo com sites especializados, a fim de enxergar soluções e especificações que atraíram o público. Tal prática evita erros derivados unicamente da intuição ou percepção, pois o processo se baseia em fatos e dados.

Oito impressoras foram selecionadas e separadas de acordo com sua construção ou arranjo.

4.1.1. Cartesiano com cabeçote no plano XY

Para esta configuração, foram selecionadas três impressoras que respeitam os critérios listados acima. São elas:

- RepRap 1.0 “Darwin”;
- Makerbot Replicator 5th Generation;
- Ultimaker 2.

A primeira delas, a Darwin (figura 26), foi escolhida pela sua contribuição para o crescimento das impressoras acessíveis e replicáveis no mercado. Segundo a RepRap (2015), a impressora foi criada por Adrian Bowyer, professor da Universidade de Bath e fundador do RepRap Project, para ser capaz de reproduzir grande parcela de seus componentes estruturais para formar uma nova impressora. O projeto levou aproximadamente 3 anos para fabricar sua primeira réplica (figura 27).

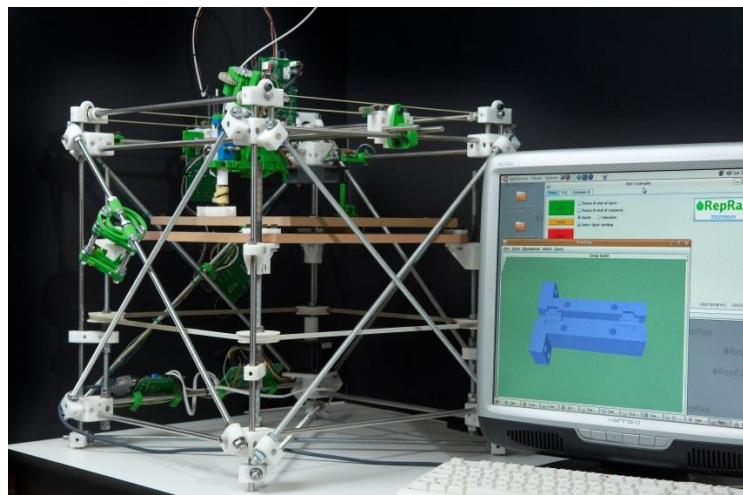
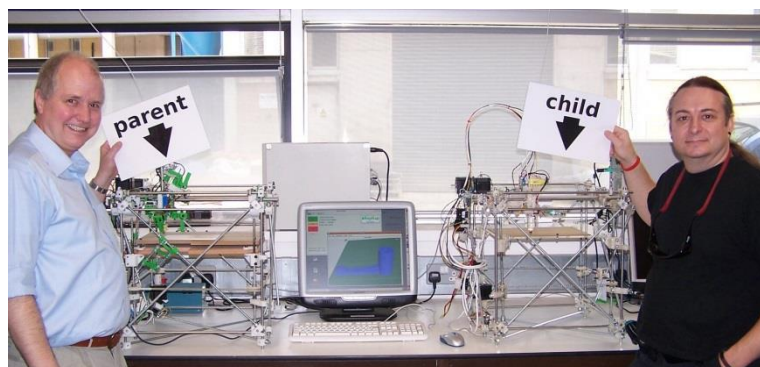


Figura 26 – RepRap 1.0 “Darwin”
Fonte: RepRap.org (2015)



**Figura 27 – A Darwin original exposta a esquerda e a sua
 réplica a direita**
Fonte: RepRap.org (2015)

Sua construção tem formato cúbico, composto por barras roçadas como arestas e peças impressas como vértices, extensores e conectores.

As outras duas impressoras possuem características de operação melhores do que a Darwin por duas razões principais: a primeira pelo fato da Darwin ser obsoleta e a segunda por elas serem impressoras comercializadas em pacotes fechados, montadas e com pós-venda ligado ao time de desenvolvimento das respectivas máquinas.

O exemplar da Makerbot (figura 28) e da Ultimaker (figura 29) estão entre as melhores impressoras disponíveis no mercado atualmente e estão presentes em algumas páginas eletrônicas de comparativos. Suas principais características são precisão mecânica dos eixos e resolução da camada. Possuem preços similares,

porém a Makerbot está passando por melhorias técnicas enquanto a Ultimaker é um projeto consolidado e mais confiável.



Figura 28 – Makerbot Replicator 5th Generation
Fonte: Makerbot (2015)



Figura 29 – Ultimaker 2
Fonte: Ultimaker (2015)

Em geral, as três impressoras analisadas possuem grande dimensões externas quando comparadas com as dimensões do volume de impressão, os melhores níveis de precisão dimensional e permitem altas velocidades (pelo menos para as impressoras comerciais).

4.1.2. Cartesiano com cabeçote no plano XZ

Para esta configuração, foram selecionadas quatro impressoras que respeitam os critérios listados acima. São elas:

- RepRap Prusa Mendel Iteration 2 (Prusa i2);
- RepRap Prusa Mendel Iteration 3 (Prusa i3);
- RepRap Huxley Duo;
- PrintrBot Simple Metal.

A Prusa i2 (figura 30), apesar de ser relativamente antiga, ainda é uma das impressoras mais populares dentre as RepRap. Seguindo a ideia de sua antecessora, a RepRap Mendel, a Prusa i2 também economiza em espaço e aumenta a velocidade de impressão. Muitas das melhorias foram realizadas para facilitar a vida do usuário, como adoção de peças que se encaixam (contra aquelas que são parafusadas), utilização de rolamentos lineares e melhores correias (REPRAP, 2015).

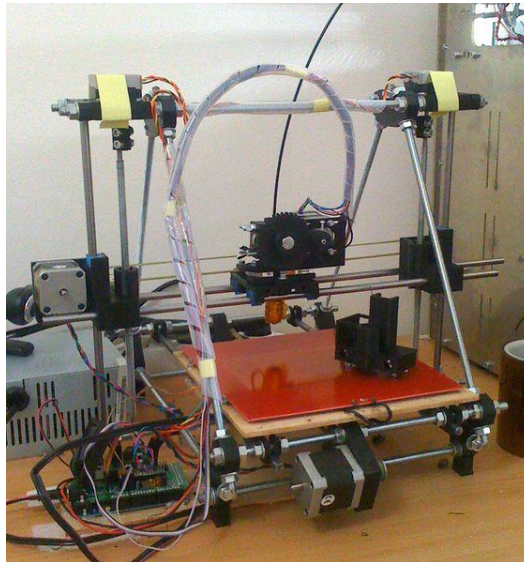


Figura 30 – Prusa Mendel Iteration 2
Fonte: RepRap.org (2015)

Por ser minimalista, essa solução de estrutura é uma boa opção para aquele que está iniciando no ramo das Reprap como hobbista, pois apresenta preço competitivo e manuais de instruções bem elaborados e bem ilustrados disponíveis nos pacotes de venda ou até mesmo em fóruns e vídeos na *internet*. Em contrapartida, sua montagem exige boas habilidades manuais e principalmente paciência, uma vez que o apertar das porcas nas barras roscadas definirá as dimensões do esqueleto da impressora, podendo assim comprometer o alinhamento dos componentes e, conseqüentemente, a confiabilidade de impressão. Com isso, o cliente/operador se obriga a desenvolver um senso de organização e disciplina para montar

adequadamente a máquina e manter o aparelho operacional, ganhando bastante experiência no ramo.

A Prusa i3 é a sucessora no mercado da Prusa i2 (figura 31). No modelo mais atual, alguns defeitos e inconvenientes encontrados em seus predecessores foram corrigidos. Sua estrutura possui componentes comerciais, peças impressas em ABS ou PLA e peças cortadas em MDF, acrílico ou alumínio (essas três opções são as mais comuns encontradas no mercado).



Figura 31 – Prusa Mendel Iteration 3
Fonte: RepRap.org (2015)

Com a adição de chapas cortadas, a Prusa i3 apresenta melhor rigidez, maior facilidade de montagem e melhores tolerâncias geométricas e posicionais. Maiores possibilidades de customização também passam a ser um atrativo, permitindo escolher material, acabamento e cor de acordo com o gosto e necessidade do cliente. Apesar disso, o custo de materiais e corte a laser das chapas aumentam o custo do produto e diminuem o número de peças impressas, ferindo levemente o propósito de se replicar. Essa opção também fornece melhor acomodação para o sistema eletrônico da máquina quando comparado com a Prusa i2.

De acordo com RepRap (2015), a RepRap Huxley (figura 32) é baseada na Mini-Mendel, versão menor da RepRap Mendel, também idealizada por Ed Sells, com a missão de ser a impressora mais rápida de todas. Para isso, a Huxley faz uso do já

simples design das Mendel, porém com peças redesenhadas para ser até 30% do tamanho da impressora original. Isso implica em dizer que ela ocupa espaços menores, é mais leve, mais portátil, possui peças móveis mais leves que garantem melhor nível de qualidade.

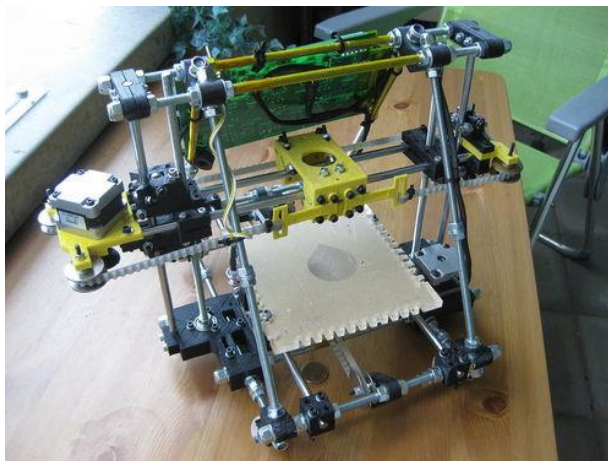


Figura 32 – RepRapPro Huxley
Fonte: RepRap.org (2015)

Assim como na Prusa I2, a Huxley é minimalista, barata e exige boas habilidades manuais para montar a fim de deixá-la confiável. Com isso, o cliente/operador se obriga a desenvolver um senso de organização e disciplina para montar adequadamente a máquina e manter o aparelho operacional, ganhando bastante experiência no ramo.

A última selecionada foi a PrintrBot Simple Metal (figura 33). Diferentemente das anteriores, ela é uma impressora comercial com apenas uma coluna de sustentação para todo o sistema de deslocamento nos eixos X e Z. Dentre as analisadas, a impressora não tem boa precisão geométrica comparada às outras, porém é a mais rápida.



Figura 33 – PrintrBot Simple Metal
Fonte: PrintrBot (2015).

O grupo com essa configuração de arranjo é o grupo das impressoras mais leves, compactas e que conseguem aproveitar melhor seu volume total.

4.1.3. Delta

Diferentemente das concepções mostradas anteriormente, a impressora SeeMeCNC Orion Delta possui arranjo Delta (figura 34). Esse tipo de configuração acaba favorecendo a fabricação de objetos altos com simetria cilíndrica do que objetos retangulares, tendo em vista que a sua base tem formato circular e possui longas guias verticais.

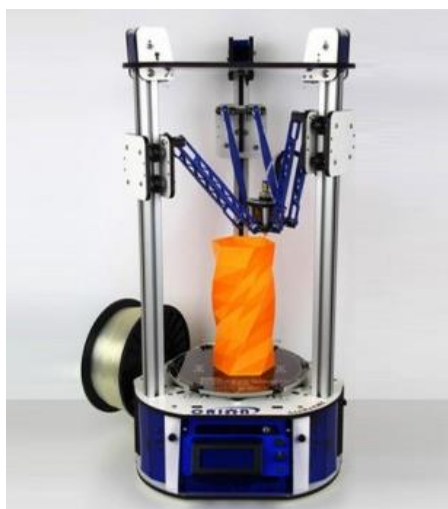


Figura 34 – SeeMeCNC Orion Delta
Fonte: SeeMeCNC (2015)

Por ser uma impressora comercial, o aspecto visual agrada pelo melhor acabamento e pela capacidade de esconder sua fiação e *hardwares*, tornando-a até mais silenciosa e mais fácil de manusear ou limpar. Há também uma tela de LCD para selecionar funções e configurar a impressora, entrada USB e entrada para cartão de memória SD.

4.1.4. Quadros Comparativos

Com base no *benchmarking* efetuado, foi possível construir dois quadros comparativos que contêm as especificações técnicas de cada máquina. No primeiro quadro comparativo (figura 35) estão os dados das impressoras baseadas no conceito RepRap, enquanto no segundo quadro comparativo constam apenas as impressoras comerciais.

	Unidade	RepRap Darwin	Prusa Mendel Iteration 2	Prusa Mendel Iteration 3	RepRapPro Huxley Duo
Tipo		RepRap	RepRap	RepRap	RepRap
Dimensões (x, y, z)	mm	600 x 520 x 650	440 x 470 x 370	420 x 370 x 380	260 x 280 x 280
Peso	kg	14		7	4,5
Arranjo Mecânico		Cartesiano XY	Cartesiano XZ	Cartesiano XZ	Cartesiano XZ
Configuração		Kit	Kit	Kit	Kit
Filamento		ABS ou PLA	ABS ou PLA	ABS ou PLA	ABS ou PLA
Diâmetro do filamento	mm	Ajustável	1,75	1,75 ou 3	1,75
Preço	US\$ [£]	---	345	345	[290]
Volume de impressão (X, Y, Z ou Ø, Z)	mm	230 x 230 x 100	200 x 200 x 110	200 x 200 x 180	138 x 140 x 95
Espessura da camada	mm	0,3	0,1	0,1 - 0,5	0,1
Velocidade de impressão	mm/s	---	40	50 - 100	30
Precisão	mm	0,1	0,01 - 0,02	X e Y: 0,015 Z: 0,0007	0,0125
Conectividade		USB	USB	USB	USB Ethernet
Referência		http://reprap.org/wiki/RepRapOneDarwin	https://www.3dprintersonline.com/product/reprap/prusa-semi-built-kit	https://www.3dprintersonline.com/product/reprap/replikeo-prusa-i3-rework-kit	https://reprappro.com/shop/reprap-kits/huxley-duo-kit/

Figura 35 – Quadro comparativo entre impressoras RepRap.

Fonte – Do autor (2015).

	Unidade	Orion Delta	PrintrBot Simple Metal	Makerbot Replicator 5th Generation	Ultimaker 2
Tipo		Comercial	Comercial	Comercial	Comercial
Dimensões (x, y, z)	mm	356 x 356 x 610	406 x 305 x 406	528 x 441 x 410	357 x 342 x 388
Peso	kg	8,2	7,3	16	11,2
Arranjo Mecânico		Delta	Cartesiano XZ	Cartesiano XY	Cartesiano XY
Configuração		Montado	Kit / Montado	Montado	Montado
Filamento		ABS, Nylon, PLA ou PVA	PLA	PLA	ABS ou PLA
Diâmetro do filamento	mm	1,75	1,75	1,75	3
Preço	US\$ [£]	1049	539 / 599	2899	2499
Volume de impressão (X, Y, Z ou Ø, Z)	mm	150 x 235	150 x 150 x 150	252 x 199 x 150	230 x 225 x 205
Espessura da camada	mm	0,05	0,1 a 0,3	0,1	0,02 a 0,2
Velocidade de impressão	mm/s	30 - 60	80	---	30 - 300
Precisão	mm	Ø: 0,1 Z: 0,0125	0,1	X e Y: 0,011 Z: 0,0025	X e Y: 0,012 Z: 0,005
Conectividade		USB SD card	USB SD card	USB Wi-Fi Ethernet	USB SD card
Referência		http://seemecnc.com/products/orion-delta-3d-printer	http://printrbot.com/shop/assembled-simple-metal/	http://3d-printers.toptenreviews.com/replicator-details.html	http://www.dynamis.com/3d-printers/ultimaker-2.shtml

Figura 36 – Quadro comparativo entre impressoras comerciais.
Fonte – Do autor (2015).

4.2. MODELAGEM DA IMPRESSORA

A impressora em questão é um projeto e propriedade do GIP3D e conta com a colaboração de vários membros do grupo. Este projeto foi dividido em grupos de trabalho para que possam trabalhar paralelamente e, de certa maneira, independentemente.

O foco deste trabalho está na elaboração do sistema de movimentação do cabeçote no plano XY. Para isso, foi necessário definir o espaço disponível para a instalação do sistema e, com base nisto, projetar o sistema para que ele se encaixe no corpo da impressora. Então, a modelagem da impressora pareceu ser um bom começo.

4.2.1. Medição da Impressora Física

O primeiro passo para a modelagem foi extrair as medidas de componentes da impressora física no estado inicial de montagem. Para isso, foi utilizado uma trena e um paquímetro para mensurar as dimensões dos componentes relevantes que definiram o espaço disponível e um bloco de anotações para registrar as medidas.

4.2.2. Modelagem dos Componentes

O segundo passo para a modelagem foi transcrever as informações colhidas da impressora para um programa gráfico de modelagem. O programa escolhido foi o SolidWorks 2015.

As anotações feitas e a impressora física presente proveram as informações necessárias para a modelagem no programa (figura 37).

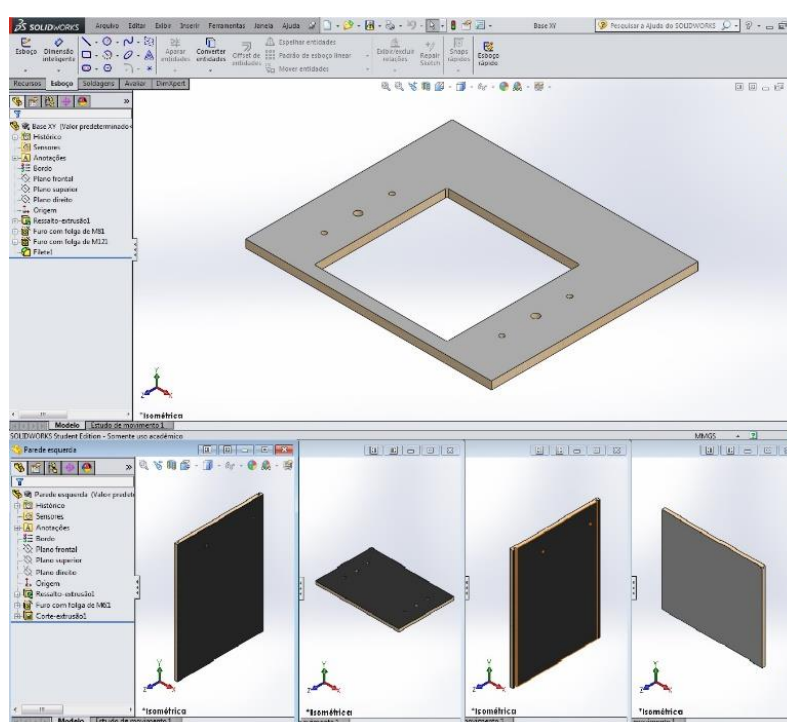


Figura 37 – Modelagem da impressora (componentes)
Fonte: Do autor (2015).

4.2.3. Montagem dos Componentes

Após ter modelado cada componente individualmente com o SolidWorks, foi possível fazer a montagem deles utilizando o mesmo programa. Cada componente foi posicionado de modo que a impressora virtual simulasse a montagem real da impressora física (figura 38).

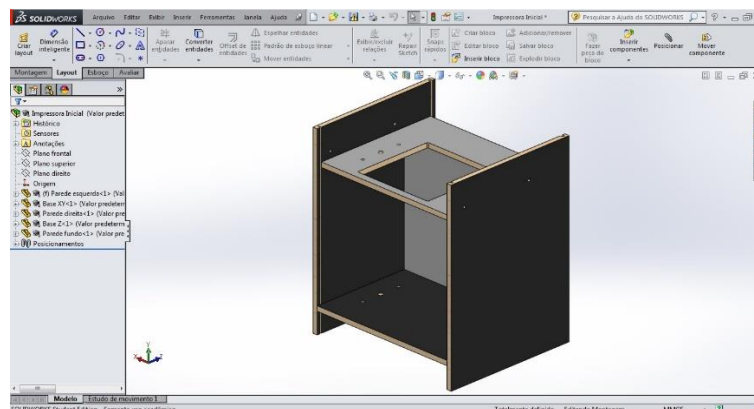


Figura 38 – Modelagem da impressora (montagem)
Fonte: Do autor (2015).

Partindo do modelo já montado, foi possível determinar o espaço disponível. O espaço foi definido basicamente por um retângulo de 470mm de comprimento por 395mm de largura, com um corte retangular passante de 254mm de comprimento por 254mm de largura, representado pela área destacada em azul na Figura 39.

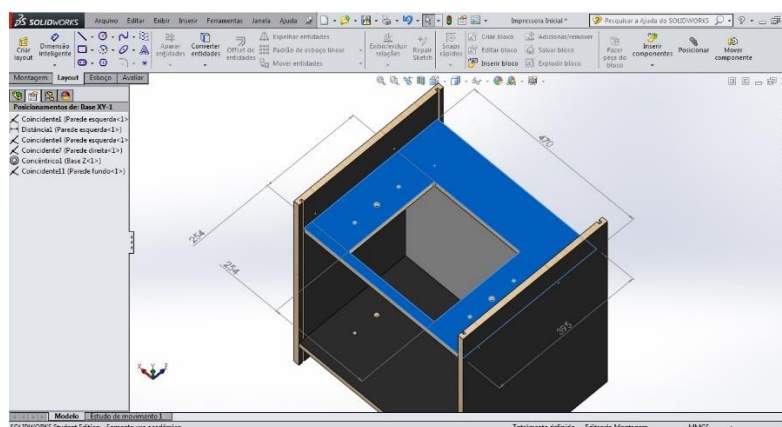


Figura 39 – Definição do espaço disponível para o sistema
Fonte: Do autor (2015).

4.3. DEFINIÇÃO DO SISTEMA

O ponto de partida para o detalhamento do sistema XY se deu ao levar em consideração os seguintes pontos: a impressora estava projetada para ter arranjo cartesiano com cabeçote no plano XY e *benchmarking*. Optou-se então por desenvolver um sistema CoreXY devido as suas vantagens mencionadas na seção 2.8.2, seguindo os padrões e dimensões da impressora.

O chassi do sistema (figura 40) foi projetado para ser cortado em chapa de MDF com 15mm de espessura para: ser um sistema modular; possibilitar o alcance

das mãos para fácil montagem ou remoção do sistema e seus componentes agregados; exercer o maior número de funções em um componente possível e ser robusto.

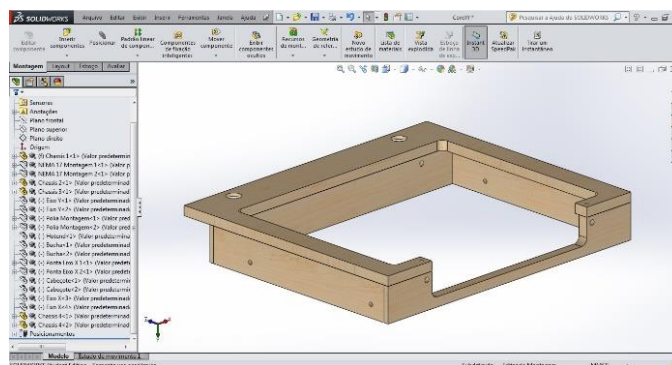


Figura 40 – Chassis preliminar do sistema CoreXY
Fonte: Do autor (2015).

Nem todos os componentes fabricados serão em MDF. Componentes mais delicados e complexos, que é o caso das peças montadas sobre os eixos X e Y, foram feitos em ABS com preenchimento de 10% para reduzir a massa inercial do sistema (figura 41). As peças que deslizarão nos eixos X ou Y de latão contarão com buchas auto lubrificantes embutidas em tubo de alumínio. A bucha substitui o tradicional rolamento linear, que é cerca de dez vezes mais caro e não apresenta desempenho que justifique seu preço para essa aplicação.

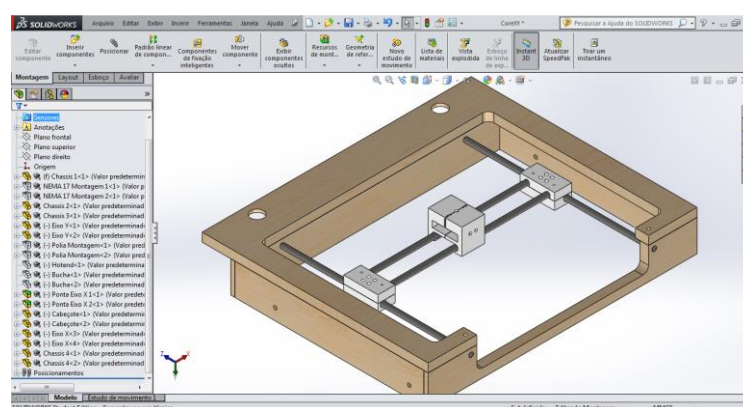


Figura 41 – Chassis, eixos e peças em ABS preliminares
Fonte: Do autor (2015).

Outros componentes como polias e espaçadores podem ser fabricados em ABS, mas esses também podem ser adquiridos em lojas especializadas em transmissão por correia ou varejistas. Por ora, limitou-se a fabricar apenas esses

componentes, portanto o restante das peças que serão incorporadas ao sistema seriam produtos de prateleira. Com isso, o sistema XY pode ser visto previamente na Figura 42.

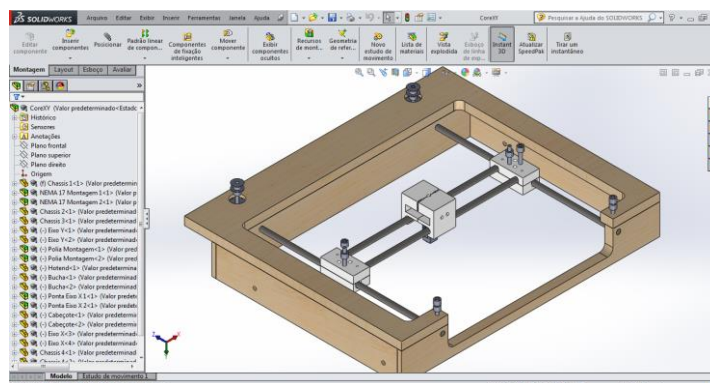


Figura 42 – Sistema CoreXY preliminar
Fonte: Do autor (2015).

4.4. FABRICAÇÃO

O projeto é composto por diversos componentes, sendo que alguns deles desempenham funções estruturais e outros são responsáveis pela movimentação. Apesar de ter em mãos alguns componentes de fixação e componentes elétricos, houve a necessidade de se criar algumas peças. As peças puderam ser fabricadas dentro das dependências da UTFPR, mais especificamente na modelaria do DADIN e no GIP3D. A seguir, será descrito como a fabricação ocorreu.

4.4.1. Peças Plásticas

As peças plásticas foram fabricadas com equipamentos, ferramentas e auxílio de pessoas do GIP3D. A impressora utilizada foi uma impressora Prusa i3, adaptada para ter algum controle atmosférico com o uso de um tampão que também evita possíveis choques mecânicos entre o ambiente externo e peças móveis (figura 43).



Figura 43 – Prusa i3 do GIP3D
Fonte: Do autor (2015).

O processo de impressão seguiu basicamente os passos descritos na seção 2.5 desta monografia, ou seja:

- Modelagem e conversão do arquivo para STL – aqui foi utilizado o próprio SolidWorks 2015, que permite editar peças e salvá-las em arquivos STL;
- Transferência do arquivo para o computador e ajuste dos parâmetros de impressão – o arquivo STL passou por um programa para gerar o código G da peça que seria interpretado pela máquina. O programa utilizado para essa tarefa foi o Repetier, que contém o Slic3r. O Slic3r, derivado da palavra *slicer* (fatiador, em inglês) é o programa responsável por dividir o sólido em várias camadas, gerando também a linguagem que conduzirá o cabeçote da impressora a fabricar a peça. Os parâmetros de impressão se encontram no Apêndice A do trabalho;
- Preparação e ajuste dos parâmetros da máquina – nessa etapa, com o código G pronto, utilizou-se o programa Pronterface, a interface entre a impressora e o usuário. O programa leu o código das peças e envia as informações para a impressora. Foi nessa etapa também que se fez a calibração da impressora;
- Execução do processo – houve inspeções periódicas para intervir no processo caso ocorresse algum erro durante o processo de impressão. As impressões das peças foram feitas utilizando filamento de ABS com 2,8mm de diâmetro;
- Remoção da peça;

- Pós-processamento e acabamento – após as peças ficarem prontas, elas passaram por um processo manual de rebarbação ou abertura de rosca M5x0,8 com macho M5 (figura 44).



Figura 44 – Abertura de rosca M5x0,8
Fonte: Do autor (2015)

A Figura 45 mostra resumidamente o processo, partindo da captura de imagem da modelagem no SolidWorks (esquerda), seguindo para a captura de imagem do caminho do cabeçote traçado pelo Slic3r (meio) e finalmente a fotografia produto acabado (direita).

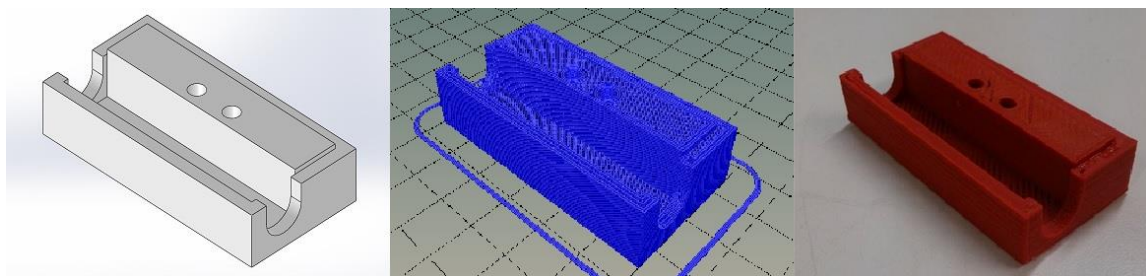


Figura 45 – Etapas do processo de fabricação das peças plásticas
Fonte: Do autor (2015).

Os produtos deste processo são as peças ilustradas na Figura 46.

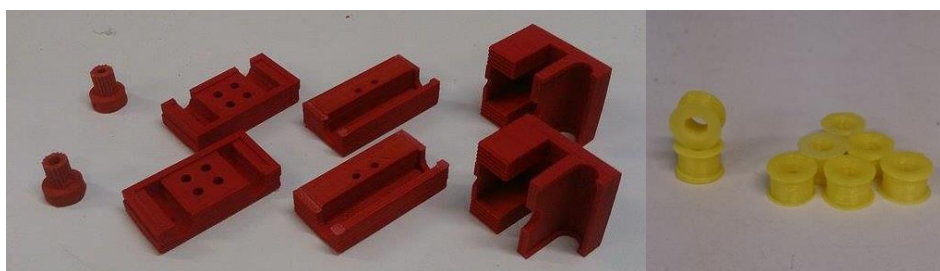


Figura 46 – Peças feitas em ABS prontas
Fonte: Do autor (2015).

4.4.2. Peças em Madeira

O chassi do sistema CoreXY foi fabricado a partir de uma chapa de MDF de 15mm de espessura de 1350mm por 700mm. Seu processo de fabricação requereu assistência de funcionários da modelaria, uma vez que a chapa de MDF precisava ser cortada em uma máquina CNC restrita somente aos funcionários por ela ter grandes dimensões.

Primeiramente, as peças que fazem parte da estrutura foram modeladas no SolidWorks e convertidas para arquivos DXL. Estes arquivos foram então entregues nas mãos do programador da máquina CNC para programá-la em código G utilizando o programa ArtCam e, assim, dar início ao processo de usinagem (figura 47).



Figura 47 – Máquina CNC com a chapa em processo de fabricação
Fonte: Do autor (2015).

Em seguida, as peças foram removidas da máquina e passaram por um processo de lixamento para remover rebarbas e fazer chanfros, evitando problemas de montagem com outras partes. A Figura 48 mostra o estado de uma das peças após a usinagem e não acabada (esquerda) e após o lixamento (direita). Finalmente, a etapa de acabamento contou com a abertura de roscas M5x0,8.

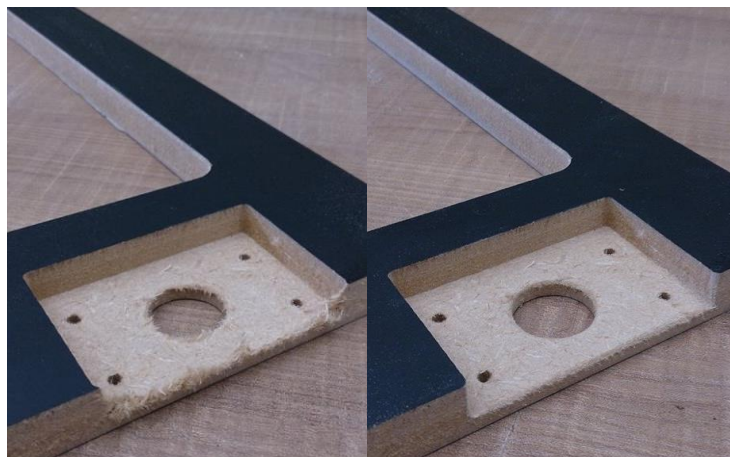


Figura 48 – Acabamento das peças estruturais
Fonte: Do autor (2015).

Os produtos dessas operações são cinco peças com a função de suportar todo o conjunto CoreXY modular (figura 49).

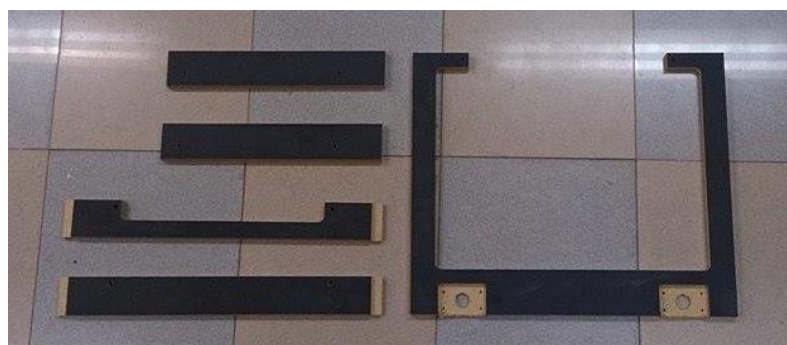


Figura 49 – Partes estruturais prontas para montagem
Fonte: Do autor (2015).

Além delas, outras duas peças menores foram feitas em MDF, porém com chapas mais finas, de 6 mm, que servem de acoplamento entre os motores de passo e a estrutura do sistema. O processo de fabricação é basicamente o mesmo do processo de fabricação das partes estruturais em MDF, porém utilizou-se uma máquina CNC de menores proporções. O produto é visto na Figura 50, que exhibe também a diferença entre o exemplar após o processo de usinagem (esquerda) e o produto acabado (direita).

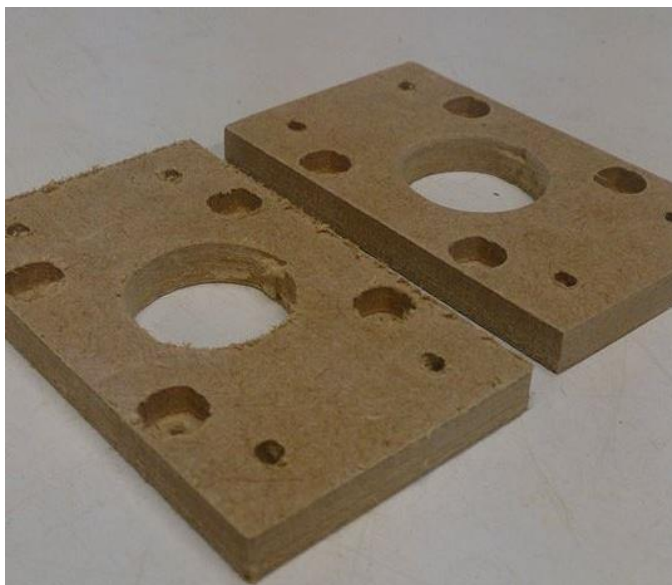


Figura 50 – Acoplamentos para os motores de passo
Fonte: Do autor (2015).

4.4.3. Peças em Alumínio

As peças em alumínio, que fazem parte apenas do conjunto deslizante do sistema XY, são tubos em alumínio de 1/2" de diâmetro externo com 10mm de diâmetro interno. Sua função é de integrar buchas deslizantes revestidas internamente com politetrafluoretilano (PTFE, comercialmente conhecido como Teflon) e se unificar às peças impressas para que todas deslizem sem dificuldades e sem folgas.

A matéria prima, tubo de 1/2" de diâmetro externo, 3/8" de diâmetro interno e 300mm de comprimento, foi fornecida pelo Programa de Tecnologia Assistiva (Prota), que promove a cidadania com a integração de deficientes visuais com a fabricação e entrega de bengalas.

O processo de fabricação dessas peças é relativamente simples em comparação com as outras peças fabricadas neste projeto. Consiste em seccionar o tubo nas dimensões corretas com uma serra circular. Em seguida, é preciso realizar uma furação de, no mínimo, 6mm de profundidade utilizando uma broca de 10mm. Tal furação foi realizada em um torno devido a geometria da matéria prima.

O processo gerou as peças apresentadas na Figura 51.



Figura 51 – Tubos do conjunto deslizante
Fonte: Do autor (2015).

5. RESULTADOS

Este capítulo foi destinado para documentar e discutir as etapas de montagem e teste do projeto do sistema CoreXY com base na metodologia adotada. Cabe, então, relatar os problemas encontrados após os processos de fabricação, as soluções adotadas para sanar os respectivos problemas, os resultados após a aplicação das soluções e o resultado final da montagem do sistema.

5.1. MONTAGEM

Uma das peças que se localiza na ponta do eixo X teve uma falha na porção mediana, onde um plano inteiro se deslocou e incapacitou a montagem das barras por onde o cabeçote se movimenta (figura 52). Uma possível perda de passo da correia que conduz o eixo X da impressora do GIP3D pode ter gerado o erro, ou seja, a polia “patinou” e a impressora perdeu seu referencial inicial. Para não descartar a peça, o material que prejudicava a montagem foi cortado, indicado em branco na Figura 52. O resultado deste retrabalho foi satisfatório ao se levar em conta a funcionalidade e desconsiderar a aparência final da peça.

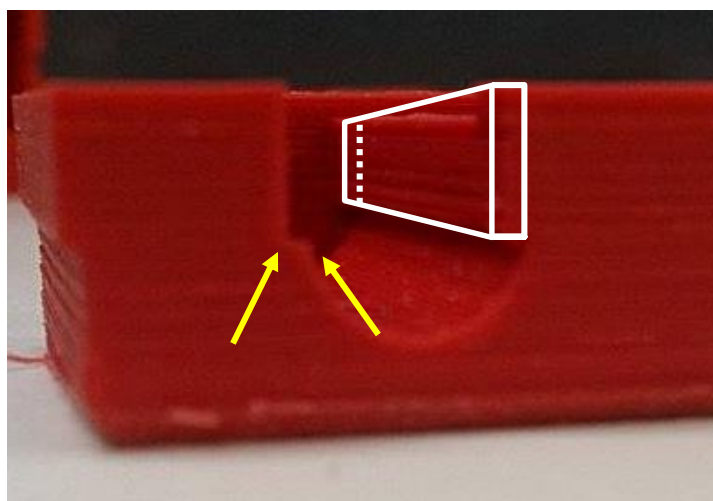


Figura 52 – Erro causado por perda de passo no eixo X da impressora
Fonte: Do autor (2015).

As polias dentadas impressas também apresentaram problemas, porém eles comprometeram o funcionamento do sistema. Elas foram as primeiras peças a ser

impressas e apresentaram acabamento indesejável. Ao ver o problema, foi feito um retrabalho para tentar recuperar o perfil dos dentes da polia dentada, mas não houve melhora considerável (figura 53), e os parâmetros de impressão foram alterados para que o problema de acabamento não reincidisse nas próximas impressões, baixando a temperatura do extrusor de 225°C para 210°C. Considerando que a temperatura de transição vítrea do ABS seja na proximidade de 105°C, leva-se mais tempo para resfriar tal polímero até a sua solidificação quando ele sai a 225°C. Por isso, em peças pequenas, as camadas não se solidificam satisfatoriamente antes da impressão da próxima camada, gerando distorções indesejáveis.



Figura 53 – Polia com os dentes retrabalhados (esquerda) ao lado da polia recém-fabricada (direita)

Fonte: Do autor (2015).

O acabamento superficial das polias deveria ser bom para que a polia pudesse transmitir os movimentos de rotação dos motores de passo para as peças móveis. Neste caso em particular, o problema que isso pode acarretar seria a perda de passo, causando defeitos similares ao da Figura 52. Então, a escolha mais sensata foi substituir as polias impressas por polias comercializadas.

Nas pontas do eixo X se encontram duas peças que se encaixam e fazem com que o eixo X inteiro deslize sobre o eixo Y (figura 54), sendo uma peça que fixa os eixos X (esquerda) e a outra que receberá as buchas para deslizar sobre o eixo Y (direita). Nelas ocorreram dois problemas ligados possivelmente aos parâmetros de impressão que ocasionaram distorções dimensionais, por exemplo a parede da peça

que foi projetada para ter 2,9mm de espessura, porém foi registrado 3,32mm com um paquímetro eletrônico (figura 55).

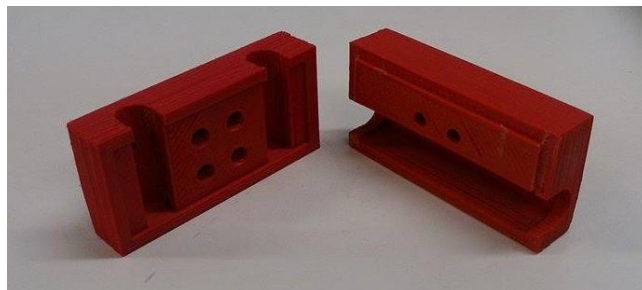


Figura 54 – Peças da ponta do eixo X
Fonte: Do autor (2015).



Figura 55 – Leitura da espessura da parede com distorções dimensionais
Fonte: Do autor (2015).

A primeira alternativa para solucionar os problemas foi refazer uma peça teste após reduzir a espessura da parede de 2,9mm para 2,8mm, mas a suposta solução não mostrou ser eficaz em nenhum dos casos.

No primeiro caso, no momento da primeira montagem desses dois componentes, houve interferência e as duas peças não encaixavam. Para sanar isso, uma das peças teve seu degrau limado nas extremidades (figura 56). Após essa operação, as peças se encaixaram (figura 57).



Figura 56– Detalhe da peça após remoção de material com lima

Fonte: Do autor (2015).

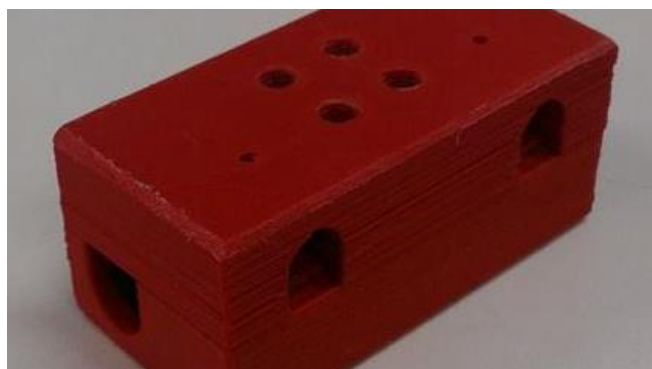


Figura 57 – Ponta de eixo montada

Fonte: Do autor (2015).

O segundo dos problemas foi detectado na montagem do conjunto de buchas nas peças em questão. A presença de material extra nas paredes da peça impressa impediu o encaixe do conjunto deslizante (figura 58), impossibilitando, novamente, a montagem da ponta de eixo.



Figura 58 – Interferência na montagem das buchas na ponta de eixo

Fonte: Do autor (2015).

O problema foi contornado com a remoção do material do tubo do conjunto de buchas, executado em um torno (figura 59) ou até mesmo com uma lima plana.

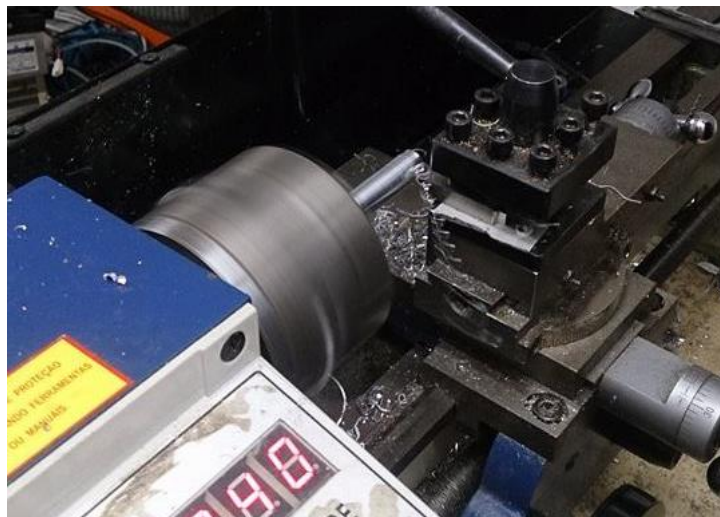


Figura 59 – Processo de torneamento para retrabalho da peça
Fonte: Do autor (2015).

Com isso, os resultados foram suficientemente bons para a montagem das peças plásticas. Além das duas ações corretivas apresentadas, a outra alternativa seria rastrear a causa raiz e solucionar o problema das distorções com testes na impressora variando seus parâmetros de impressão.

A estrutura do sistema de movimentação da impressora foi montada somente com as peças fabricadas em MDF unidas com cola adesiva a base de acetato de polivinila (PVA) para madeiras. Esta opção foi preferida pela praticidade e custo, substituindo parafusos e porcas para a fixação uma vez que não haverá solicitação mecânica exorbitante nos componentes.

A estrutura foi montada e colada sob prensa a frio, exigindo, pelo fabricante da cola, até 5 horas para a secagem. Como medida de segurança, o processo de secagem aplicado na estrutura sob prensa a frio levou em média 7 horas. Em seguida, o chassi do sistema foi posicionado na impressora para teste prático de montagem. O resultado também foi positivo, pois não houve interferência entre as estruturas (figura 60).



Figura 60 – Estrutura CoreXY montada na impressora
Fonte: Do autor (2015).

Os eixos para a movimentação em Y foram selecionados para entrar com interferência nos furos da parte frontal e posterior da estrutura em MDF. Em um primeiro momento, os eixos de 8mm não entraram, levantando a suspeita de que os furos não estivessem no seu tamanho ideal. De fato, a leitura do diâmetro dos furos para os eixos foi de 7,11mm (figura 61), ante os 8mm dos eixos.



Figura 61 – Variação dimensional do furo para o eixo Y
Fonte: Do autor (2015).

O retrabalho foi feito com uma furadeira de bancada equipada com broca de 8mm para os quatro furos e os eixos entraram (figura 62).



Figura 62 – Eixo Y montado após retrabalho nos furos
Fonte: Do autor (2015).

O conjunto deslizante foi projetado como sendo tubos em alumínio com diâmetro interno de 10mm para o alojamento de buchas, estas com diâmetro externo de 10mm, diâmetro interno de 8mm e comprimento de 6mm. Durante a usinagem dos tubos, foi utilizado uma broca usada com 10mm de diâmetro. Este processo acabou comprometendo os tubos de alumínio, porque os diâmetros internos ficaram maiores do que os 10mm planejados graças a batimento da ferramenta e criou-se assim folgas muito grosseiras. Com isso, haviam duas opções para reverter a situação: a primeira seria aplicar cola epóxi na superfície externa das buchas e posicioná-las no interior do tubo, com a cola preenchendo a folga, e a segunda opção seria fabricar outros tubos utilizando broca nova. A alternativa preferida foi aplicar cola epóxi a fim de moldar a montagem em função de possíveis deslocamentos que ocorreram no processo de furação para aumentar o diâmetro do furo dos eixos Y. (figura 61).

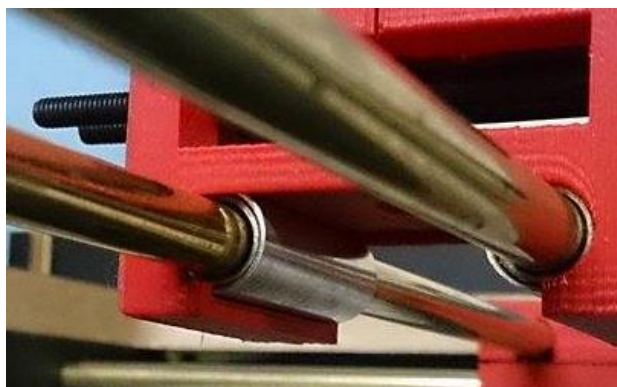


Figura 63 – Conjunto deslizante montado
Fonte: Do autor (2015).

A última etapa da montagem foi marcada pela instalação do conjunto de transmissão, ou seja, polias sincronizadoras, polias e correias dentadas. Optou-se por utilizar o conjunto de polias dentadas e correias GT2, amplamente utilizadas para construção de impressoras 3D similares a deste projeto. O conjunto possui passo de 2mm e largura de 6mm, combinando boa flexibilidade e versatilidade com baixo custo.

A montagem dos componentes de transmissão foi realizada rapidamente e com sucesso, apesar de ser um pouco complicada no início. Ela exige boas habilidades manuais, cautela para não danificar as polias impressas e ao mesmo tempo firmeza para posicionar os parafusos enquanto a correia é tracionada.

Após isso, tem-se o projeto construído e pronto para a realização de alguns testes de funcionamento (figura 64). A montagem do sistema completo pode ser acompanhada pelo Apêndice B.

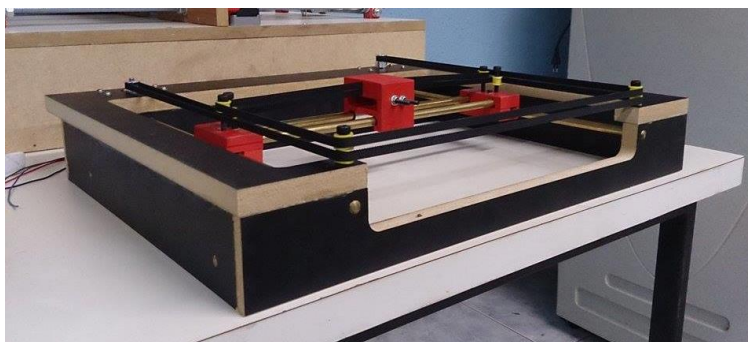


Figura 64 – Sistema CoreXY montado
Fonte: Do autor (2015).

De acordo com o que foi discutido, é possível perceber que a metodologia aplicada foi parcialmente boa. Apesar do sucesso da montagem do sistema de movimentação, a metodologia de fabricação não previa desvios de processos, forçando ações corretivas imediatas e assim atrasando o desenvolvimento do projeto devido ao despreparo.

5.2. TESTE

O teste funcional do sistema de movimentação consiste em fazer o mecanismo percorrer diversos trajetos conhecidos e avaliar seu comportamento através da comparação entre o que se queria e o que foi executado. O teste funcional

também pode revelar defeitos não vistos durante a montagem. Logo, o teste é uma fase indispensável do projeto.

Antes de dar início ao processo de avaliação, foi identificado que algumas das polias impressas não acompanhavam o movimento das correias, gerando atrito indesejável que poderiam causar desgaste prematuro no perfil dos dentes da correia. Uma alteração sugerida foi em trocar as polias. Antes, elas eram lisas e compatível para todas as condições, porém deixaram espaços para erros não previstos.

As novas polias foram desenhadas para atender individualmente cada situação. Com isso, foram desenvolvidas cinco novas variações de polias com funções dedicadas (figura 65). Feito isto, houve uma melhora considerável e o sistema seguiu para os testes.



Figura 65 – Novas polias ao lado das polias antigas
Fonte: Do autor (2015).

Primeiramente, o CoreXY precisou ser conectado a um computador. Isto foi feito com a utilização de: um Arduino Mega 2560, que é um microcontrolador programável pelo computador; uma RAMPS 1.4 (de *RepRap Arduino Mega Pololu Shield*), que é uma placa desenvolvida para conectar os componentes eletrônicos de impressoras RepRap ao Arduino Mega; uma fonte de alimentação de 12V; *firmware* Marlin 1.0.2, que é um *software* gratuito específico para Arduino que foi instalado no microcontrolador e controla a impressora; e o programa Pronterface como interface. Por ser um sistema modular independente, foi possível realizar os testes sem que ele estivesse montado na impressora (figura 66).

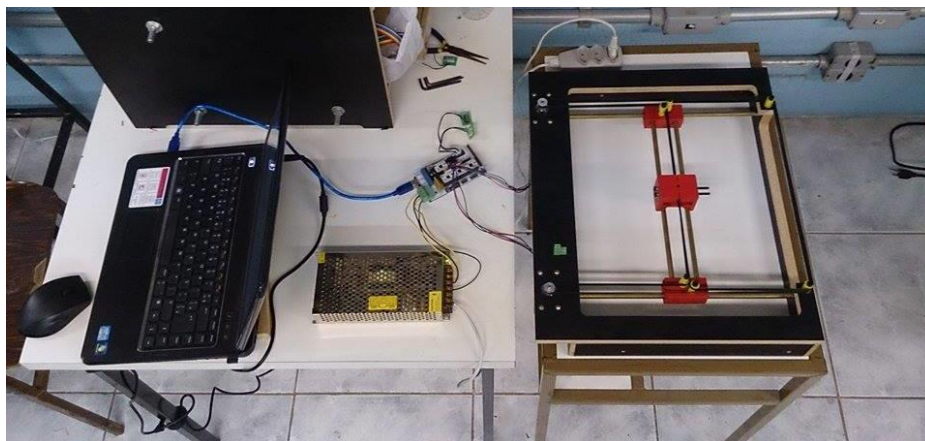


Figura 66 – Computador e sistema CoreXY conectados e prontos para os testes
Fonte: Do autor (2015).

A RAMPS é preparada conforme a Figura 67, sendo que apenas os componentes do CoreXY, que estão destacados em azul na figura, foram conectados à placa.

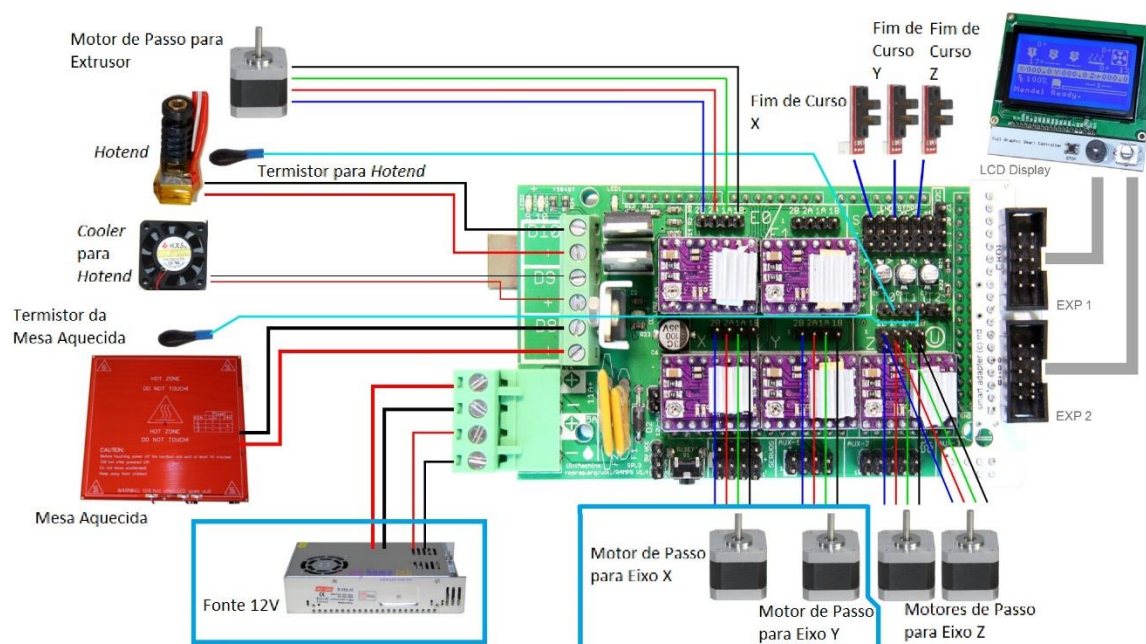


Figura 67 – Esquemático para montagem da RAMPS
Fonte: Adaptado de My Home Fab (2015).

Partindo do sistema montado, alguns percursos foram codificados em linguagem G com a finalidade de colher informações e concluir o projeto. Cada percurso foi reproduzido com uma caneta nanquim 0.5 sobre uma superfície lisa na parte superior e esponjosa na parte inferior para garantir contato.

O primeiro trajeto foi idealizado para verificar a capacidade da impressora para imprimir linhas horizontais, variando o comprimento das linhas e o avanço do

eixo X. Foram feitas dez linhas horizontais no total, cinco linhas traçadas com avanço de 1000mm/min e outras cinco linhas traçadas com avanço de 3000mm/min (figura 68).

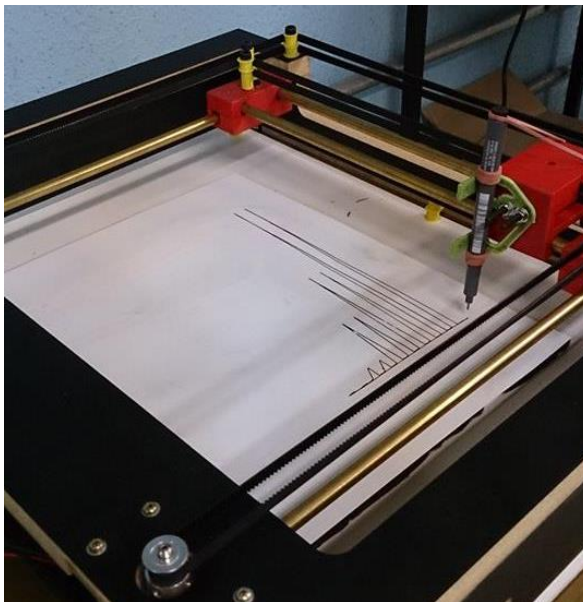


Figura 68 – Teste com linhas horizontais
Fonte: Do autor (2015).

Neste teste foram observados variação de comportamento do sistema com diferentes avanços e linearidade das retas horizontais. O teste mostrou que não houve grandes distorções devido a velocidade de avanço do cabeçote, porém as linhas apresentaram pequenas perturbações na trajetória. Foi constatado, através da Figura 69, que a linearidade das retas horizontais foi afetada pela superfície do teste, pois ela apresenta ondulações ao longo de toda sua extensão.

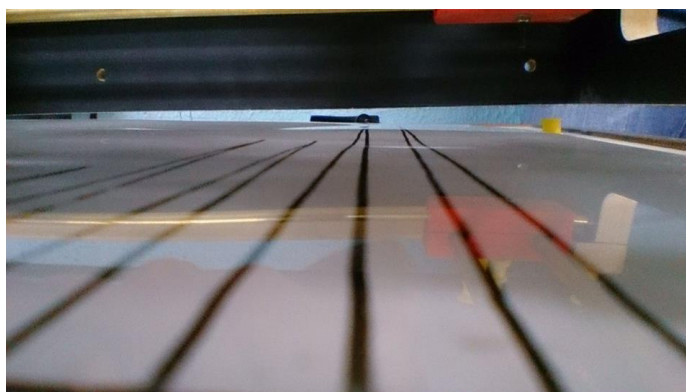


Figura 69 – Linearidade das retas horizontais
Fonte: Do autor (2015).

A superfície foi trocada por uma simples folha sulfite sobre a bancada de madeira, mas essa alternativa não proporcionou melhoras porque as bancadas também apresentavam ondulações e alguns traços ficaram apagados. Sendo assim, os testes seguiram com a primeira opção, deslocando a caneta em um milímetro acima de sua posição inicial para evitar as mesmas distorções.

Seguindo a mesma lógica do teste horizontal, o segundo traçado foi idealizado para verificar a capacidade da impressora para imprimir linhas verticais, variando o comprimento das linhas e o avanço do eixo Y. Foram feitos dez linhas verticais no total, sendo cinco linhas traçadas com avanço de 1000mm/min e outras cinco linhas traçadas com avanço de 3000mm/min (figura 70).

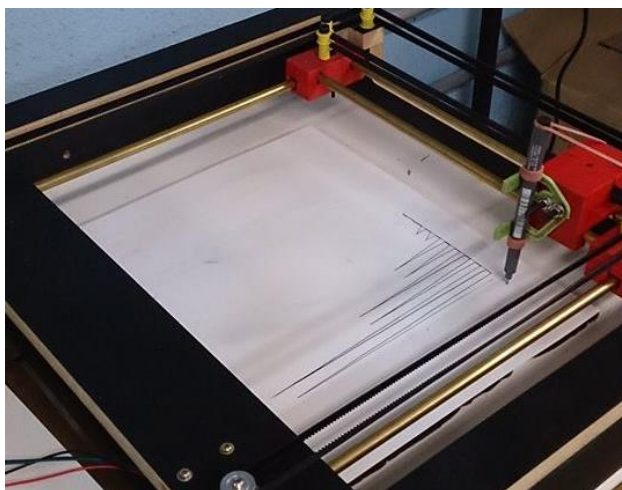


Figura 70 – Teste com linhas verticais
Fonte: Do autor (2015).

As linhas traçadas ficaram consideravelmente mais lineares, comprovando a influência das ondulações sobre a caneta (figura 71), mas parte da primeira linha não foi desenhada sobre a superfície. Apesar disso, os outros quatro pares de retas também comprovaram que o sistema não apresentou distorções com a mudança de avanço.

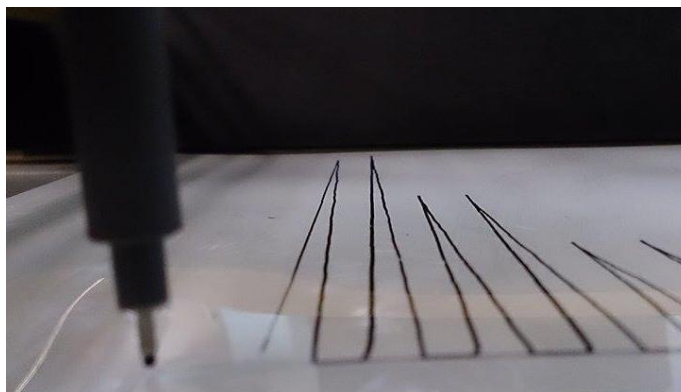


Figura 71 – Linearidade das retas verticais
Fonte: Do autor (2015).

O terceiro teste verificou a capacidade de apenas um dos motores operar e movimentar o sistema completo. De acordo com a seção 2.8.2, o acionamento de apenas um dos motores faria que o cabeçote desenhasse uma linha na diagonal. O percurso prevê mudanças drásticas de funcionamento, partindo do estado estacionário para a realização de movimento com avanço linear de 3000mm/min (figura 72).

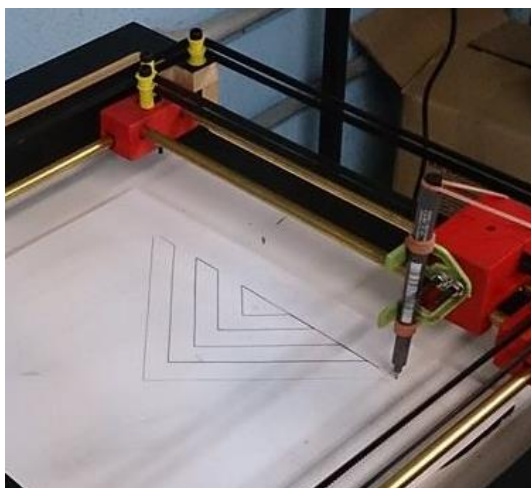


Figura 72 – Teste com linhas diagonais
Fonte: Do autor (2015).

Não foi constatado nenhuma anormalidade de operação durante a execução da trajetória para os dois motores. Quanto ao desenho, o sistema reproduziu bem os ângulos e retas (figura 73).

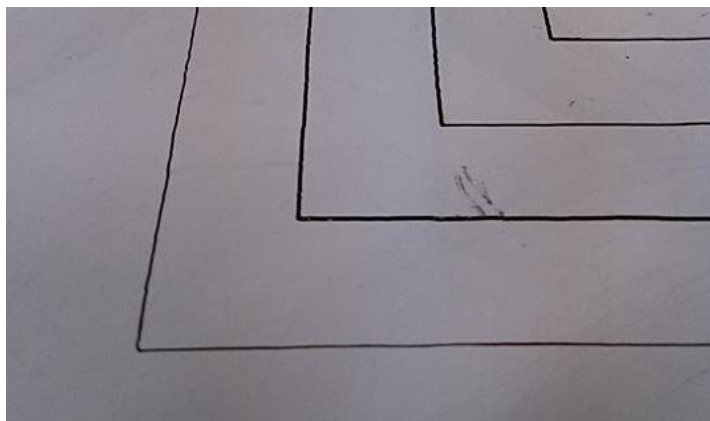


Figura 73 – Linearidade e perpendicularidade das linhas
Fonte: Do autor (2015).

O último teste realizado previa combinar os três testes anteriores para validar o comportamento do conjunto. O percurso é formado por várias circunferências concêntricas de raios variados com avanço de 3000mm/min (figura 74).

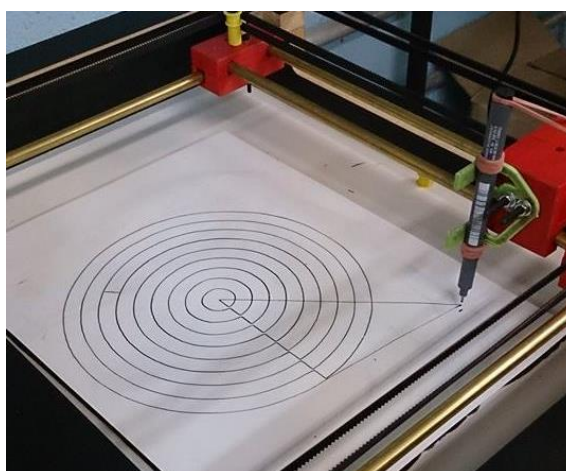


Figura 74 – Teste com circunferências concêntricas
Fonte: Do autor (2015).

As circunferências apresentaram desvio dimensional na ordem de milímetro, mas sem afetar sua circularidade. Além disso, a vistoria detalhada apontou para pequenos chanfros que impediram a caneta de completar os desenhos das circunferências (figura 75). Estes dois fenômenos podem ser reflexos de falta de rigidez do dispositivo de fixação da caneta, uma vez que afetou as dimensões em todas as direções.



Figura 75 – Circularidade das linhas
Fonte: Do autor (2015).

Com base nas informações extraídas, não se pode afirmar que os testes desqualificaram o sistema. O CoreXY operou sem sinal de esforço excessivo aparente durante todos os testes, como ruídos ou lentidão, e conseguiu reproduzir todos os códigos passados a ele. Os desvios observados nas figuras anteriores podem estar ligados unicamente a fatores externos, já que o ambiente e dispositivos utilizados não proporcionaram condições ótimas de operação.

Finalmente, o projeto foi pensado para ter o menor número de componentes possível com o objetivo de ser facilmente montado e manuseado. A lista dos materiais utilizados para a realização do projeto, bem como seus respectivos preços, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Lista de materiais utilizado para a realização do projeto

(continua)

Descrição	Qtde.	Preço/un.	Total Gasto	Total Doado	Observação
Parafuso M3 6mm Allen	8	R\$ 0,24	R\$ 1,92	---	---
Parafuso M3 15mm Philips	8	R\$ 0,07	R\$ 0,56	---	---
Parafuso M3 40mm Allen	2	R\$ 0,48	R\$ 0,96	---	---
Arruela M3	28	R\$ 0,06	R\$ 1,68	---	---
Porca M3	10	R\$ 0,05	R\$ 0,50	---	---
Parafuso M4 80mm Allen	2	R\$ 6,00	R\$ 12,00	---	---
Arruela M4	4	R\$ 0,06	R\$ 0,24	---	---
Porca M4	2	R\$ 0,06	R\$ 0,12	---	---
Parafuso M5 30mm Allen	2	R\$ 0,31	R\$ 0,62	---	---
Parafuso M5 35mm Allen	4	R\$ 0,30	R\$ 1,20	---	---
Eixo (Latão) Ø8mm x 330mm	2	R\$ 20,00	---	R\$ 13,20	GIP3D Preço/m
Eixo (Latão) Ø8mm x 345mm	2	R\$ 20,00	---	R\$ 13,80	GIP3D Preço/m
Tubo (Alumínio) Øint 3/8" x Øext 1/2" x 36mm	2	R\$ 2,50	---	R\$ 0,18	PROTA Preço/m
Tubo (Alumínio) Øint 3/8" x Øext 1/2" x 54mm	2	R\$ 2,50	---	R\$ 0,27	PROTA Preço/m

Tabela 1 – Lista de materiais utilizado para a realização do projeto

(conclusão)

Descrição		Qtde.	Preço/un.	Total Gasto	Total Doado	Observação
Bucha	Øint 8mm x Øext 10mm x 6mm	8	R\$ 1,40	R\$ 11,20	---	---
Motor de Passo	Nema 17 1.7A	2	US\$ 7,70	---	R\$ 53,90	GIP3D (US\$ 1=R\$ 3,50)
Polia Dentada	GT2 20 dentes	2	R\$ 15,00	R\$ 30,00	---	---
Correia Dentada	GT2 1,38m 6mm	2	US\$ 9,99	---	R\$ 9,65	GIP3D Preço/10m (US\$ 1=R\$ 3,50)
Conector	4 vias	2	R\$ 0,12	R\$ 0,24	---	---
Partes MDF 6mm	Suporte para Nema 17	2	---	---	---	DADIN
Partes MDF 15mm	Chassi	5	---	---	---	DADIN
Partes ABS	Peças Impressas	14	R\$ 130,00	---	R\$ 15,31	GIP3D Preço/kg
Cola	PVA para Madeira 100g	0	R\$ 5,00	R\$ 5,00	---	---
Cola	Epóxi	0	R\$ 19,00	R\$ 19,00	---	---
Subtotal		115		R\$ 85,24	R\$ 106,31	---
TOTAL		115		R\$	191,55	

Fonte: Do autor (2015).

6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do sistema de movimentação cartesiano foi concluído e os objetivos impostos coincidiram com os resultados obtidos. O sistema CoreXY é produto de um projeto novo desenvolvido inteiramente nas dependências da UTFPR e está ele está operável. A quantidade de peças que compõem o produto, a adoção de parafusos e porcas para unir as peças e a concepção de subconjuntos modulares tornaram a montagem e manuseio fáceis.

Um dos principais contratempos encontrados foi registrado nas montagens que envolvem peças impressas devido a distorções dimensionais das peças, resultando em retrabalhos que quebraram o fluxo de processo e da metodologia empregada. Baseado neste problema, uma sugestão para futuros trabalhos seria avaliar a influência de um ou mais parâmetros de impressão em ABS sobre uma geometria padronizada.

Outra recomendação de trabalho é o reprojeto do sistema. O reprojeto é também conhecido como melhoria contínua, que é uma etapa do projeto focada em observar o produto finalizado, identificar defeitos e implementar as soluções para torna-lo melhor. Sendo assim, sua primeira revisão deverá encontrar alguma oportunidade para ser otimizada.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

3D MATERIAL TECHNOLOGIES. **3D Printing: Stereolithography (SLA)**. Disponível em: < <http://www.3dmaterialtech.com/3dprintsla.html>> Acesso em 5 ago. 2015.

3D Printer List. **Ultimaker XL (XY-Z)**. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/3dprinterlist/xyz-printers/xy-head-z-bed/ultimaker/ultimaker-xl>> Acesso em 12 jun. 2015.

3D PRINTING. **Carbon3D Reaches Incredible 3D Printing Speeds with CLIP!**. Disponível em: <<http://3dprinting.com/news/carbon3d-reaches-incredible-3d-printing-speeds-with-clip/>> Acesso em 13 jun. 2015

3D PRINTING INDUSTRY. **Consumer 3D Printing in Serious Growth Phase According to Photizo Group**. Disponível em: < <http://3dprintingindustry.com/2014/08/14/consumer-3d-printing-serious-growth-phase-according-photizo-group/>> Acesso em: 28 jan. 2015.

3DERS. **Inside Koenigsegg Looks at 3D Printing Parts for World's Fastest Car**. Disponível em: <<http://www.3Ders.org/articles/20140418-inside-koenigsegg-looks-at-3d-printing-parts-for-world-fastest-car.html>> Acesso em: 25 jan. 2015.

3DERS. **Rotary 3D Printers Under Development**. Disponível em: <<http://www.3ders.org/articles/20131227-rotary-3d-printers-under-development.html>> Acesso em: 12 jun. 2015.

3DERS. **Quentin Harley Released SCARA Based “RepRap Morgan” 3D Printer and Its Design**. Disponível em: < <http://www.3ders.org/articles/20130514-quentin-harley-released-scara-based-reprap-morgan-3d-printer-and-its-design.html>> Acesso em: 12 jun. 2015.

3DPRINT. **GE Considers 3D Printing Turbine Blades for Next Generation Boeing 777X’s GE9X Engines**. Disponível em: <<http://3Dprint.com/11266/3D-printed-lpt-ge9x-777x/>> Acesso em: 25 jan. 2015.

3DSYSTEMS. **3D Printer Buyer’s Guide: For Professional and Production Applications**. Disponível em: <http://www.3Dsystems.com/files/2014_white_paper_3D_printer_buyers_guide_web.pdf> Acesso em: 25 jan. 2015.

BUILD A 3D PRINTER. **Why a Delta?** Disponível em: < http://builda3dprinter.eu/where_to_begin/why-a-delta/> Acesso em: 10 jun. 2015.

BUSINESS WIRE. **Carbon3D Introduces CLIP, Breakthrough Technology for Layerless 3D Printing, 2015**. Disponível em <<http://www.businesswire.com/news/home/20150316006482/en/Carbon3D-Introduces-CLIP-Breakthrough-Technology-Layerless-3D#.VXxPuUZSGao>> Acesso em: 13 jun. 2015.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.

CANALYS. **3D printing market to grow to US\$16.2 billion in 2018**. Disponível em: <<http://www.canalys.com/newsroom/3D-printing-market-grow-us162-billion-2018>> Acesso em: 11 dez. 2014.

CARBON3D. Disponível em: <<http://carbon3d.com/>> Acesso em: 12 jun. 2015.

CHUA, Chee K.; LEOUNG, Kah F.; LIM, Chu S. **Rapid Prototyping: Principles and Applications**. 3ª Edição. Singapura: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2010.

EVENTORBOT. Disponível em: <<http://www.eventorbot.com/images.html>> Acesso em: 12 jun. 2015

EXTREME TECH. Disponível em: <http://www.extremetech.com/wp-content/uploads/2012/10/prusa_i3.jpg> Acesso em: 12 jun. 2015.

FCIÊNCIAS. **Nova geração de impressoras 3D por interface líquida**. Disponível em: < <http://www.fcencias.com/2015/03/17/nova-geracao-de-impressoras-3d-por-interface-liquida/>> Acesso em: 3 ago. 2015.

FORBES. **Roundup of 3D printing market forecasts and estimates, 2014**. Disponível em: <<http://www.forbes.com/sites/louiscolumbus/2014/08/09/roundup-of-3D-printing-market-forecasts-and-estimates-2014/>> Acesso em: 11 dez. 2014.

GIBSON, Ian; ROSEN, David W.; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing**. Nova Iorque: Springer, 2010.

JAYAKUMAR, Amrita. **Why the Aerospace Industry is Investing in 3-D Printing**. Disponível em: <http://www.washingtonpost.com/business/capitalbusiness/why-the-aerospace-industry-is-investing-in-3-d-printing/2014/06/12/b7cfbf96-e02f-11e3-8dcc-d6b7fed081a_story.html> Acesso em: 25 jan. 2015.

MAKERBOT. **Makerbot Replicator Desktop 3D Printer**. Disponível em: <<http://store.makerbot.com/replicator>> Acesso em 12 jun. 2015.

MAKERBOT THINGIVERSE. **5 Degree Of Freedom Arm**. Disponível em: <<http://www.thingiverse.com/thing:33511>> Acesso em: 12 jun. 2015.

MY HOME FAB. **Description for Arduino 2560 with RAMPS 1.4**. Disponível em: <<http://www.my-home-fab.de/Documentations/Technical-descriptions/Description-for-Arduino-2560-with-RAMPS-14/en>> Acesso em 27 ago. 2015

NASR, Emad Abouel; KAMRANI, Ali K. **Computer-Based Design and Manufacturing: An Information-based Approach**. Nova Iorque: Editora Springer, 2007.

PINTO, Alan K. **Gestão estratégica e avaliação empresarial**. Rio de Janeiro: Qualitymark: PETROBRÁS, 2005.

PRINTRBOT. Disponível em: <<http://printrbot.com/shop/assembled-simple-metal/>> Acesso em: 12 jun. 2015.

REPRAP. Disponível em: <<http://reprap.org/> > Acesso em: 11 dez. 2014.

REPRAP. **The incomplete reprop beginner's guide**. Disponível em: <http://reprap.org/wiki/The_incomplete_reprop_beginner's_guide> Acesso em: 11 dez. 2014.

SEEMECNC. **Orion Delta Desktop 3D Printer**. Disponível em: <<http://seemecnc.com/products/orion-delta-3d-printer>> Acesso em: 12 jun. 2015.

SCULPTEO. **Material considerations: Choose right plastic production method – Part 2**. Disponível em: <<http://www.sculpteo.com/blog/2014/05/14/material-considerations-choose-right-plastic-production-method-part-2/>> Acesso em: 24 jun. 2015.

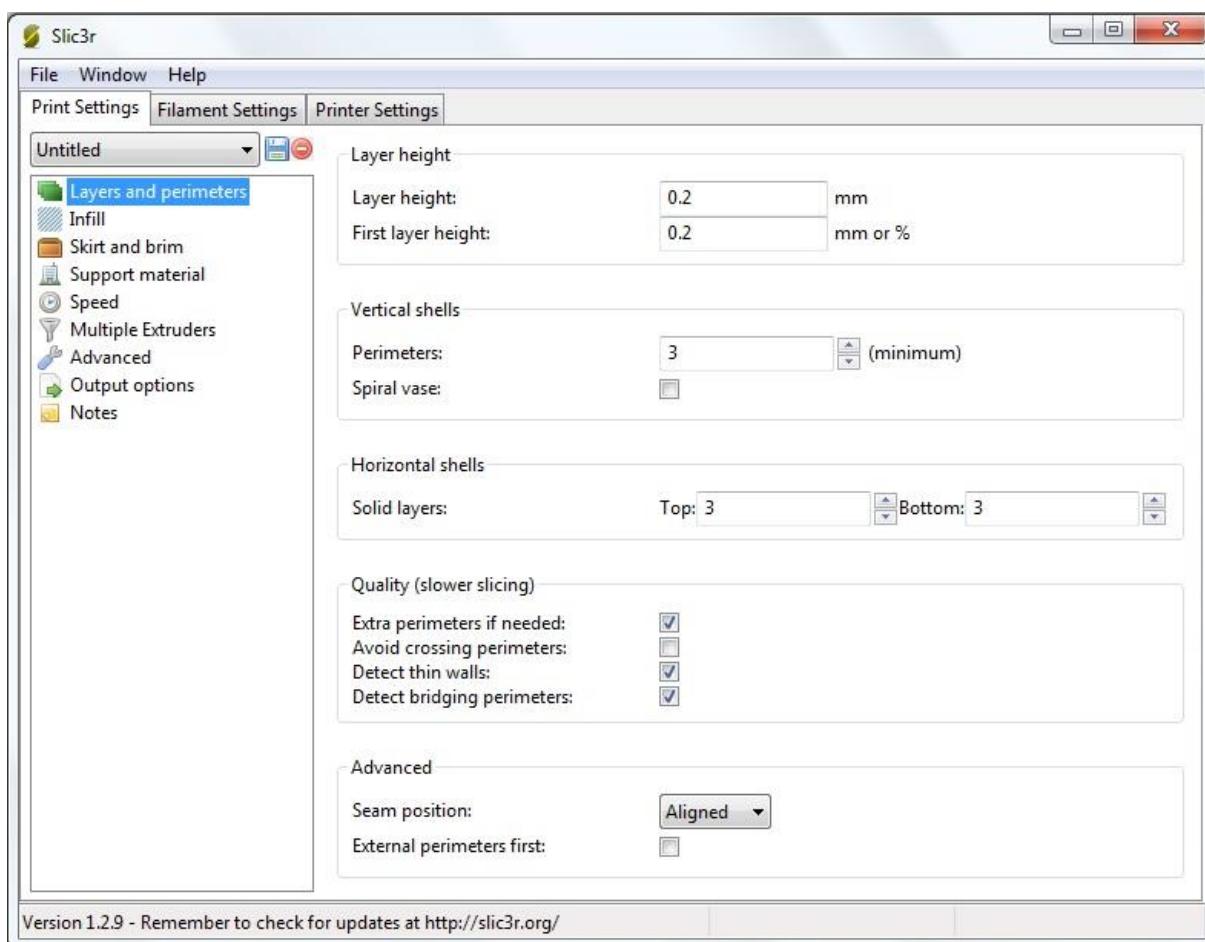
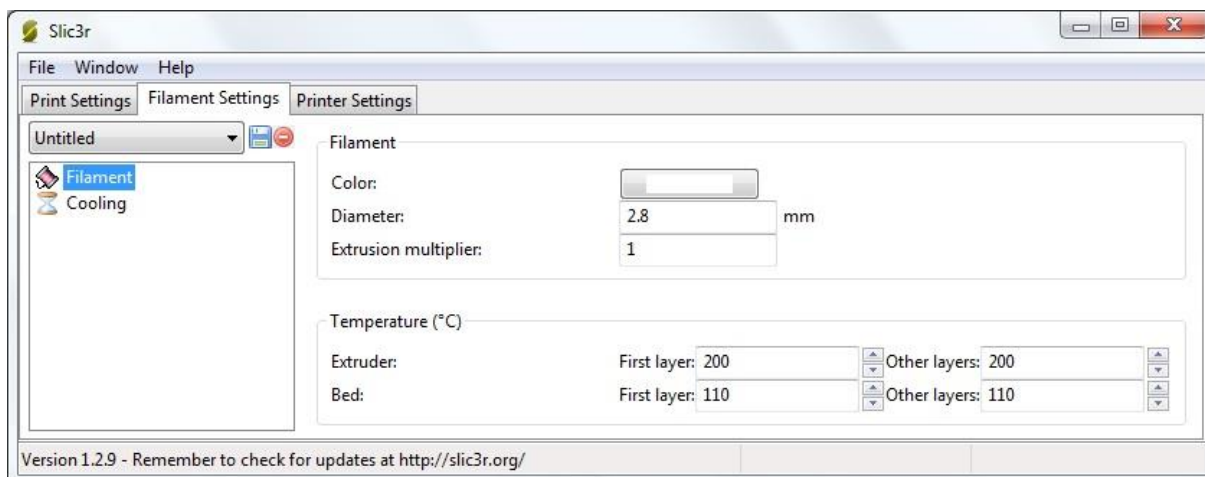
TO BUY A 3D Printer < <http://tobuya3dprinter.com/prusa-mendel-iteration-2-review/>> 25/05/2015

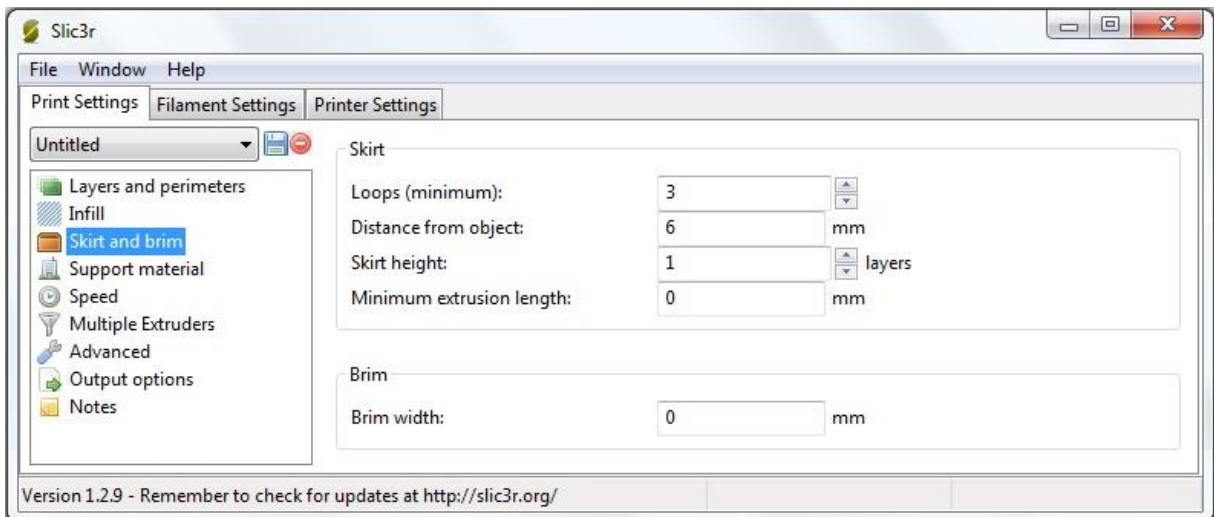
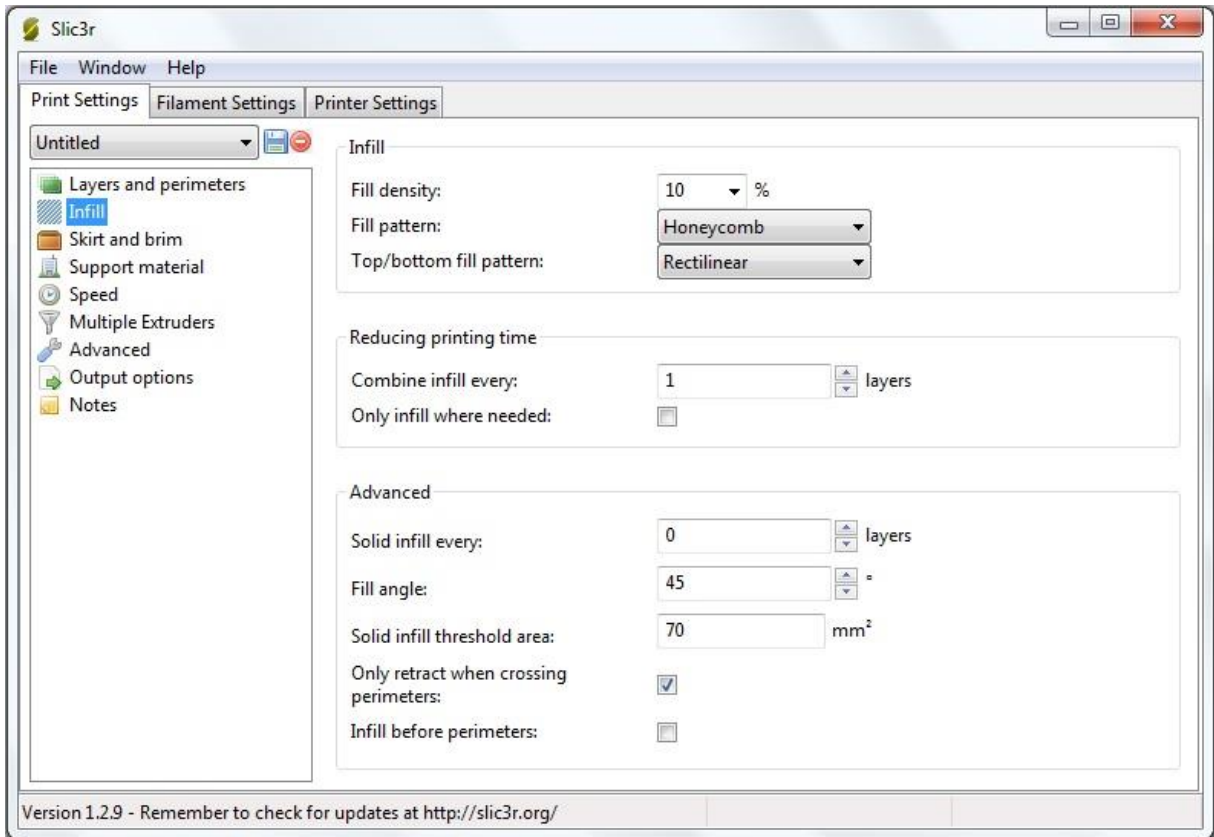
ULTIMAKER. **Ultimaker 2: Makes easy even easier**. Disponível em: <<https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-2-family/ultimaker-2>> Acesso em: 12 jun. 2015.

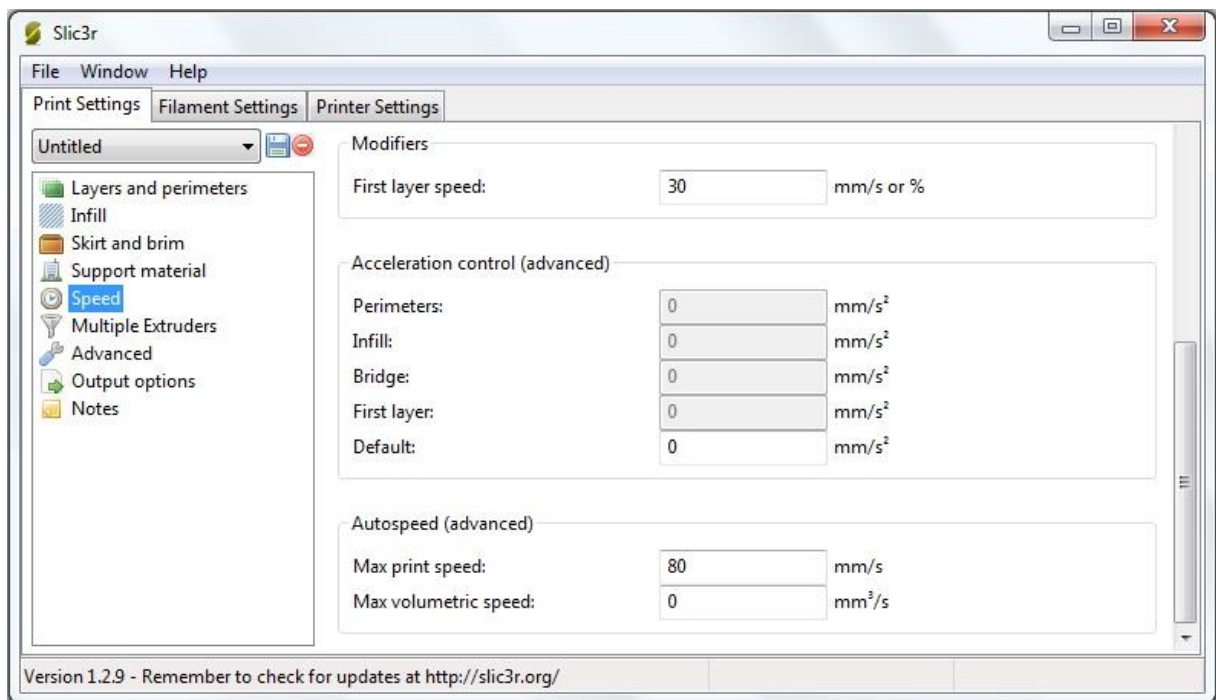
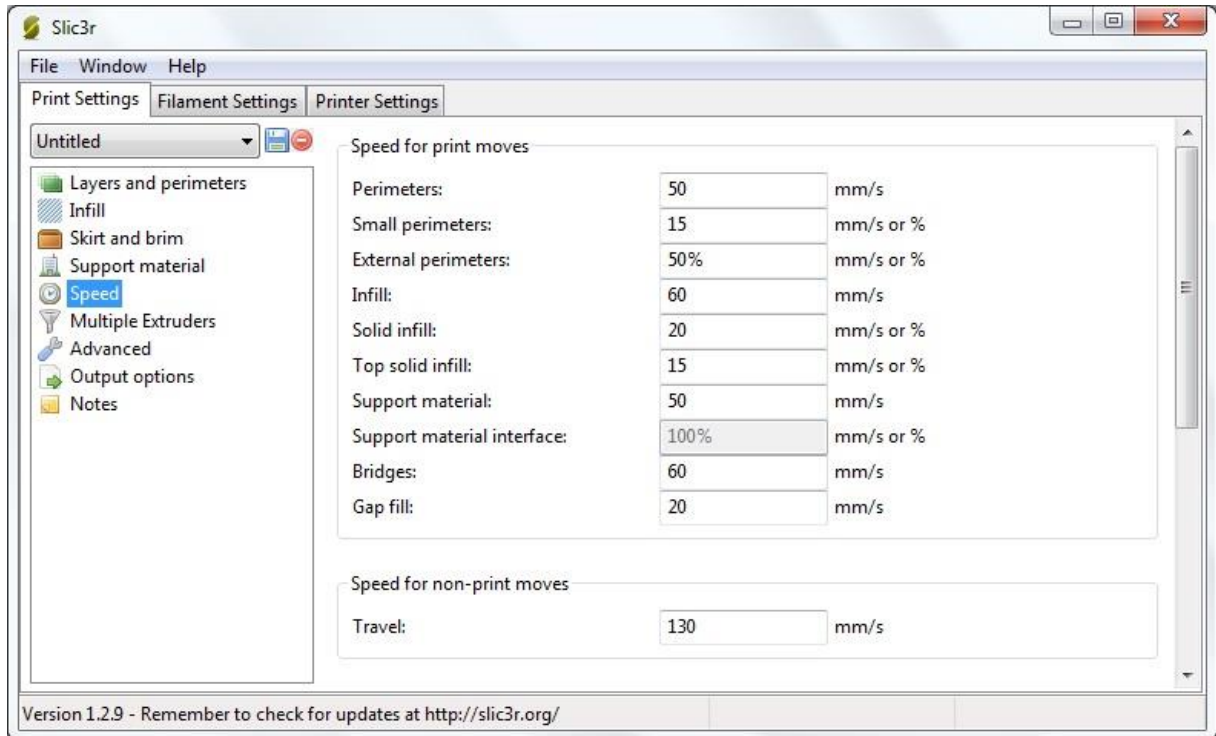
VOLPATO, Neri *et al.* **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. 1ª edição. São Paulo: Editora Blücher, 2007.

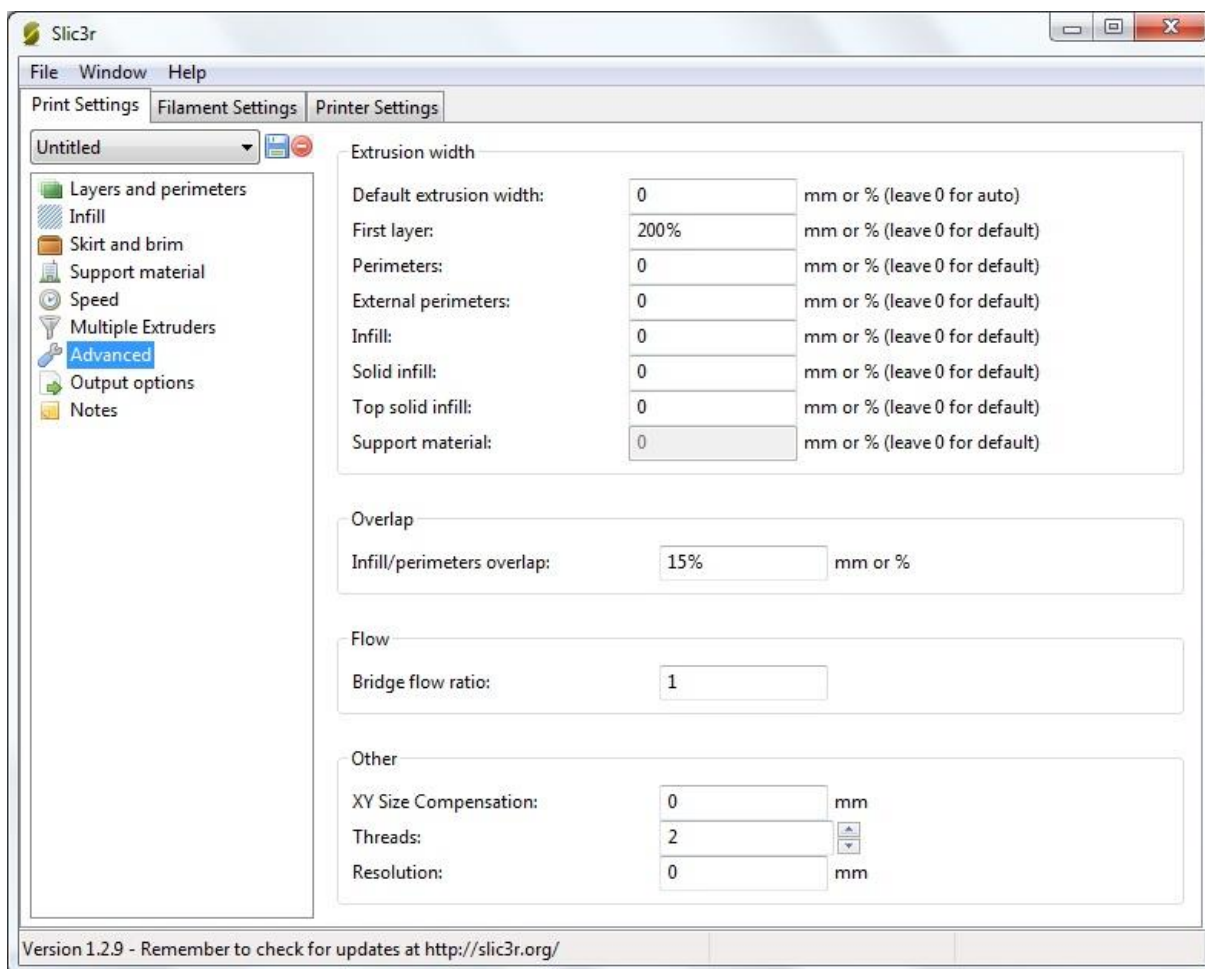
APÊNDICE

APÊNDICE A – Parâmetros de impressão utilizados



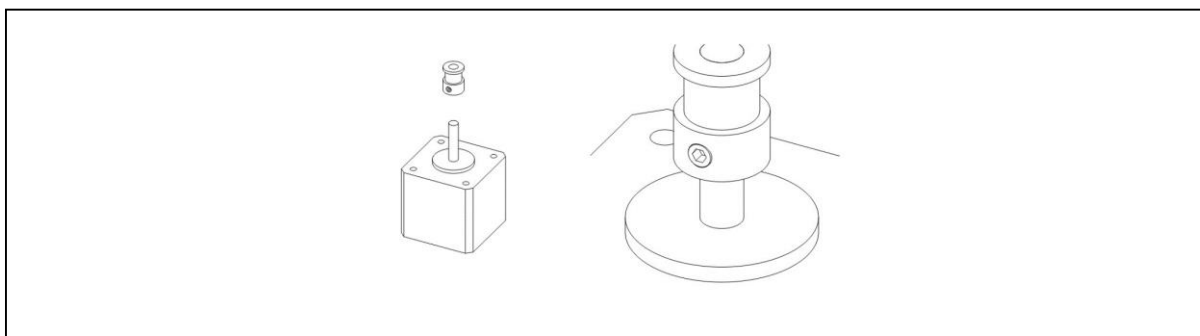




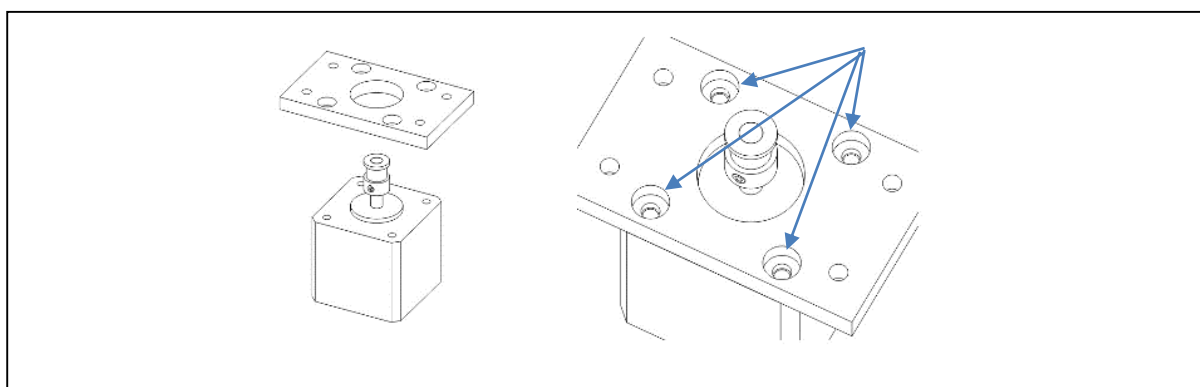


APÊNDICE B – Manual de Instruções para Montagem

MANUAL DE INSTRUÇÕES – IMPRESSORA 3D			
Descrição	Montagem do Motor		
Revisão	Rev 0	Folha	1 de 11
Atenção: Observar atentamente o posicionamento e orientação dos componentes ilustrados nas figuras. Algumas montagens podem ser permanentes e a montagem incorreta comprometerá o funcionamento da impressora.			
Peças (Quantidade)		Ferramentas	
Motor de Passo NEMA 17 (2) Polia GT2 20 dentes (2) Flange (2) Parafuso M3x6 Allen (8) Arruela M3 (8)		Chave Allen M3	



1. Posicionar a polia dentada GT2 no eixo do motor de passo;
2. Deixar a base polia a 2mm de distância do motor de passo;
3. Apertar o parafuso firmemente;



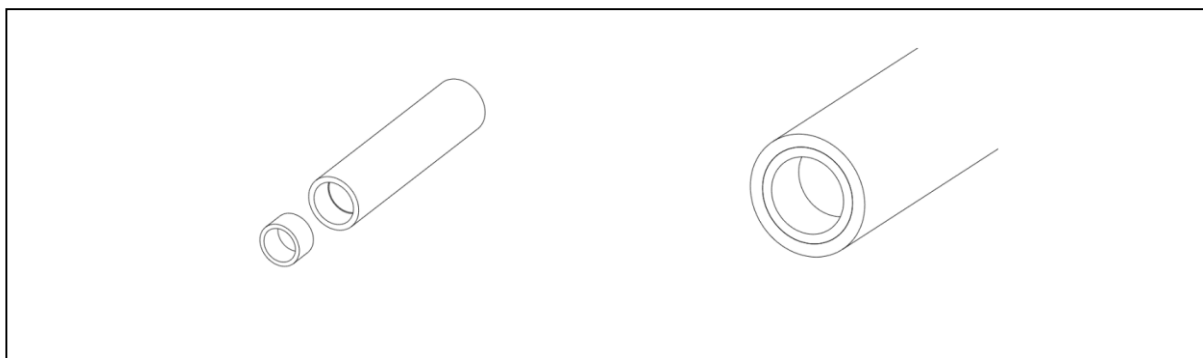
4. Posicionar a flange em cima do motor, alinhando os furos do motor com os furos da flange;
5. Distribuir 4 arruelas M3 nos rebaiços da flange, indicados pelas setas **AZUIS**;
6. Unir as peças com parafusos M3x6 Allen nos furos que possuem rebaiços;
7. Repetir o processo para o outro motor, deixando a base da polia a 11mm de distância do segundo motor de passo.

MANUAL DE INSTRUÇÕES – IMPRESSORA 3D

Descrição	Montagem do Conjunto Deslizante		
Revisão	Rev 0	Folha	2 de 11

Atenção: Observar atentamente o posicionamento e orientação dos componentes ilustrados nas figuras. Algumas montagens podem ser permanentes e a montagem incorreta comprometerá o funcionamento da impressora.

Peças (Quantidade)	Ferramentas
Tubo de Alumínio 36mm (2) Tubo de Alumínio 54mm (2) Bucha \varnothing_{int} 8mm x 6mm (8)	Cola Epóxi



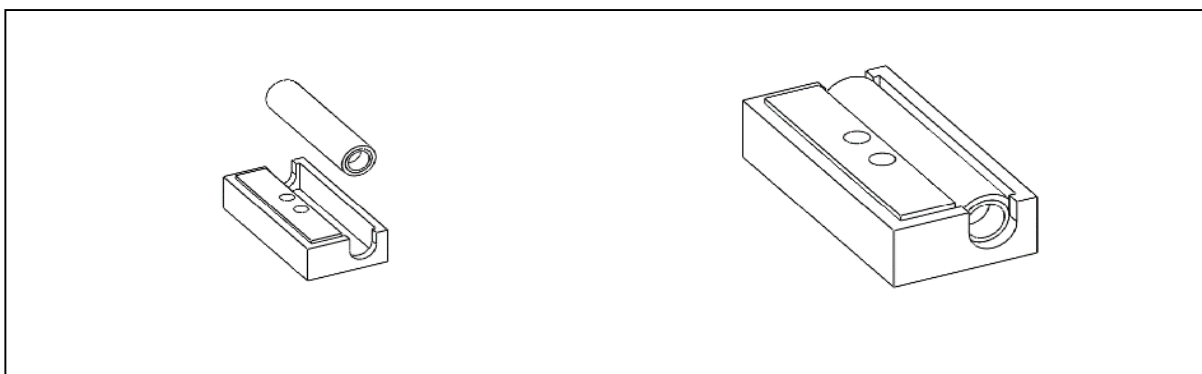
1. Inserir a bucha completamente no interior do tubo;
2. Repetir o passo 1 para o outro lado do tubo;
3. Repetir o processo para os outros tubos.

MANUAL DE INSTRUÇÕES – IMPRESSORA 3D

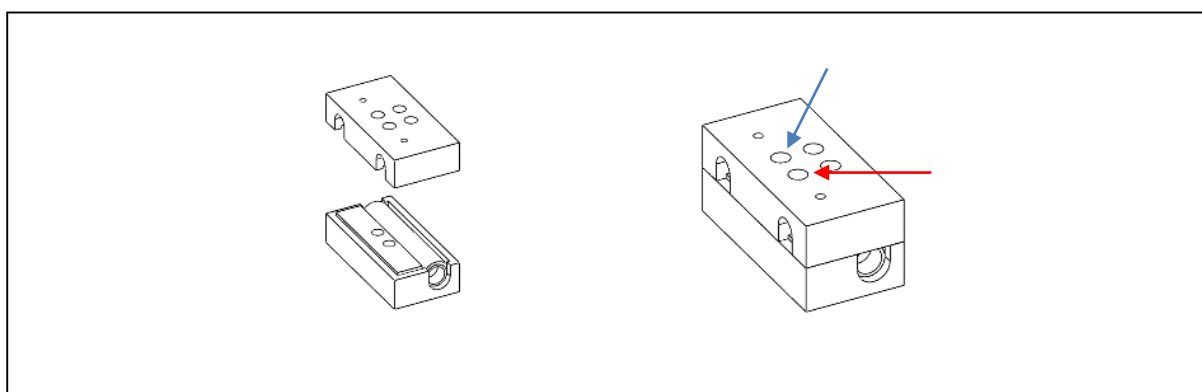
Descrição	Montagem da Ponta de Eixo X		
Revisão	Rev 0	Folha	3 de 11

Atenção: Observar atentamente o posicionamento e orientação dos componentes ilustrados nas figuras. Algumas montagens podem ser permanentes e a montagem incorreta comprometerá o funcionamento da impressora.

Peças (Quantidade)	Ferramentas
Ponta de Eixo A (2) Ponta de Eixo B (2) Parafuso M3x40 Allen (2) Arruela M3 (4) Porca M3 (2) Conjunto Deslizante de 54mm (2)	Chave Allen M3 Chave de Boca Porca M3



1. Inserir o Conjunto Deslizante na Ponta de Eixo A;



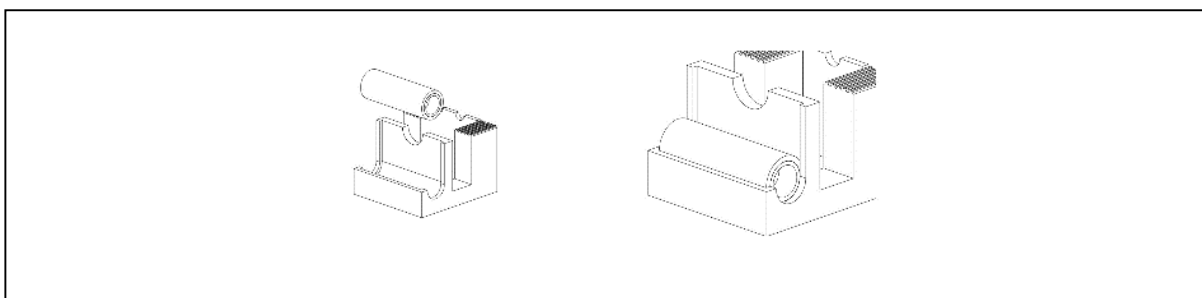
2. Posicionar a Ponta de Eixo B em cima da Ponta de Eixo A conforme a figura;
3. Unir as peças com o parafuso M3x40, acompanhado de um par de arruelas e porca M3, na posição indicada pela seta **AZUL**;
4. Repetir o processo para a outra Ponta de Eixo, unindo as partes através do furo indicado pela seta **VERMELHA**.

MANUAL DE INSTRUÇÕES – IMPRESSORA 3D

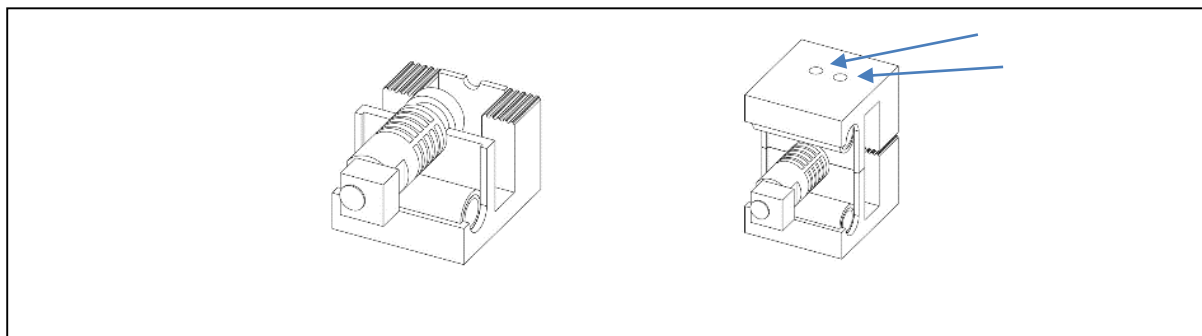
Descrição	Montagem do Cabeçote		
Revisão	Rev 0	Folha	4 de 11

Atenção: Observar atentamente o posicionamento e orientação dos componentes ilustrados nas figuras. Algumas montagens podem ser permanentes e a montagem incorreta comprometerá o funcionamento da impressora.

Peças (Quantidade)	Ferramentas
Suporte do Extrusor (2) Extrusor (1) Parafuso M4x80 Allen (2) Arruela M4 (4) Porca M4 (2) Conjunto Deslizante de 36mm (2)	Chave Allen M4 Chave de boca Porca M4



1. Inserir Conjunto Deslizante no Suporte do Extrusor;



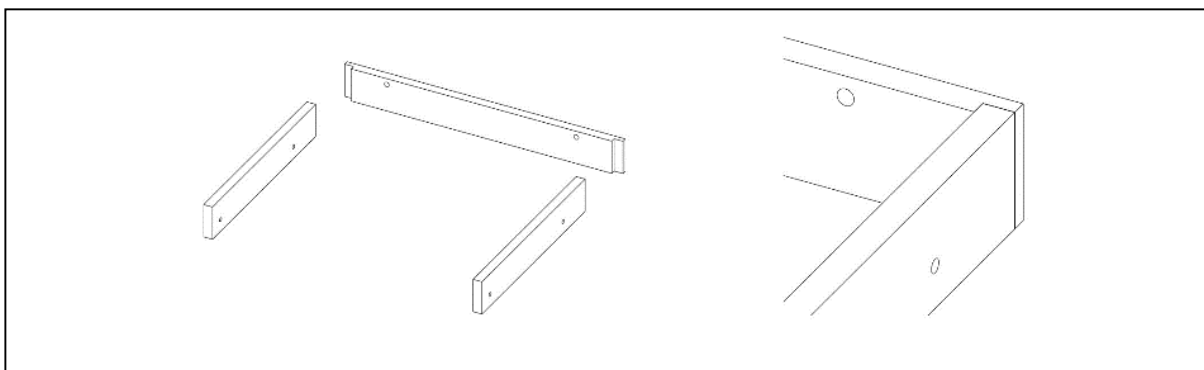
2. Inserir Extrusor no Suporte do Extrusor;
3. Repetir passo 1 para montar o outro Suporte do Extrusor;
4. Unir os dois suportes com os parafusos M4x80 Allen, arruelas M4 e porcas M4 na posição indicada pelas setas **AZUIS**, deixando o extrusor fixado no meio.

MANUAL DE INSTRUÇÕES – IMPRESSORA 3D

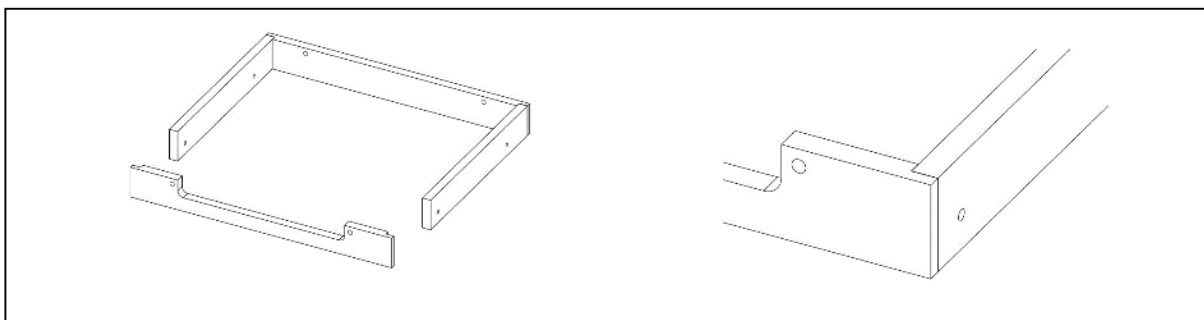
Descrição	Montagem da Estrutura		
Revisão	Rev 0	Folha	5 de 11

Atenção: Observar atentamente o posicionamento e orientação dos componentes ilustrados nas figuras. Algumas montagens podem ser permanentes e a montagem incorreta comprometerá o funcionamento da impressora.

Peças (Quantidade)	Ferramentas
Chassi 1 (1) Chassi 2 (1) Chassi 3 (1) Chassi 4 (2)	Cola PVA para Madeira



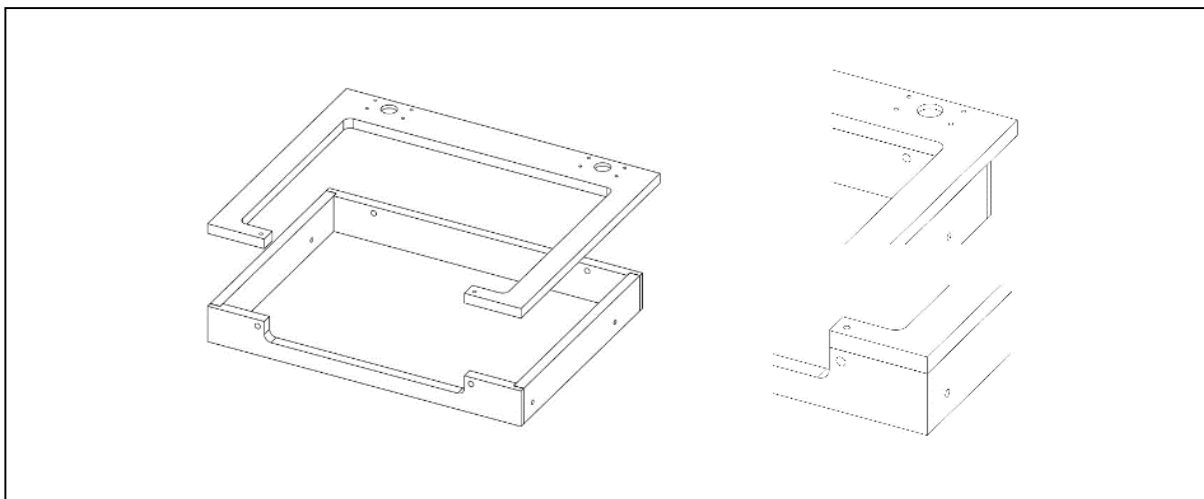
3. Com auxílio de esquadro, colar a ponta do Chassi 4 no rebaixo do chassi 3, deixando os furos do Chassi 4 na porção inferior e os furos do Chassi 3 na porção superior (olhar atentamente a posição dos furos na figura acima);
4. Repetir passo 1 para colar o outro Chassi 4 no Chassi 3;



1. Colar as pontas dos Chassi 4 nos rebaixos do chassi 2, deixando os furos do Chassi 2 na porção superior (olhar atentamente a posição dos furos na figura acima);
2. Aplique pressão no conjunto para unir as partes até secagem completa da cola;

MANUAL DE INSTRUÇÕES – IMPRESSORA 3D

Descrição	Montagem da Estrutura		
Revisão	Rev 0	Folha	6 de 11



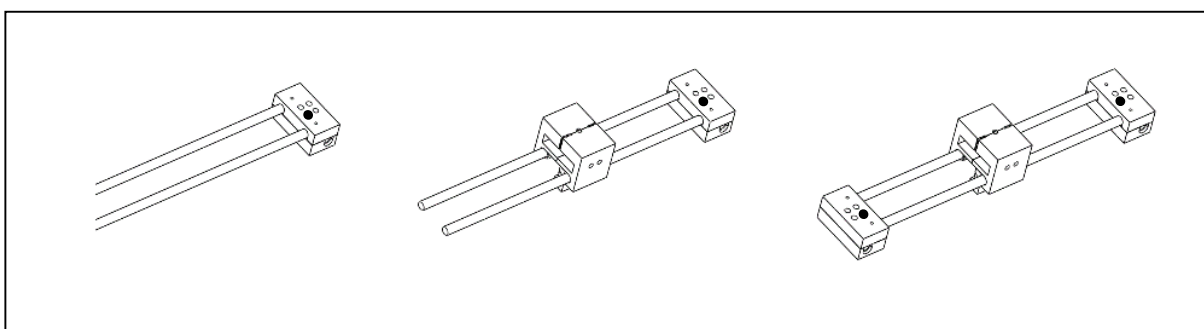
5. Colar o Chassi 1 com o rebaixo dos motores voltados para baixo sobre o conjunto montado, deixando a abertura frontal do Chassi 1 coincidente com a parte frontal do conjunto (olhar atentamente a figura);
6. Pressionar as peças e aguardar secagem da cola.

MANUAL DE INSTRUÇÕES – IMPRESSORA 3D

Descrição	Montagem do Eixo X		
Revisão	Rev 0	Folha	7 de 11

Atenção: Observar atentamente o posicionamento e orientação dos componentes ilustrados nas figuras. Algumas montagens podem ser permanentes e a montagem incorreta comprometerá o funcionamento da impressora.

Peças (Quantidade)	Ferramentas
Montagem do Cabeçote (1) Montagem da Ponta de Eixo X (2) Eixo Ø8mm x 330mm (2)	



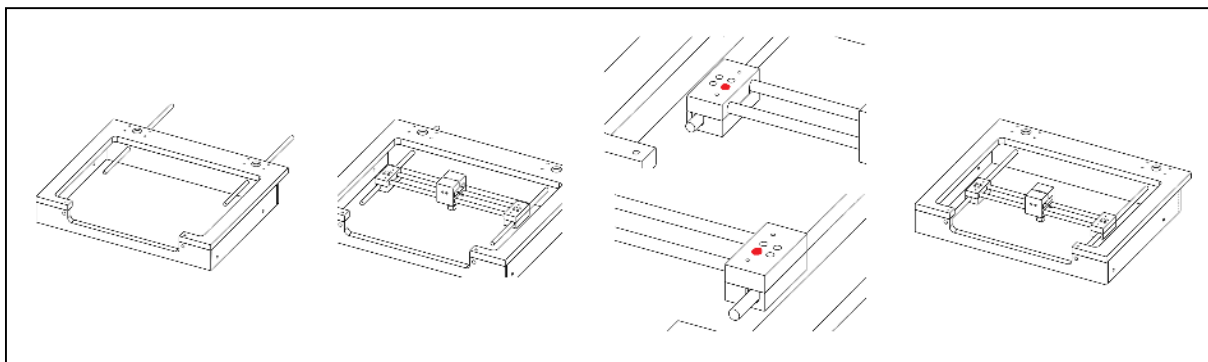
1. Posicionar os dois Eixos nos furos laterais da primeira Montagem da Ponta de Eixo X e empurrá-los para dentro até encostar na parede do fundo;
2. Posicionar a Montagem do Cabeçote nos eixos, deixando o Extrusor voltado para baixo;
3. Posicionar a outra Montagem da Ponta de Eixo X nas pontas livres do Eixo (não precisará encostar na parede do fundo).

MANUAL DE INSTRUÇÕES – IMPRESSORA 3D

Descrição	Montagem do Eixo Y / Estrutura Completa		
Revisão	Rev 0	Folha	8 de 11

Atenção: Observar atentamente o posicionamento e orientação dos componentes ilustrados nas figuras. Algumas montagens podem ser permanentes e a montagem incorreta comprometerá o funcionamento da impressora.

Peças (Quantidade)	Ferramentas
Montagem do Eixo X (1) Montagem da Estrutura (1) Eixo Ø8mm x 345mm (2)	



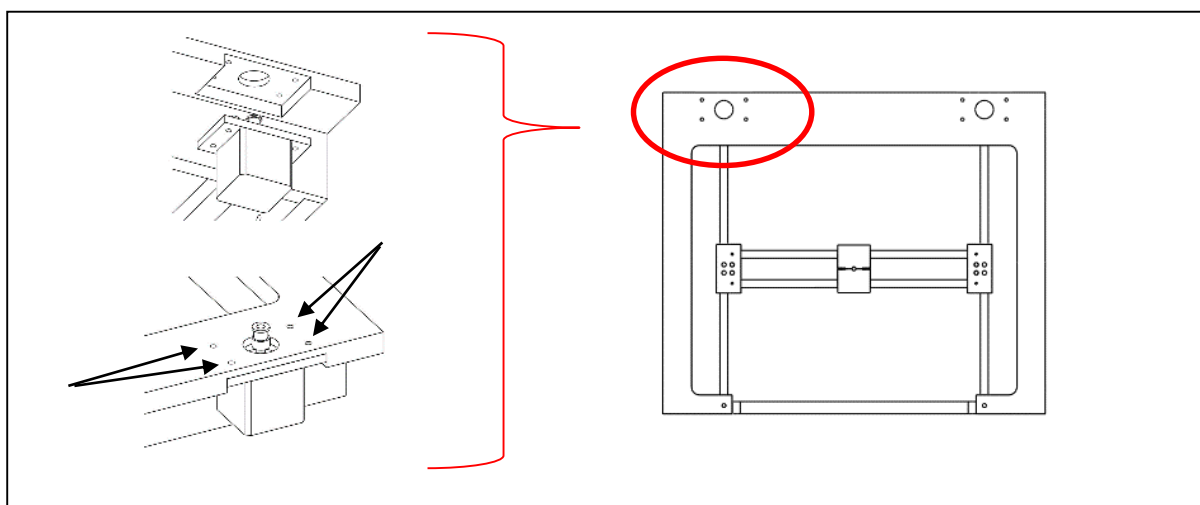
1. Posicionar os dois Eixos nos furos posteriores da Montagem da Estrutura;
2. Posicionar a Montagem do Eixo X nos Eixos, deixando os parafusos (em **vermelho**) voltados para frente;
3. Posicionar os dois Eixos nos furos frontais da Montagem da Estrutura.

MANUAL DE INSTRUÇÕES – IMPRESSORA 3D

Descrição	Montagem das Polias e Correias / Sistema Completo		
Revisão	Rev 0	Folha	9 de 11

Atenção: Observar atentamente o posicionamento e orientação dos componentes ilustrados nas figuras. Algumas montagens podem ser permanentes e a montagem incorreta comprometerá o funcionamento da impressora.

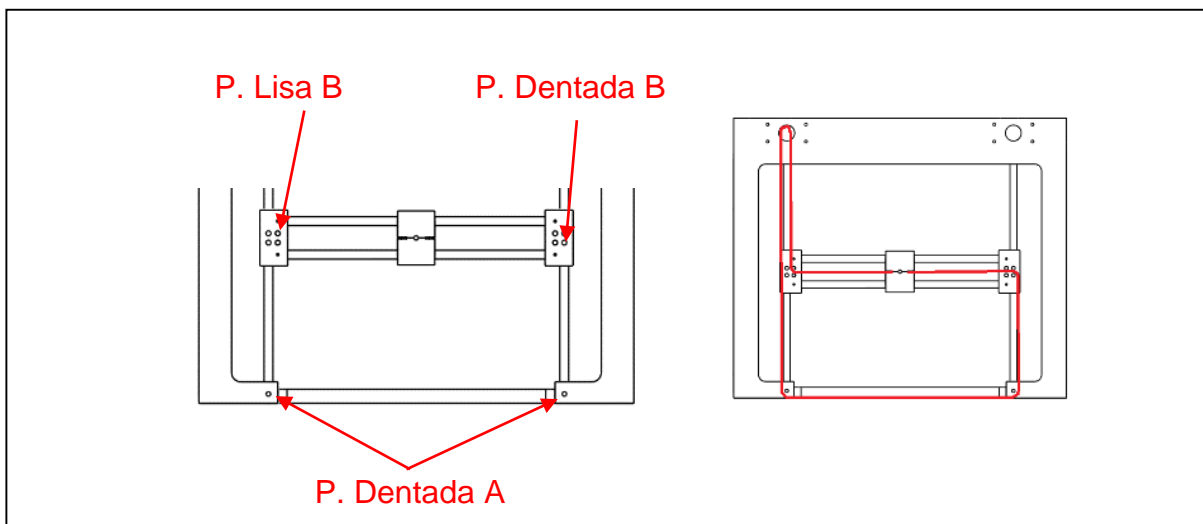
Peças (Quantidade)	Ferramentas
Estrutura Completa (1) Polia Dentada 15 dentes A (4) Polia Dentada 15 dentes B (1) Polia Dentada 15 dentes C (1) Polia Lisa B (1) Polia Lisa C (1) Correia GT2 1,38m (2) Parafuso M5x30 Allen (2) Parafuso M5x35 Allen (4) Montagem do Motor (2) Parafuso M3x15 Phillips (8) Porca M3 (8) Arruela M3 (16)	Chave Allen M5 Chave Allen M3 Chave de Boca Porca M3



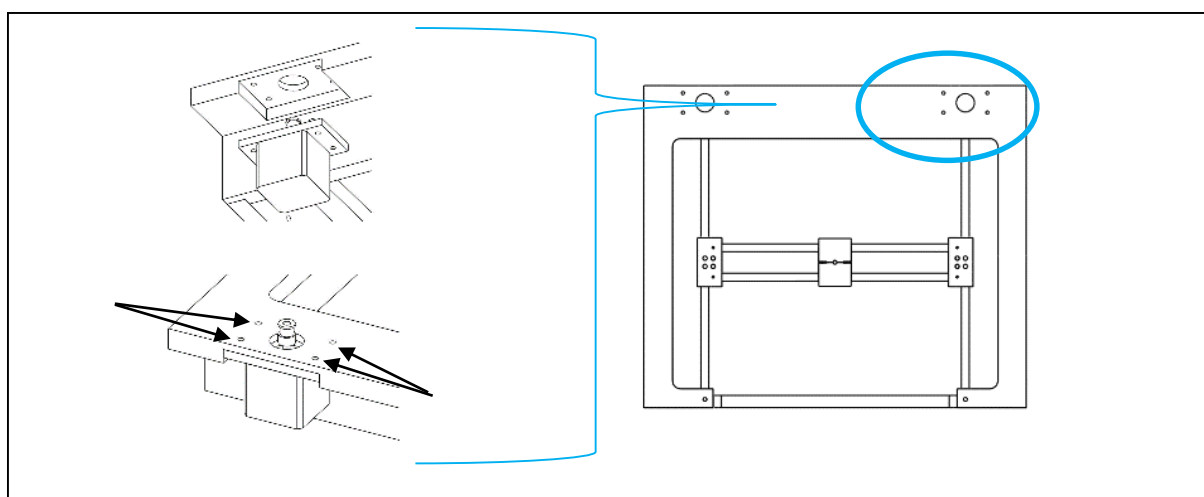
1. Encaixar a Montagem do Motor que tem a polia mais BAIXA na posição indicada em **VERMELHO** da Estrutura Completa;
2. Unir as partes com 4 Parafusos M3x15, 4 Porcas M3 e 8 Arruelas M3 na posição indicada pelas setas PRETAS;

MANUAL DE INSTRUÇÕES – IMPRESSORA 3D

Descrição	Montagem das Polias e Correias / Sistema Completo		
Revisão	Rev 0	Folha	10 de 11



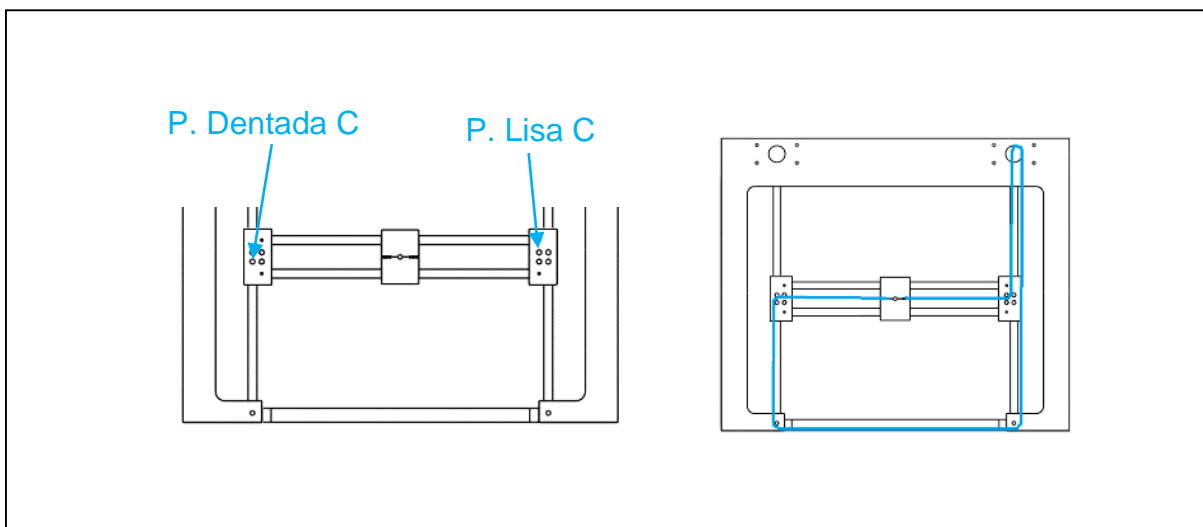
3. Montar as Polias do tipo B nos furos indicados com parafuso M5x35 Allen, deixando uma pequena folga para não travar as polias;
4. Montar 2 Polias Dentadas A em cada um dos furos indicados com Parafuso M5x30 Allen, deixando uma pequena folga para não travar as polias;
5. Fixar uma das pontas da Correia GT2 no Cabeçote com os dentes voltados para frente, usando o maior número de dentes possíveis para fixação e posicionando o mais baixo possível;
6. Fazer o caminho em **VERMELHO** utilizando as polias mais baixas com a Correia GT2;
7. Fixar a outra extremidade da Correia no Cabeçote;



8. Encaixar a Montagem do Motor que tem a polia mais ALTA na posição indicada em **AZUL** da Estrutura Completa;
9. Unir as partes com 4 Parafusos M3x15, 4 Porcas M3 e 8 Arruelas M3 na posição indicada pelas setas **PRETAS**;

MANUAL DE INSTRUÇÕES – IMPRESSORA 3D

Descrição	Montagem das Polias e Correias / Sistema Completo		
Revisão	Rev 0	Folha	11 de 11



10. Montar as Polias do tipo C nos furos indicados com parafuso M5x35 Allen, deixando uma pequena folga para não travar as polias;
11. Fixar uma das pontas da Correia GT2 no Cabeçote com os dentes voltados para frente, usando o maior número de dentes possíveis para fixação e posicionando o mais alto possível;
12. Fazer o caminho em **AZUL** utilizando as polias mais altas com a Correia GT2;
13. Fixar a outra extremidade da Correia no Cabeçote;
14. Apertar os parafusos do Cabeçote firmemente.