

Concepção, desenvolvimento e projecto de um sistema modular de fabrico aditivo

João Francisco de Aragão Barros e Alvim Boto

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Marco Alexandre de Oliveira Leite
Prof. António Manuel Relógio Ribeiro

Júri

Presidente: Prof. João Orlando Marques Gameiro Folgado

Orientador: Prof. Marco Alexandre de Oliveira Leite

Vogal: Prof. Luis Alberto Goncalves de Sousa

Novembro de 2016

Resumo

O fabrico aditivo consiste em processos de fabrico de peças por adição de camadas sucessivas de material. Estes têm sido desenvolvidos para permitir a utilização de diversos materiais, aumentar a qualidade da peça fabricada e diminuir o tempo de fabrico.

Para peças de dimensões superiores às que os sistemas atuais mais comuns permitem fabricar, normalmente pode-se trabalhar em três dimensões: a) aumentar o tempo de fabrico, mantendo a qualidade das peças; b) manter o tempo de fabrico, com sacrifício da qualidade das peças; c) dividir a peça e utilizar adesivos para obter a peça final. Atualmente não é comercializado nenhum sistema que permita fabricar peças de grandes dimensões sem abdicar dos restantes fatores. Existem publicadas patentes onde esta problemática é abordada, porém estes sistemas propostos estão longe de ser eficientes.

Neste documento é proposto um sistema que utiliza simultaneamente diversas cabeças de impressão no fabrico de uma peça, garantindo que a ligação entre todas as camadas tem uma resistência comparável à resistência de uma peça fabricada apenas por uma cabeça de impressão. O sistema permite também que a base de suporte de material possa ter vários módulos independentes. Estas duas características vão contribuir para a qualidade da peça assim como melhorar o tempo de fabrico de peças de grandes dimensões.

Para este sistema modular de fabrico aditivo foi submetido um pedido de registo de patente devido às suas características inovadoras e às vantagens relativamente aos sistemas atuais.

Palavras-chave:

Fabrico aditivo, modular, FDM, múltiplas cabeças de impressão, múltiplas mesas de impressão, fabrico de peças grandes

Abstract

Additive manufacturing is defined by being processes of fabrication by layer addition. These processes are being developed in such a way to allow the deposition of various materials, to improve the part quality and to reduce the fabrication time.

To produce parts with larger dimensions that the current most common systems allow to produce there are three dimensions to work in: a) raise the production time, maintaining a similar quality; b) keep the production time constant, sacrificing the part quality; c) divide the part and use adhesives to obtain the final part. Currently it isn't commercialized any system that allows an upscale of the part dimensions that doesn't, subsequently, affect the other factors. There are registered patents that protect systems in where this problem is considered, although these proposed systems are far from being efficient.

In this document, it's proposed a system that makes use of many printing heads simultaneously in the fabrication of a part, ensuring that the connection between all the layers has a resistance that is comparable to the resistance in a part that is fabricated using only one printing head. It is also developed a method in which the printing bed can have various independent modules. These two characteristics will contribute to the part quality as well as the improvement of the production time of parts with large dimensions.

For this modular system of additive manufacturing it was submitted a patent protection request due to its innovative characteristics and advantages when compared to the actual systems.

Keywords:

Additive manufacturing, modular, FDM, multiple printing heads, multiple build platforms, large parts fabrication

Agradecimentos

A todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos, em particular:

Ao meu orientador Prof. Marco Leite apresento os meus sinceros agradecimentos por toda a sua paciência e motivação, pela sua ajuda na estruturação do processo e pelo seu contributo crítico e científico durante todo o trabalho.

Ao meu orientador Prof. António Relógio Ribeiro apresento os meus sinceros agradecimentos por todos os seus contributos críticos e pensamento “fora da caixa” que permitiram o sucesso da realização deste trabalho.

Ao Prof. Luís Reis e ao Prof. Bruno Soares apresento os meus sinceros agradecimentos por toda a sua ajuda, contributo científico e boa disposição que me forneceram nas longas e tardias reuniões para a elaboração do documento da patente, mostrando que toda a ajuda é sempre bem-vinda.

Ao meu colega Nuno Frutuoso apresento os meus sinceros agradecimentos por me ter introduzido no tema e por ter realizado o trabalho que serviu de base para esta dissertação, para além de todos os conselhos e ajuda na escrita da mesma.

A todos os meus colegas e amigos, em especial ao Lucas Pionácio, apresento os meus sinceros agradecimentos por me terem ajudado em todo o meu percurso, tanto a nível académico como a nível pessoal, e por me terem acompanhado em todos os projetos e decisões tomadas desde o início da nossa amizade.

À minha namorada, Constança Chaves, apresento os meus sinceros agradecimentos por toda a sua paciência e ajuda durante o desenvolvimento deste documento e por me ter acompanhado e apoiado em tudo ao longo dos últimos 3 anos sem qualquer hesitação.

Aos 6 lá de casa apresento os meus sinceros agradecimentos por me terem possibilitado a frequência neste curso sem que nunca me faltasse nada e sempre com o maior apoio que alguém poderia ter, confiando sempre no meu sucesso e no meu valor.

Índice

Resumo	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos.....	v
Índice	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
Lista de Abreviaturas.....	xiii
Lista de Símbolos	xiv
1. Introdução	1
1.1. Definição do problema.....	1
1.2. Aplicações industriais	2
1.3. Estrutura do documento	2
2. Fabrico Aditivo	3
2.1. O processo de fabrico aditivo	3
2.2. Evolução dos processos de fabrico aditivo	6
2.3. Modelação por deposição de fundido.....	7
2.3.1. Funcionamento.....	7
2.3.2. Materiais.....	9
2.3.3. Mesa de impressão	10
2.3.4. Alimentador	11
2.3.5. Elemento de aquecimento	12
2.3.6. Bocal	12
2.3.7. Cabeça de impressão.....	13
2.3.8. Estrutura.....	13
2.3.9. Deposição e trajetórias	16
3. Estado da arte.....	18
3.1. Sistemas com uma cabeça de impressão.....	18
3.2. Sistemas com múltiplas cabeças de impressão.....	21
4. Estrutura, componentes e funcionamento	26
4.1. Considerações iniciais	26
4.2. Plataforma de impressão.....	27
4.3. Cabeças de impressão	28
4.4. Componentes e funcionamento.....	29
4.5. Requisitos e especificações iniciais	32
5. Projeto.....	34
5.1. Mecanismo de extrusão.....	36
5.2. Cabeças de impressão	37

5.3.	Guia linear e atuador linear do movimento segundo o eixo "x"	39
5.4.	Elemento vertical do pórtico	47
5.5.	Sistema de atuação linear do movimento segundo o eixo "y"	49
5.6.	Estrutura de suporte dos módulos de deposição	53
5.7.	Mesa de impressão	60
5.8.	Estrutura de suporte da mesa de impressão.....	66
5.9.	Resultados	67
6.	Conclusões e desenvolvimentos futuros	68
7.	Bibliografia	69
Anexo A.	Desenhos de conjunto	A-1

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Problema atual em AM.	1
Figura 2.1 - Exemplo do processamento de um objeto. Adaptado de Gibson <i>et al.</i> (2009).....	3
Figura 2.2 - Ilustração do efeito de escada. Adaptado de Gebhardt (2011).	4
Figura 2.3 – (a) Representação de camadas suspensas. (b) Efeitos da falta de utilização de material de suporte. Adaptados de Cunico (2013).	4
Figura 2.4 - Evolução da venda de sistemas de fabrico aditivo para uso doméstico. Retirado de Engineering (2016).	7
Figura 2.5 - Eixos cartesianos dos sistemas de FDM.....	8
Figura 2.6 - Representação de um sistema de FDM. Adaptado de Stansbury e Idacavage (2016).....	8
Figura 2.7 – Representação de uma peça que necessita de material de suporte para ser fabricada.	9
Figura 2.8 – Demonstração da utilização de álcool polivinílico como material de suporte. (a) Peça após deposição. (b) Processo de dissolução. (c) Peça final. Retirado de 3D Printing for Beginners (2014).....	10
Figura 2.9 – Representação de um alimentador.....	11
Figura 2.10 – Posicionamento do alimentador. (a) Solidariamente com o elemento de aquecimento e bocal. (b) Fixo à estrutura com recurso ao cabo de <i>Bowden</i>	12
Figura 2.11 – Representação da estrutura de um bocal utilizado em FDM. Adaptado de (Turner <i>et al.</i> , 2014).	13
Figura 2.12 – Exemplo de sistemas de coordenadas cartesianas de FDM. (a) Sistema linear. Retirado de http://goo.gl/LyEfTy . (b) Sistema de robot Delta. Retirado de http://goo.gl/DLFiVF	14
Figura 2.13 - Exemplo de sistemas de coordenadas polares de FDM. (a) Sistema polar. Retirado de http://goo.gl/QW6xmi . (b) Sistema de SCARA. Retirado de http://goo.gl/cFUInl	15
Figura 2.14 – Representação dos possíveis formatos de um caminho depositado e da sua interação com os caminhos adjacentes. (a) Caminho estreito. (b) Caminho ótimo. (c) Caminho largo. Retirado de Brooks <i>et al</i> (2013).	16
Figura 2.15 – Representação da ligação entre 2 caminhos. (a) Contacto superficial. (b) Crescimento do <i>neck</i> . (c) Difusão molecular. Adaptado de Sun <i>et al</i> (2008).	17
Figura 3.1 – Representação do método de enchimento escasso com caminhos interiores a 0° e 90° dos contornos. Adaptado de Iyibilgin <i>et al</i> (2014).	19
Figura 3.2 – Representação do método de <i>adaptive slicing</i> . Adaptado de Sabourin <i>et al</i> (1997).	20
Figura 3.3 – Sistemas FDM de grandes dimensões. (a) BigRep One. Retirado de http://goo.gl/64dcJW . (b) Leapfrog XceL. Retirado de http://www.lpfrg.com/en/xcel . (c) Massivit 3D. Retirado de http://goo.gl/asy2N5 . (d) Fortus 900mc. Retirado de http://goo.gl/DdbQgj	21
Figura 3.4 – (a) Representação de ligação de zonas da peça feita de forma alternada. Retirado de Wachsmuth (2008). (b) Ilustração da divisão em zonas individuais e zonas partilhadas proposta por Wachsmuth.	23
Figura 3.5 - Sistemas FDM de múltiplas cabeças. (a) Beast. Retirado https://goo.gl/LixfI9 . (b) Stacker 500S. Retirado de https://goo.gl/ldsJU6	24
Figura 3.6 – Mecanismos protegidos por: (a) Zhang (2015); (b) Wang (2015); e (c) Uzan e Yakubov (2015).	25
Figura 4.1 – Área de impressão resultante de áreas de impressão retangulares e circulares, com zonas partilhadas. Dimensões em mm.....	27
Figura 4.2 - Exemplo do fuso e das guias lineares de uma mesa de impressão.....	28

Figura 4.3 – Representação de vários posicionamentos de fabrico de uma peça. (a) Posicionamento em “U”. (b) Posicionamento em “U” invertido. (c) Posicionamento em “U” deitado. (d) Posicionamento com a espessura alinhada com o eixo “z” da máquina.....	29
Figura 4.4 - Esquema representativo do número de mesas e cabeças de impressão.	30
Figura 4.5 – Representação de uma peça com várias zonas de deposição fisicamente separadas.....	31
Figura 4.6 – Representação dos elementos que garantem a possibilidade de poder depositar material em coordenadas de “y” iguais simultaneamente.	32
Figura 5.1 – Conceito proposto para o sistema de AM modular.....	34
Figura 5.2 – Modelo da estrutura do sistema.	35
Figura 5.3 – Modelos dos módulos do sistema. (a) Módulo de plataforma. (b) Módulo de deposição com pórtico de maior altura. (c) Módulo de deposição com pórtico de menor altura.	36
Figura 5.4 – Vista de frente do sistema de fabrico aditivo reconfigurável.....	36
Figura 5.5 – (a) Dimensões do alimentador <i>Bulldog XL</i> . Adaptado de http://goo.gl/3ADIOR . (b) - Detalhe do mecanismo de alimentação. Adaptado de http://goo.gl/jNJQ1m	37
Figura 5.6 - Elemento de aquecimento. Adaptado de https://goo.gl/dUs8NA	37
Figura 5.7 – Dimensões do colar do elemento de aquecimento.....	38
Figura 5.8 – (a) Modelo da fixação dos elementos de aquecimento. (b) Modelo da secção da cabeça de impressão.	39
Figura 5.9 – Modelo das cabeças de impressão, que dependem da altura a que a guia linear a que estão fixos está posicionada. (a) Guia linear posicionada numa altura menor. (b) Guia linear posicionada numa altura maior.	39
Figura 5.10 – Representação da secção guia linear da NSK. Adaptado de Motion & Control™ NSK (2014).....	40
Figura 5.11 – Constrangimento do extremo do fuso. (a) Chumaceira de rolamento. Retirado de http://goo.gl/7xbXNo . (b) Modelo do suporte da chumaceira de rolamento.	41
Figura 5.12 – Motor LDO-28STH32-0674. (a) Desenho técnico. Retirado de http://goo.gl/edHRqe . (b) Curva do binário em função da velocidade. Adaptado de https://goo.gl/3OsLjS	42
Figura 5.13 – (a) Suporte do motor para fixação à guia linear. (b) Representação de uma união de veios. Retirado de http://goo.gl/EyODss	43
Figura 5.14 – (a) Modelo da fixação da cabeça de impressão à porca. (b) Modelo dos mecanismos que permitem o movimento segundo “x” da cabeça de impressão.	43
Figura 5.15 – Diagrama de forças aplicadas na guia linear do eixo “x”.	46
Figura 5.16 – Representação em CAD do conjunto do componente em forma de “C” do elemento vertical do pórtico. (a) Componente em “C”. (b) Componente que impede a sua rotação.....	47
Figura 5.17 - Representação da montagem do conjunto do componente em forma de “C” do elemento vertical do pórtico. (a) Vista geral. (b) Detalhe da folga entre a porca e o elemento em “C”.....	48
Figura 5.18 – Representação em CAD do tubo retangular do pórtico. (a) Correspondente à guia linear em “x” com menor altura. (b) Correspondente à guia linear em “x” com maior altura.	48
Figura 5.19 – Motor LDO-35STH26-0284. (a) Desenho técnico. Retirado de https://goo.gl/DvbeZC . (b) Curva do binário em função da velocidade. Adaptado de https://goo.gl/DvbeZC	49
Figura 5.20 – (a) Modelo da base de suporte dos componentes do elemento horizontal do pórtico. (b) Modelo do suporte do motor do atuador linear no eixo “y”.....	50
Figura 5.21 – Chumaceira de rolamento SC8 UU. (a) Representação da mesma e (b) Desenhos técnicos desta. Retirados de https://www.adafruit.com/product/1179	51
Figura 5.22 – (a) Modelo da peça que eleva a chumaceira de rolamento. (b) Dimensões do veio motor.	52
Figura 5.23 – Chumaceira de rolamento KFL 000. (a) Representação da mesma e (b) Desenhos técnicos desta. Retirados de https://goo.gl/x3NGIZ	53

Figura 5.24 – Modelo do conjunto do pórtico da cabeça de impressão.....	53
Figura 5.25 - Representação da distância entre o centro dos pinhões e o final da cremalheira.	54
Figura 5.26 – Representação da secção de perfis de alumínio com ranhura de 6 mm. (a) 20x20. (b) 20x40. (c) 20x60. Retirado de Bosch Rexroth AG (2016).	55
Figura 5.27 – Fixação da cremalheira ao perfil de alumínio.	55
Figura 5.28 – Módulo de deposição com representação da maior distância segundo o eixo “y”.	56
Figura 5.29 – Diagrama de forças dos perfis de alumínio alinhados com o eixo “y”. (a) Caso A. (b) Caso B.	57
Figura 5.30 – Representação do elemento de ligação entre os vários perfis de alumínio. Adaptado de (Bosch Rexroth AG, 2016).....	58
Figura 5.31 – (a) Modelo dos elementos de suporte dos módulos de deposição. (b) Diagrama de forças sobre o perfil de alumínio disposto segundo o eixo “x”.....	59
Figura 5.32 - Elementos do módulo de plataforma. (a) Película de poliamida. Retirado de https://goo.gl/Hs82RX . (b) Modelo do vidro.....	61
Figura 5.33 - Análise do vidro da plataforma em <i>Siemens NX</i> . (a) Simulação. (b) Resultados.....	61
Figura 5.34 – (a) Modelo da base de aço inoxidável do módulo de plataforma. (b) Modelo do componente que forma o bloco de fixação da guia linear. (c) Guia linear.....	63
Figura 5.35 – (a) Modelo do componente em “L” de ligação da chumaceira de rolamento linear. (b) Modelo da montagem do componente em “L” e da chumaceira de rolamento.	63
Figura 5.36 – Modelo de componentes que permitem a união do motor ao fuso à plataforma de impressão. (a) Suporte do motor. (b) Chapa de fixação. (c) Montagem.	64
Figura 5.37 – Modelo do módulo de plataforma.	65
Figura 5.38 - Perfil de alumínio no qual está fixa a porca. (a) Modelo. (b) Montagem.	66
Figura 5.39 - Estrutura de suporte da mesa de impressão.....	67

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Especificações para provar o funcionamento do conceito.....	33
Tabela 5.1 – Características das cabeças de impressão.	38
Tabela 5.2 - Características do motor LDO-28STH32-0674. Informação retirada de http://goo.gl/edHRqe e de http://goo.gl/B6NNxh	42
Tabela 5.3 – Comprimento de vários componentes que permitem o movimento da cabeça de impressão segundo o eixo “x”.....	44
Tabela 5.4 - Características do motor LDO-35STH26-0284. Informação retirada de https://goo.gl/DvbeZC e de https://goo.gl/FTLGNV	49
Tabela 5.5 – Dimensões da chumaceira de rolamento SC8 UU. Informação retirada de https://www.adafruit.com/product/1179	52
Tabela 5.6 – Dimensões da chumaceira de rolamento KFL 000. Informação retirada de https://goo.gl/x3NGIZ . .	53
Tabela 5.7 – Deflexões totais do sistema em diversos pontos.....	62

Lista de Abreviaturas

3D – Tridimensional

3DP – Impressão Tridimensional

ABS – Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno

AM – Fabrico Aditivo

CAD – Desenho Assistido por Computador

CAM - Maquinagem Assistida por Computador

FDM - Modelação por Deposição Fundida (*Fused Deposition Modeling*)

LOM – Fabrico Laminado de Objetos (*Laminated Object Manufacturing*)

PC – Policarbonato

PLA – Ácido Poliláctico

RP – Prototipagem Rápida

RT – *Rapid Tooling*

SCARA - *Selective Compliance Assembly Robotic Arm*

SLS – Sinterização a Laser (*Selective Laser Sintering*)

Lista de Símbolos

Letras gregas

μ – Coeficiente de atrito

ω – Velocidade angular

Δ – Diferença

σ – Tensão

δ – Deflexão

Φ – Diâmetro

λ – Ângulo de avanço

Letras romanas

F – Força

M – Momento

I – Momento de Inércia de Área

E – Módulo de *Young*

P – Peso

p – Pressão

r – Raio

k – Raio de Giração

l – Comprimento

h – Altura

w – Carga Distribuída

m – Massa

g – Aceleração Gravítica

p – *Passo do Fuso*

a – Avanço do Fuso

i – Relação de Transmissão

v – Velocidade Linear

a – Aceleração Linear

B – Binário

1. Introdução

Os processos de fabrico aditivo (AM) são processos onde, contrariamente aos processos de remoção de material, a peça pretendida é fabricada camada a camada por adição de material. Deste modo é possível criar objetos de geometria complexa sem custos elevados. A intervenção humana existe na criação de um modelo em computador, na configuração dos parâmetros de impressão e na remoção e pós-processamento da peça.

Estes processos surgiram na década de 80 do século XX, sendo protegidos como propriedade intelectual e tendo sido desenvolvidos internamente nos primeiros anos. Recentemente, com o fim do prazo desta proteção, várias empresas desenvolveram a tecnologia em variadas direções, com o objetivo de a tornar mais eficiente e economicamente mais vantajosa. Estes processos são principalmente utilizados na produção de protótipos, em peças com pequenas séries de produção e em peças complexas e customizadas.

1.1. Definição do problema

Três dos fatores mais importantes no fabrico de uma peça por processos de fabrico aditivo são as dimensões desta, o tempo que demora a ser fabricada e a sua qualidade (precisão geométrica e propriedades mecânicas). Na tomada de decisão do processo a utilizar, é necessário optar entre uma peça com uma boa qualidade, mas com um tempo de fabrico elevado e uma peça fabricada num menor espaço de tempo, mas com pior qualidade. Daqui resulta que os sistemas atuais apresentem envelopes de fabrico que permitem apenas a impressão de peças de dimensões reduzidas. Por exemplo, o sistema da *Stratasys* de maiores dimensões apresenta um envelope de 914 mm x 610 mm x 914 mm.

Para se fabricar uma peça por AM com elevada qualidade e em pouco tempo esta terá de ter dimensões reduzidas. A Figura 1.1 indica este problema: dos três fatores, apenas se pode obter dois simultaneamente, prejudicando o terceiro.

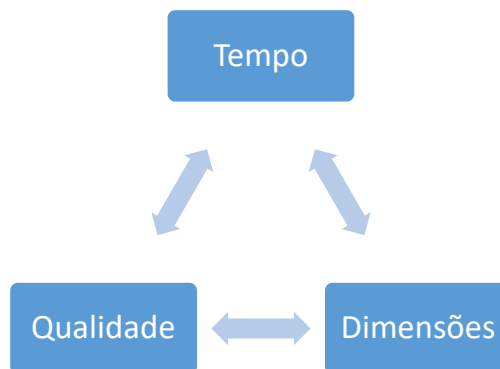


Figura 1.1 – Problema atual em AM.

O objetivo deste trabalho é propor uma solução inovadora para um sistema de fabrico aditivo com múltiplas cabeças de deposição. Este sistema permite aumentar o volume de produção e/ou as dimensões da peça a ser fabricada com uma elevada qualidade e sem prejudicar a eficiência do processo. Simultaneamente, pretende-se que a base onde o material será depositado seja composta por vários conjuntos independentes para permitir o início de trabalhos no decorrer de outros. Existe a

possibilidade de tanto as cabeças de deposição como os conjuntos que compõem a base poderem ser removidos e reposicionados, com o objetivo de permitir optar por uma configuração mais vantajosa.

1.2. Aplicações industriais

Os processos de fabrico aditivo permitem fabricar peças em grande parte dos materiais disponíveis, com especial destaque para os polímeros e para os metais. Apesar destas tecnologias já serem utilizadas em muitas indústrias, são raros os exemplos em que os protótipos, ou mesmo produtos finais, são produzidos à escala real ou num tempo que os torne competitivos.

Com a introdução deste sistema no mercado, seria possível a sua incorporação na indústria automóvel e aeronáutica para permitir os testes à escala real de variados componentes, sem que os tempos de fabrico aumentem proporcionalmente. Em termos de indústrias de customização em massa, este sistema permitiria que, virtualmente, peças de qualquer dimensão fossem produzidas e comercializadas.

A contribuição deste trabalho passa pela conceção, desenvolvimento e projeto de um sistema modular de fabrico aditivo que permitirá a construção de um protótipo para validação do conceito. Sistema este que permite iniciar o processo de registo de propriedade intelectual.

1.3. Estrutura do documento

O texto foi organizado tendo um capítulo a introduzir o fabrico aditivo e os vários tipos de processos que o constituem, com especial destaque para a modelação por deposição de fundido (FDM). No capítulo 3 indica-se o estado da arte sobre variados conceitos que tentam resolver o problema identificado na secção 1.1. No capítulo 4 são definidos os diversos componentes do sistema de fabrico aditivo modular proposto e no capítulo 5 alguns destes elementos são projetados. Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e trabalhos a realizar futuramente para desenvolver este projeto.

2. Fabrico Aditivo

O termo impressão tridimensional (3D), *3D printing*, é um termo popular que se refere à fabricação de peças com recurso às chamadas impressoras 3D. No entanto o termo correto será fabrico aditivo (*additive manufacturing*). O AM foi definido pela *American Society for Testing and Materials* (2012) como o processo de ligação de materiais, normalmente constituído por camadas sobrepostas, para fazer uma peça, utilizando um modelo 3D digital.

2.1. O processo de fabrico aditivo

Para se utilizar este processo é necessário criar um modelo em computador através de um sistema de desenho assistido por computador (CAD) que irá, posteriormente, ser processado por um *software* de fabrico assistido por computador (CAM). Será este último o responsável por garantir a melhor relação tempo/qualidade do processo de fabrico. Na Figura 2.1 está representado um exemplo de um objeto que foi modelado num *software* CAD (à esquerda) e que foi processado num *software* CAM para ser dividido em várias camadas (à direita).

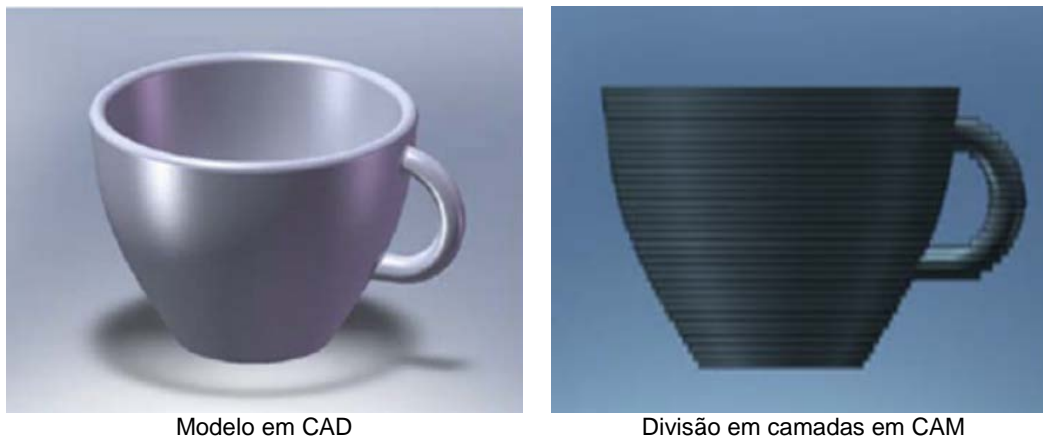


Figura 2.1 - Exemplo do processamento de um objeto. Adaptado de Gibson *et al.* (2009).

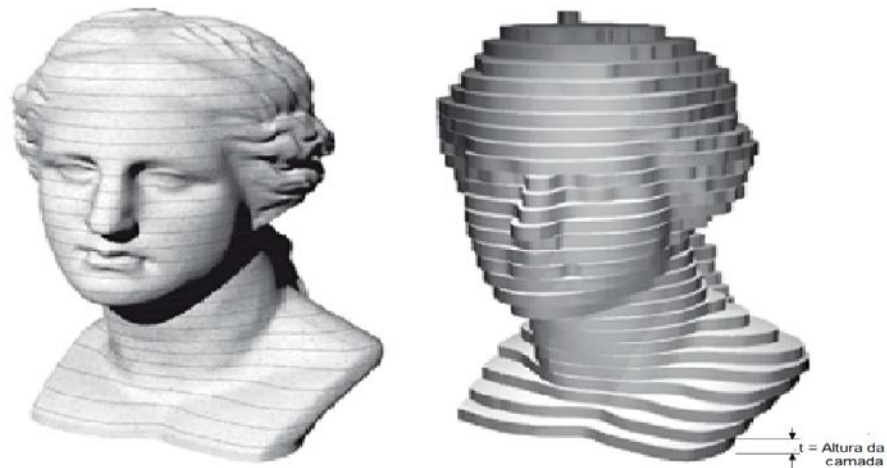
Na tecnologia AM, o *software* CAM divide o modelo CAD em camadas e gera o percurso que as ferramentas irão realizar para o fabrico da peça. O *software* CAM origina um código de controlo numérico, chamado código-G, que irá ser executado pela máquina-ferramenta adequada.

Devido à natureza do processo de geração de camadas existe um erro volumétrico associado a esta tecnologia. Este erro volumétrico, chamado efeito de escada, existe em peças cujas superfícies não são totalmente perpendiculares nem paralelas à base da mesma. Este erro está diretamente associado à espessura da camada depositada, sendo maior quanto maior for essa espessura, e depende do processo utilizado e dos parâmetros de operação.

Em Panda *et al* (2016) é apresentado um método para calcular o valor total destes erros, bem como um método que permite minimizar estes erros através da orientação da peça a ser fabricada. Na Figura 2.2 apresenta-se um exemplo exagerado destes erros e onde se percebe também que diminuição da espessura das camadas irá melhorar a qualidade superficial da peça.

À medida que as camadas são criadas pode dar-se outro problema. Sempre que houver necessidade de camadas suspensas será necessário utilizar material de suporte. Estas camadas

suspensas podem ser observadas na Figura 2.3 (a), na representação das duas cantoneiras do lado esquerdo e também na representação da estrutura em U do lado direito, onde está representado numa cor mais clara o material de suporte. Segundo Cunico (2013), não utilizar material de suporte quando necessário, para além de, no extremo, poder fazer com que a peça não seja fabricável, pode causar deformações e malformação de certas camadas. Na Figura 2.3 (b) podem ser observados, numa peça real, os efeitos da não utilização de material de suporte com a evidente falta de qualidade da peça fabricada. A adição de material de suporte implica que o mesmo tenha de ser removido após o fabrico da peça, visto este não fazer parte do objeto pretendido.



Modelo dividido em camadas (idealizado). Modelo dividido em camadas (sujeito ao efeito de escada).

Figura 2.2 - Ilustração do efeito de escada. Adaptado de Gebhardt (2011).

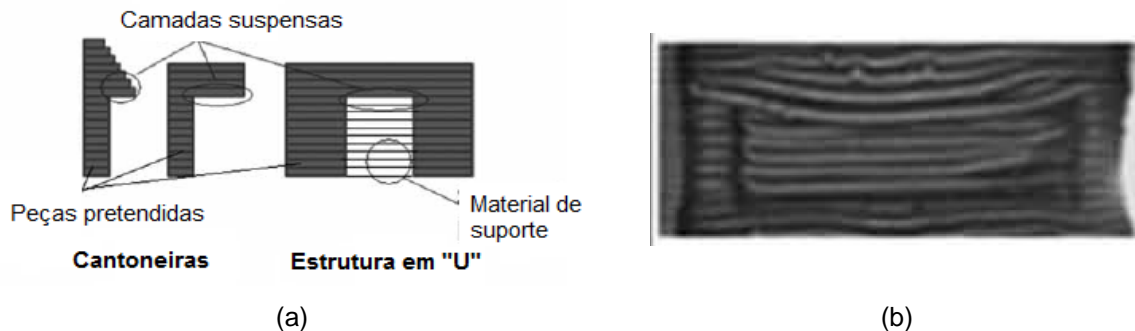


Figura 2.3 – (a) Representação de camadas suspensas. (b) Efeitos da falta de utilização de material de suporte. Adaptados de Cunico (2013).

O passo seguinte é o fabrico da peça na máquina-ferramenta adequada. Existem vários tipos de máquinas-ferramenta para os diversos tipos de fabrico aditivo, que podem ser divididos em quatro grupos sugeridos por Kruth *et al* (1998), segundo o estado físico do material base:

- Líquidos,
- Pós,
- Sólidos,
- Gasosos.

Para além da remoção do material de suporte, a peça pode ser sujeita a pintura, limpeza, acabamentos superficiais e ainda tratamentos térmicos do material. Todos estes processos estão incluídos na última fase de fabrico aditivo: o pós-processamento. Findo este a peça estará pronta a ser utilizada.

Nos processos onde material base se encontra no estado líquido, este é utilizado para formar as camadas enquanto está nesse estado, solidificando de seguida para formar o objeto pretendido. Para o realizar podem utilizar-se dois tipos de materiais que implicam métodos totalmente diferentes. O primeiro tipo de materiais corresponde aos que à temperatura ambiente se encontram no estado líquido e que são sujeitos a cura, por exemplo cimentos e fotopolímeros, tais como acrilatos e resinas. No segundo tipo, os materiais apresentam-se sólidos à temperatura ambiente e são fundidos para criar as camadas, retornando depois ao estado sólido, por exemplo polímeros termoplásticos. No caso dos materiais que são líquidos à temperatura ambiente, o método mais comum é a estereolitografia. Esta depende do fato de, tal como afirmado por Gibson *et al* (2009), a maioria dos materiais fotopoliméricos solidificarem quando expostos a radiação ultravioleta ou até, em alguns casos, a luz visível. Nos processos onde o material tem de ser fundido para poder dar origem à peça pretendida, um dos processos mais utilizados é o FDM devido à sua facilidade de utilização, facilidade de aplicação e custo das peças. Este processo será explicado em detalhe na secção 2.3.

No grupo dos processos com material base em pó destaca-se a sinterização a laser (SLS) que, tal como o nome sugere, implica a sinterização de partículas. Segundo Gibson *et al* (2009), é aplicada a energia de um laser em partículas de material com diâmetro entre 30 μm e 90 μm de modo a obter uma temperatura que se situe entre metade da temperatura de fusão e a temperatura de fusão. Esta é a temperatura de sinterização, que se caracteriza por permitir que partículas adjacentes se unam sem estarem no estado líquido. O outro processo destacado neste grupo é a impressão tridimensional (3DP). Contrariamente ao SLS, no 3DP não há sinterização nem fusão do material da peça. Contudo, apesar do material estar em pó, é necessário adicionar um material de ligação, neste caso fundido, para unir as partículas de pó.

Os processos com material base no estado sólido são processos cujo material base não necessita de mudar de estado para dar forma ao objeto nem precisa de ser processado até obter pó. Utilizando chapa ou folha e utilizando um adesivo dá-se forma à peça pretendida e, em certos casos, após se retirar o excesso de material a peça pode ser sinterizada ou envernizada de modo a não ocorrer separação de camadas. O conceito surgiu em 1991 com o fabrico laminado de objetos (LOM) utilizando papel como material base e laser de CO₂ para efetuar o corte. Até à data foram criados outros processos, mas que se resumem a pequenas alterações do primeiro, sendo que o funcionamento é muito semelhante.

O último grupo de processos, utilizando materiais gasosos, não é considerado por todos os autores como sendo processos de fabrico aditivo. Isto deve-se ao facto de serem fabricados apenas microcomponentes com dimensões máximas 40 vezes inferiores à escala máxima da maioria dos processos incluídos nas categorias anteriores, segundo Kruth *et al* (1998). Neste processo existe a deposição química de vapor por laser e consiste numa câmara isolada do exterior, uma mesa de trabalho e um sistema de laser. Dependendo do material que se quer utilizar para formar a peça

pretendida é utilizado uma combinação de compostos químicos no estado gasoso que irão ser introduzidos na câmara e localmente foto-decompostos pelo feixe de laser podendo criar-se peças de diversos materiais, incluindo metais, cerâmicos e até diamante.

2.2. Evolução dos processos de fabrico aditivo

Estes processos começaram a ser comercializados no início da década de 90 permitindo apenas criar peças em material termoplástico no caso do FDM ou em papel no caso de LOM. Estas peças apresentavam um fraco acabamento superficial e um tempo de fabrico muito elevado. Estes fatores associados ao custo elevado dos equipamentos e materiais não os tornam competitivos para a produção em massa de componentes. As máquinas de fabrico aditivo foram adotadas pelo mercado, numa primeira fase, sobretudo para prototipagem rápida (RP).

Um protótipo é um modelo de um objeto que serve para apoio ao processo de conceção, permitindo analisar rapidamente os possíveis erros e as possíveis falhas do mesmo antes de se iniciar a produção e, deste modo, evitar custos adicionais. Segundo Rayna e Striukova (2015), entre outros, criar um protótipo de um produto sem utilizar estes métodos pode demorar várias semanas, mas utilizando técnicas de AM esse tempo pode ser reduzido para alguns dias ou até horas, o que representa uma clara vantagem.

Na segunda metade da mesma década são desenvolvidos processos capazes de produzir peças com polímeros resistentes ao calor. Surgiram também processos capazes de processar metais, abrindo estes métodos ao mercado de fabrico de moldes. Até à data, para se fabricar um molde, ou seja, o negativo da peça que se pretende fabricar por injeção de polímeros, era necessário um investimento que pode variar entre poucos milhares de euros a largas dezenas de milhares de euros (Rayna e Stiukova, 2015), para além de elevado tempo, visto serem fabricados por processos de remoção de material, como a fresagem. No final, se houver algum erro geométrico na peça, a solução poderia passar por se construir um novo molde. Graças ao fabrico aditivo, estes moldes poderiam ser fabricados por uma fração do preço e numa fração do tempo. Estas técnicas de AM permitem o fabrico rápido de ferramentas, em inglês *rapid tooling* (RT).

No início do século XXI, como a propriedade intelectual tem um prazo de 20 anos até deixar de estar protegida, muitos fabricantes entraram no mercado das máquinas de fabrico aditivo fazendo baixar os preços e aumentando a velocidade e a qualidade das peças. Desta forma, generalizou-se o uso das tecnologias de fabrico aditivo no mercado, desde a área automóvel e aeroespacial até industria alimentar, passando por aplicações médicas e até criação de órgãos humanos (Rayna e Stiukova, 2015).

Por fim, o último passo que foi dado foi o fabrico em casa, o chamado *social manufacturing* (Economist, 2012), permitido pelo baixo investimento necessário para adquirir as chamadas *3D printers*. Existe uma comunidade de consumidores finais que optam por adquirir uma máquina de AM de modo a poderem fabricar os seus objetos sem recorrer a produtores. Observa-se também a criação de uma comunidade de *makers* que alteram e disponibilizam em *open source* os seus desenvolvimentos. Na Figura 2.4 pode observar-se a evolução das vendas de sistemas de fabrico aditivo para uso em casa entre 2007 e 2015.

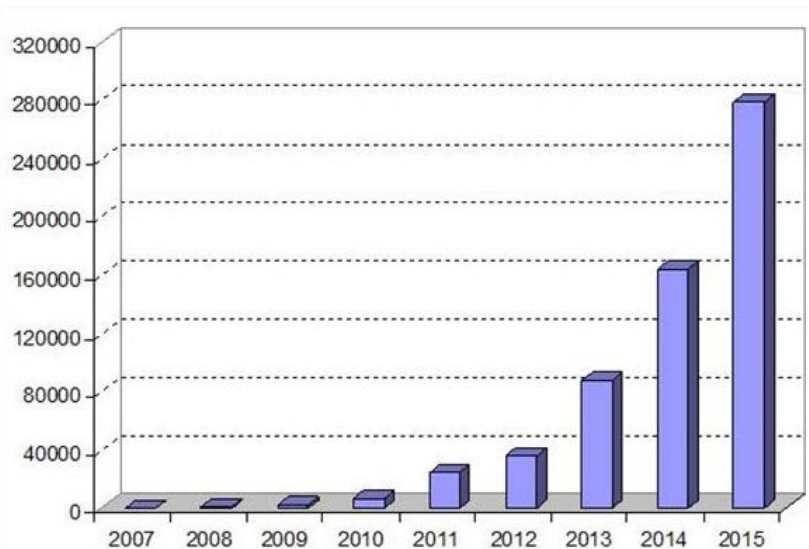


Figura 2.4 - Evolução da venda de sistemas de fabrico aditivo para uso doméstico. Retirado de Engineering (2016).

2.3. Modelação por deposição de fundido

O FDM pertence ao grupo de processos cujo material base de fabrico de componentes se encontra no estado líquido, com a particularidade deste material ser sólido à temperatura ambiente e ter de ser fundido antes de poder ser utilizado para fabricar a peça pretendida. Scott Crump, fundador da Stratasys que é uma das maiores empresas dedicadas aos processos de AM, teve a si atribuída a patente que protegia este processo em 1992, comercializando-o desde 1991 (Hopkinson *et al*, 2006). Mas findo o prazo de proteção de propriedade intelectual, muitas empresas dedicaram-se ao fabrico de equipamentos com a mesma tecnologia, mas de mais baixo custo, com destaque para a MakerBot, adquirida pela Stratasys em 2013 por 403 milhões de dólares americanos (CNN Money, 2013).

2.3.1. Funcionamento

A maioria dos sistemas de FDM comercializados nos dias de hoje têm um funcionamento segundo coordenadas cartesianas, definindo cada ponto no espaço com 3 coordenadas (x, y e z), embora também haja sistemas, como o Polar 3D da empresa com o mesmo nome, que funcionam através de coordenadas polares, onde cada ponto é dado pela distância ao centro da mesa de trabalho e um ângulo que esse ponto faz com a posição inicial. Por ser mais comum haver sistemas de coordenadas cartesianas este documento irá dar mais ênfase a mecanismos que funcionem de tal maneira considerando, de ora em diante, “x” as coordenadas segundo a largura da peça, “y” as coordenadas segundo o comprimento da peça e “z” as coordenadas segundo a altura da peça, tal como pode ser observado na Figura 2.5.

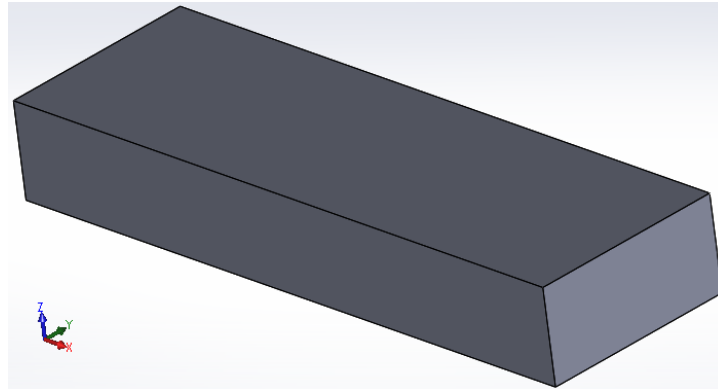


Figura 2.5 - Eixos cartesianos dos sistemas de FDM.

O material é sólido à temperatura ambiente e é nesse estado que se encontra no início do processo. No entanto, é necessário fundi-lo antes de se poder proceder ao depósito das camadas de uma peça. Um pouco à semelhança do mecanismo de extrusão, o material irá ser conduzido, através de um alimentador até ao elemento de aquecimento, conhecido como *hot end*, onde será fundido e, com a pressão exercida pelo material ainda no estado sólido, exatamente antes deste, será depositado na mesa de trabalho com o diâmetro controlado pelo utilizador através da abertura do bocal (Figura 2.6).

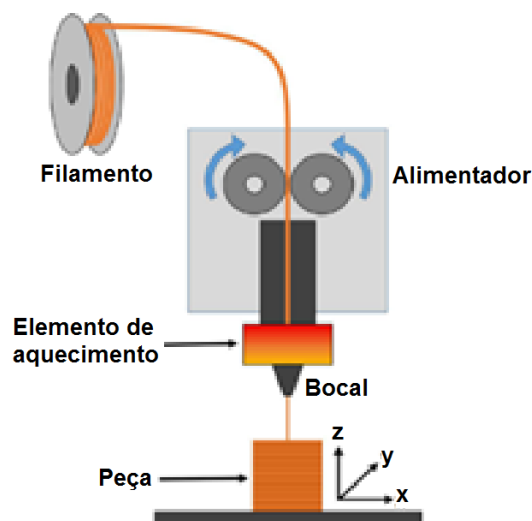


Figura 2.6 - Representação de um sistema de FDM. Adaptado de Stansbury e Idacavage (2016).

O material base começa a solidificar a partir do momento em que sai do bocal, solidificando totalmente passados alguns segundos. Testes realizados por Sun *et al* (2008) em ABS demonstraram que, extrudindo este material a 240 °C, a solidificação estará completa completamente passados, aproximadamente, 3 segundos. Como tal, é importante que o controlo da velocidade de deposição seja bem efetuado para garantir que há união da camada depositada com a camada anterior, caso contrário a peça fabricada não garante boas condições mecânicas. Para além disso, a altura das camadas da peça é dada pelas dimensões de solidificação do material, que, no limite, pode ser bastante aproximado ao diâmetro de saída do bocal, especialmente se houver algum elemento de arrefecimento à saída deste, ou pode ter grandes diferenças se a temperatura do material à saída for bastante superior à

temperatura de fusão, pois o tempo de solidificação será bastante elevado e poderá haver ovalização das camadas depositadas (Sun *et al*, 2008).

Nos processos de FDM, o posicionamento em “x” é garantido, geralmente, pelo movimento da cabeça de impressão, que é o conjunto de componentes que trabalham solidariamente com o bocal, ou bocais. O método de posicionamento em “y” e “z” varia bastante de fabricante para fabricante e até de máquina para máquina, podendo a cabeça de impressão movimentar-se segundo “y” e a mesa segundo “z” ou vice-versa. O movimento em “z” é efetuado quando se pretende depositar a camada seguinte e a sua variação é igual à altura da camada.

Para fabricar uma peça por este processo, é necessário ter em atenção a necessidade de material de suporte, isto porque o material não solidifica imediatamente. A não utilização de material de suporte pode levar a erros geométricos quando, por exemplo, se quer fabricar uma peça com o formato em “U” invertido devido ao efeito de catenária. Outra razão para utilizar material de suporte é a impossibilidade de depositar material numa camada sem que haja material na camada anterior. Na Figura 2.7 é possível observar a representação de uma peça (a cinzento) que necessita de material de suporte para não haver deposição em suspenso (a verde) e que necessita de material para evitar erros geométricos (a azul).

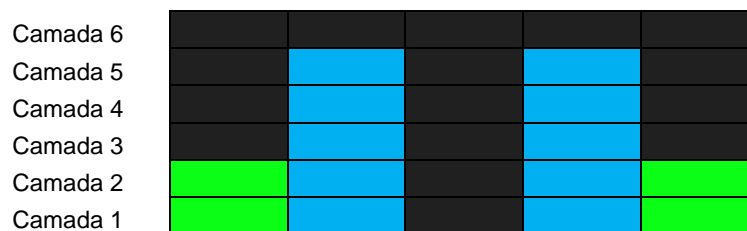


Figura 2.7 – Representação de uma peça que necessita de material de suporte para ser fabricada.

Findo o processo de deposição, é necessário retirar a peça da máquina, remover as estruturas de suporte, caso existam, e o processo termina caso não sejam necessárias outras atividades de pós-processamento.

2.3.2. Materiais

Em teoria, qualquer material que seja sólido à temperatura ambiente e que possa ser fundido, moldado e que volte a solidificar é um bom candidato a ser utilizado para fabricar uma peça por FDM. No entanto, testes têm sido realizados de modo a entender quais os materiais que podem realmente ser utilizados neste processo e muitos apresentam problemas, nomeadamente por causa da baixa viscosidade que alguns obtêm quando são fundidos e as suas tensões superficiais (Kruth *et al*, 1998).

Segundo Gibson *et al* (2009), os materiais com as melhores características e, conseqüentemente, mais utilizados neste processo são polímeros termoplásticos com uma estrutura amorfa. Isto significa que a estrutura destes não é regular e, ao contrário de estruturas cristalinas, o ponto de fusão não é bem definido. Contudo, materiais com ambas as estruturas podem ser depositados neste processo. Hopkinson *et al* (2006) refere que os materiais mais comercializados e utilizados são o acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), o policarbonato (PC) e o polifenilsulfona, que têm uma estrutura amorfa. Por outro lado, com uma estrutura semi-cristalina, o *nylon* e o ácido poliláctico (PLA) também são materiais bastante comuns.

Kruth *et al* (1998) revela que o primeiro método comercializado que permitiu fabricar peças de metal e de cerâmica passava por incorporar partículas de pó num filamento de polímero ou de cera e realizar o processo de forma equivalente ao que foi descrito anteriormente. Quando a peça estivesse concluída, procedia-se à combustão do polímero e sinterizava-se o metal ou o material cerâmico. Outra abordagem para utilizar metal em AM surge com Rabinovich e foi nomeado “deposição precisa de metal”. Este baseia-se na fusão do conceito de FDM com a soldadura onde o metal é continuamente alimentado de acordo com o percurso definido pelo *software* CAM e, de seguida, é soldado às camadas adjacentes por laser.

Quando uma peça necessita de uma estrutura de suporte há três soluções para este problema. Uma solução passa por utilizar o material da peça para fabricar essas estruturas. Outra solução é a utilização de um material para fabricar a peça e usar o mesmo material, mas de outra cor, para fabricar a estrutura de suporte. Neste caso torna-se mais fácil identificar o material em excesso. A terceira solução passa por depositar materiais solúveis, tal como o álcool polivinílico que é solúvel em água. Ao utilizar este material de suporte basta deixar repousar a peça em água que o material de suporte acaba por se dissolver, tal como se pode observar na Figura 2.8.

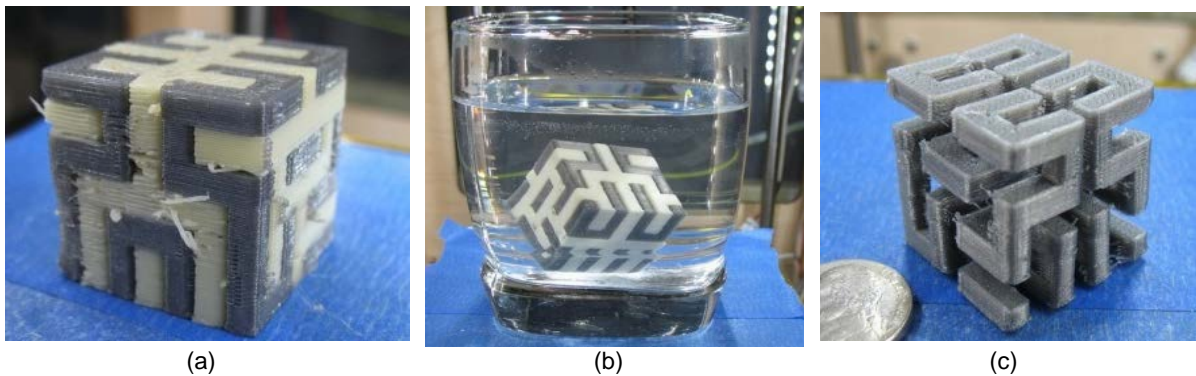


Figura 2.8 – Demonstração da utilização de álcool polivinílico como material de suporte. (a) Peça após deposição. (b) Processo de dissolução. (c) Peça final. Retirado de 3D Printing for Beginners (2014).

2.3.3. Mesa de impressão

Todas as camadas de uma peça que se pretende fabricar são depositadas sobre a camada anterior exceto a primeira, que será depositada sobre a mesa de impressão, ou sobre uma camada inicial de material ou de adesivo para permitir que a ligação à base seja efetuada uniformemente e com a resistência necessária. Devido a isto, a mesa de impressão é um elemento que limita a largura e o comprimento da peça, sendo que nos sistemas mais comuns estas dimensões rondam ambas os 200 mm.

Geralmente, os sistemas que funcionam em coordenadas cartesianas são compostos por mesas retangulares e os sistemas que funcionam em coordenadas polares utilizam mesas circulares, de modo a melhor aproveitarem a área de impressão.

Uma característica importante da mesa de impressão é a rigidez, pois todo o material depositado irá realizar a força do peso sobre esta e a rigidez do material da mesa irá atenuar os possíveis erros dimensionais inerentes às características dos materiais. É necessário ter em atenção a massa desta mesa, especialmente quando o movimento em “y” é realizado pela mesa, pois uma maior

massa aumenta a força necessária para a fazer mover o que pode implicar menores acelerações e, por sua vez, maiores tempos de fabrico. Atualmente, a maioria das mesas de impressão são de vidro, de alumínio ou de acrílico. O maior problema que provém da movimentação da base segundo “y” é inércia da peça que está a ser fabricada. Se a primeira camada depositada não ficar propriamente fixa à mesa de impressão estes movimentos poderão provocar um deslocamento do objeto durante o fabrico o que vai danificar a peça. Uma solução passa por adicionar um adesivo, como cola ou uma fita adesiva, que resista ao calor para manter a primeira camada no sitio desejado, independentemente das solicitações, mas que não poderá ser demasiado forte pois a peça tem de poder ser retirada no final do processo. O outro método para resolver este problema é aquecer a mesa de impressão que, para além de ajudar a fixar o material, pois a temperatura mais elevada da base ajuda a fixação do material a esta, vai evitar que haja deformações na peça pois o calor torna o arrefecimento do material mais uniforme e mais lento. Este aquecimento é conseguido colocando uma resistência sob a mesa de impressão que irá aumentar de temperatura.

2.3.4. Alimentador

Tal como referido por Turner *et al* (2014), o material utilizado em FDM é um filamento de secção circular, tipicamente com diâmetro entre 1,5 mm e 3 mm.

Para conduzir este filamento até ao elemento de aquecimento é utilizada um alimentador (Figura 2.9) que é constituída por um motor elétrico, um cilindro com entalhes e um segundo cilindro que pode também ter entalhes. O utilizador sempre que introduz um novo filamento na máquina introduz o filamento entre os dois cilindros, que estarão afastados. O motor impõe um movimento angular no cilindro com entalhes enquanto o outro cilindro serve para criar uma força no filamento tal que o movimento angular do primeiro se transforma em movimento linear no filamento.

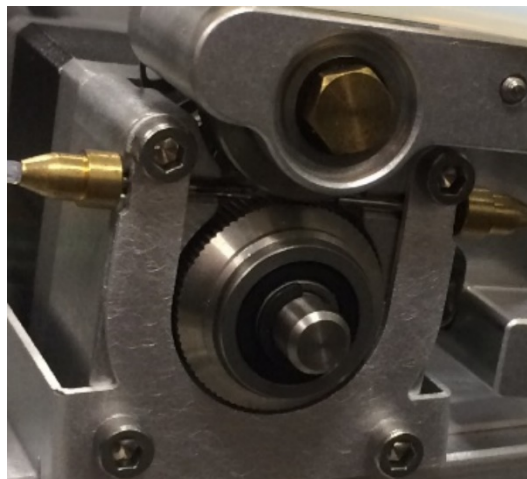


Figura 2.9 – Representação de um alimentador.

Se a rotação do motor elétrico for invertida dá-se a retração do material, ou seja, material que já esteja no bocal é recuado para evitar que haja deposição de material não planeada quando, por exemplo, há um reposicionamento da cabeça de impressão.

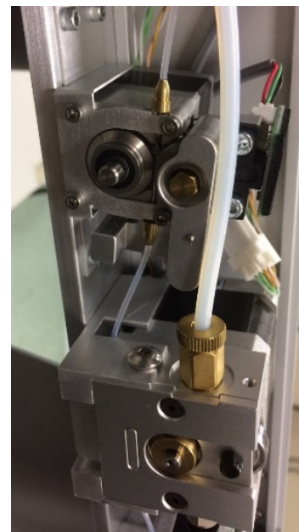
Alguns sistemas utilizam o alimentador solidário com o elemento de aquecimento e com o bocal. Desta forma o material sai da alimentação começa logo a ser fundido. No entanto, o peso do alimentador é bastante superior ao peso dos outros dois componentes referidos fazendo com que a

massa do conjunto aumente bastante, diminuindo a velocidade do processo de deposição. O método encontrado para resolver este problema é fixar o alimentador à estrutura da máquina, deixando o elemento de aquecimento e o bocal a funcionar como cabeça de impressão. Mas como é necessária força para que a fusão do material seja contínua e regular, um tubo oco e de maior rigidez que o filamento é introduzido no sistema para servir de ligação entre a extrusora e os outros dois elementos. O contratempo do uso deste componente, chamado de cabo de *Bowden*, é o atrito que surge entre o filamento e o tubo, que pode introduzir forças maiores no material, limitando o processo.

Na Figura 2.10 pode observar-se os dois tipos de sistema. Na Figura 2.10 (a) o sistema tem alimentador na cabeça de deposição e na Figura 2.10 (b) estão representados dois alimentadores fixos na estrutura da máquina.



(a)



(b)

Figura 2.10 – Posicionamento do alimentador. (a) Solidariamente com o elemento de aquecimento e bocal.

(b) Fixo à estrutura com recurso ao cabo de *Bowden*.

2.3.5. Elemento de aquecimento

Para fundir o material é necessário um elemento de aquecimento que, geralmente, é constituído por um bloco de metal com boa condutividade térmica e maquinado de modo a permitir a passagem do filamento por dentro deste. Para aquecer este bloco de metal pode ser utilizada uma bobina de aquecimento em volta deste. Outra solução implica maquinar o bloco para permitir introduzir, dentro deste, resistências elétricas (Turner *et al*, 2014). É importante controlar a temperatura com um sensor, pois este é um fator determinante no fabrico de uma peça. Um mau controlo de temperatura pode implicar que se obtenha uma peça de baixa resistência mecânica ou com erros geométricos elevados.

2.3.6. Bocal

A altura da camada do material depositado é, em grande parte, limitada pela abertura do bocal (ou *nozzle*) utilizado, que também condiciona as dimensões da peça que se pretende fabricar. Este componente é colocado de seguida ao elemento de aquecimento para poder alterar o diâmetro ao filamento enquanto o material está fluido. Deste modo as forças necessárias para o processo são menores. Tal como se pode observar na Figura 2.11, o interior do *nozzle* é um furo maquinado que começa por ter o diâmetro do filamento utilizado, na parte superior, identificado por I. Em seguida, na

zona II esta dimensão vai diminuindo gradualmente, através de uma superfície cónica, até atingir um diâmetro típico que varia entre $200\ \mu\text{m}$ e $500\ \mu\text{m}$ que se mantém na zona III até à saída (Turner *et al*, 2014).

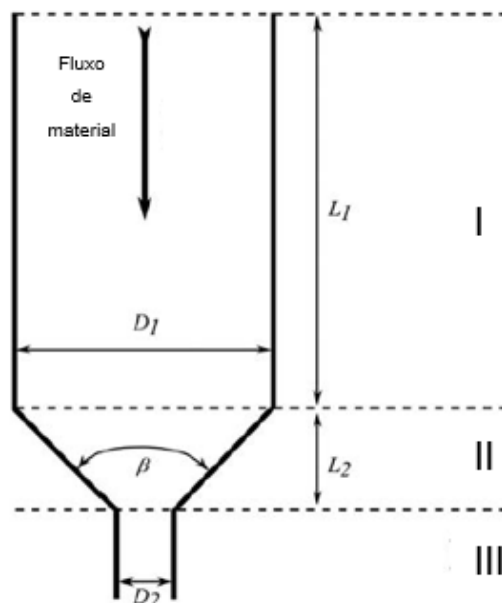


Figura 2.11 – Representação da estrutura de um bocal utilizado em FDM. Adaptado de (Turner *et al*, 2014).

2.3.7. Cabeça de impressão

A cabeça de impressão, tal como referido anteriormente, é o conjunto de todos os elementos solidários com o bocal. Como é deste último que o material é expelido e depositado, a cabeça de impressão está conectada a sistemas que a permitam movimentar nas direções (x, y e z) para que foi projetada.

Os dois componentes que pertencem obrigatoriamente à cabeça de impressão são o bocal e o *hot end*, pois o melhor funcionamento destes dá-se quando estes são fixos e seguidos um ao outro. Tal como foi referido no capítulo 2.3.4, o conjunto da alimentação também faz parte da cabeça de impressão em muitos sistemas, embora também haja muitas máquinas que optem pela solução do cabo de *Bowden*.

O último elemento que é bastante comum nos sistemas de FDM é um ventilador posicionado à saída do bocal para garantir a solidificação do material em cerca de 3 segundos (Sun *et al*, 2008).

2.3.8. Estrutura

Duas das necessidades que este trabalho tenta satisfazer no projeto da estrutura de uma máquina de FDM são: a diminuição do tempo de fabrico; e o aumento da precisão do processo. Habitualmente, para diminuir o tempo de fabrico aumenta-se a velocidade de impressão e, conseqüentemente, provocam-se acelerações maiores nos elementos móveis da mesma; isto obriga a aumentar a rigidez da estrutura. Da mesma forma, para garantir a precisão é necessário limitar as deformações da estrutura, o que reforça a necessidade de garantir a rigidez da estrutura. Esta abordagem estará presente neste trabalho mas será complementada com novos conceitos conforme se verá adiante.

Quanto ao controlo das cabeças de impressão, há quatro tipos de mecanismos utilizados nas máquinas de FDM com vantagens e desvantagens comparativas entre estes.

Os sistemas cartesianos (Figura 2.12 (a)) são o tipo de sistemas mais comercializados e mais simples de programar, visto os programas CAD/CAM também utilizarem estas coordenadas nos modelos que darão origem às peças.

Para acelerar o processo surgiu um sistema que utiliza um robot Delta (Figura 2.12 (b)) que também funciona em coordenadas cartesianas, mas que sacrifica um pouco a qualidade da peça fabricada. Utiliza uma mesa de impressão circular e fixa à estrutura da máquina e o movimento da cabeça de impressão, em “x”, “y” e “z”, é garantido por 3 braços unidos a uma cabeça de impressão articulada e unidos a um atuador linear vertical na outra ponta destes.

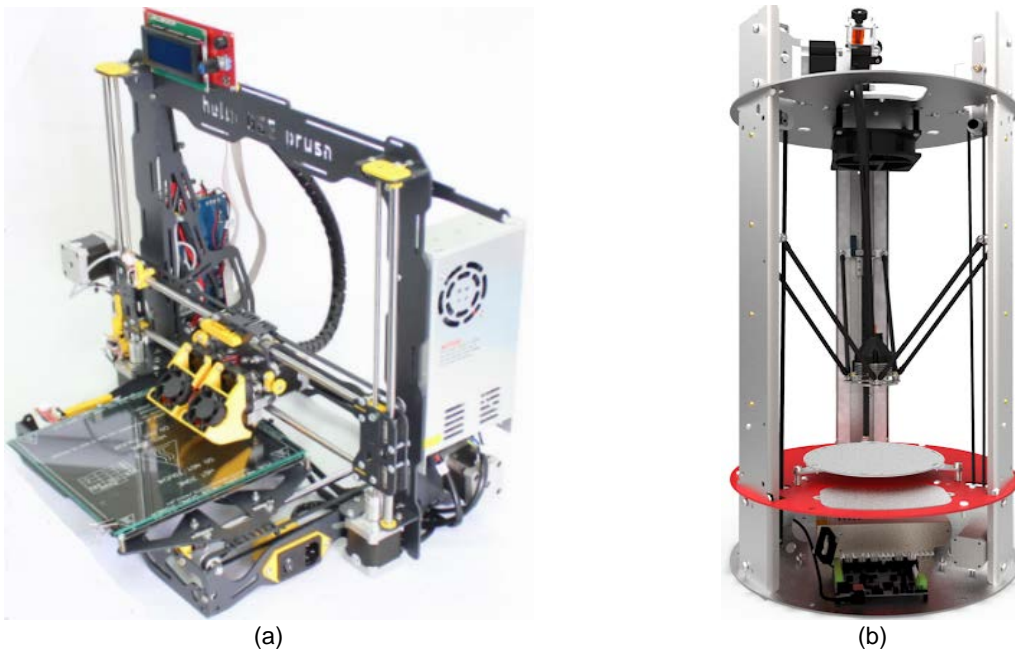


Figura 2.12 – Exemplo de sistemas de coordenadas cartesianas de FDM. (a) Sistema linear. Retirado de <http://goo.gl/LyEfTy>. (b) Sistema de robot Delta. Retirado de <http://goo.gl/DLFiVF>.

Tal como foi referido na secção 2.3.1, existem sistemas que se baseiam em coordenadas polares. O sistema mais simples é referido simplesmente como sistema polar (Figura 2.13 (a)) e utiliza uma mesa giratória, para permitir que a cabeça de impressão atinja o ângulo definido pelo sistema CAM para a deposição do material, e utiliza uma cabeça de impressão que se move apenas verticalmente e numa direção radial para permitir uma distância variável ao centro da mesa.

Por fim, o último tipo de sistema comercializado, que também se baseia em coordenadas polares, utiliza o *Selective Compliance Assembly Robotic Arm* (SCARA) e uma mesa com movimento vertical. Tal como se pode observar na Figura 2.13 (b), o SCARA é constituído por dois braços articulados e rígidos. Numa das pontas, os braços são concêntricos e estão unidos à cabeça de impressão. Na ponta contrária os braços voltam a ser concêntricos, mas atuados em movimentos angulares em planos verticais, independentes um do outro.



(a)



(b)

Figura 2.13 - Exemplo de sistemas de coordenadas polares de FDM. (a) Sistema polar. Retirado de <http://goo.gl/QW6xmi>. (b) Sistema de SCARA. Retirado de <http://goo.gl/cFUInI>.

Outro problema habitual neste tipo de equipamentos é a deformação das peças devido ao gradiente de temperatura. Este gradiente resulta da necessidade de o material ser depositado a uma temperatura próxima da de fusão, muito superior à atmosférica. Turner *et al* (2014) explicam que a solução aplicada em muitos sistemas comercializados hoje em dia para resolver este problema é o isolamento do espaço de fabrico. Este isolamento fecha o espaço de trabalho numa câmara com uma temperatura ainda superior à atmosférica: por exemplo, Gebhardt (2011) sugere 80 °C para o ABS. Ainda assim, durante o processo de solidificação, diferenças muito elevadas entre a temperatura do material e a temperatura do ar que o rodeia podem causar deformações na peça que a tornam inutilizável (Turner *et al*, 2014). Este problema é encontra-se ainda em estudo.

Anteriormente foi referido que o valor típico da largura e do comprimento da mesa de impressão destes sistemas é 200 mm em ambos, no entanto muitos objetos produzidos por outros métodos têm dimensões superiores. Para se produzir esses objetos por FDM, mas mantendo a precisão de objetos de menores dimensões, inicialmente, havia duas opções:

- Máquinas maiores, que também se comercializam, mas em que o tempo cresce linearmente com o volume (mantendo a mesma velocidade);
- Produzir a peça em várias partes e, no final, liga-las com um adesivo para obter o objeto pretendido, mas exigindo esta última operação adicional.

Zhu e Yu (2002) apresentam uma solução que permite controlar múltiplas cabeças de impressão independentes, que por sua vez podem conter múltiplos bocais. O controlo destas cabeças é feito de modo a evitar que estas colidam entre si e que a deposição de cada camada seja feita de forma intercalada nas zonas de ligação, como será explicado na secção 2.3.9. Utilizando um sistema de múltiplas cabeças é possível, no limite e dependendo das dimensões, fabricar uma peça "n" vezes

superior nas dimensões “x” e “y” a outra peça, no mesmo tempo que se fabricaria a menor, desde que se utilizem “n” cabeças de impressão.

2.3.9. Deposição e trajetórias

Cada camada é construída pela deposição de material segundo uma trajetória que se pode considerar constituída por vários caminhos:

- Os de contorno.
- Os de preenchimento, normalmente retilíneos e paralelos entre si.

À saída do bocal, o material que irá ser depositado tem uma secção igual ao formato do mesmo. No entanto, tal como refere Turner *et al* (2014), o material não está no estado sólido imediatamente à saída e a influência da força da gravidade, das tensões superficiais, da relação entre as velocidades de progressão e de alimentação e do tempo que o material leva até entrar em contacto com a camada anterior, ou seja, a altura a que é depositado, leva a que a secção do caminho seja diferente da inicial. Na fase de CAM essa alteração no formato do caminho pode ser tida em conta, variando o a distância entre os caminhos para que essa alteração não seja sentida na peça. Quando as características da deposição são ideais dá-se a melhor ligação entre caminhos possível (Figura 2.14 (b)). Se o material depositado arrefecer demasiado antes do contacto com os caminhos adjacentes, o caminho é considerado estreito (Figura 2.14 (a)) e a ligação apenas se dá nos topos e não nos lados, pondo em causa as propriedades mecânicas da peça final. Se, pelo contrário, o arrefecimento do material não for suficiente, o caminho fica demasiado largo (Figura 2.14 (c)) e um caminho que era suposto ser depositado ao lado de outro pode acabar por ficar depositado em cima do anterior, deformado a peça.

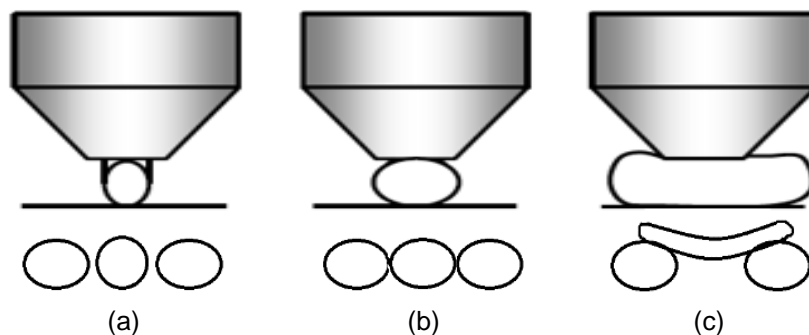


Figura 2.14 – Representação dos possíveis formatos de um caminho depositado e da sua interação com os caminhos adjacentes. (a) Caminho estreito. (b) Caminho ótimo. (c) Caminho largo. Retirado de Brooks *et al* (2013).

Tal como explicado por Sun *et al* (2008), o calor necessário para despoletar a ligação entre caminhos é fornecido pelo caminho mais recente, pelo que é necessária temperatura suficiente para fundir parcialmente o caminho anterior. Como está representado na Figura 2.15, este processo de ligação inicia-se com o contacto superficial ente dois caminhos, seguido do crescimento do *neck* e termina com a difusão molecular entre os caminhos. Quanto maior for o *neck* e maior difusão molecular houver, melhor é a ligação entre os caminhos e melhores propriedades mecânicas terá a peça.

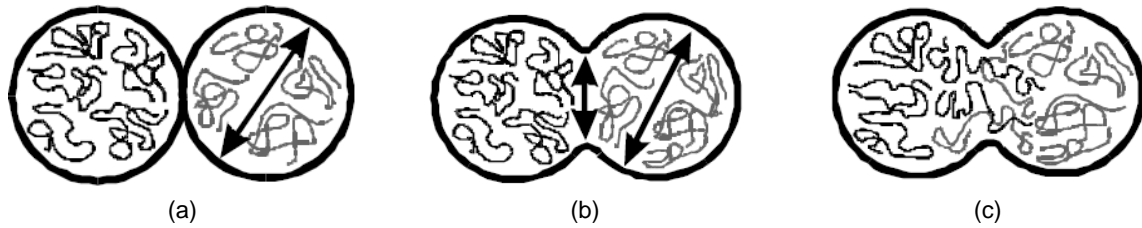


Figura 2.15 – Representação da ligação entre 2 caminhos. (a) Contacto superficial. (b) Crescimento do *neck*. (c) Difusão molecular. Adaptado de Sun *et al* (2008).

Para que este processo decorra da forma adequada, todos os parâmetros que o afetam devem ser cuidadosamente controlados. Nomeadamente a altura a que é depositado o material não deverá afastar-se do valor ideal, pelo que é necessário limitar rigorosamente a flecha máxima, pois a variação da flecha ao longo da trajetória traduz-se numa variação daquela altura.

A maioria dos equipamentos de FDM, por questões de simplicidade e de custo, utilizam controlo por anel aberto nos seus sistemas, ou seja, o percurso das cabeças de impressão é criado em CAM e é enviado para execução pela máquina independentemente da resposta da máquina. Isto significa que a máquina continua a tentar executar a deposição mesmo que tenha ocorrido um erro na execução.

Para sistemas com múltiplas cabeças de impressão com caminhos depositados por várias cabeças simultaneamente e independentemente, como o diâmetro de saída do bocal é bastante inferior às dimensões da cabeça de impressão, quer se estejam a fabricar várias peças simultaneamente ou apenas uma peça pode haver zonas onde as cabeças estas poderiam colidir. A solução para este problema foi sugerida por Zhu e Yu (2002) e consiste em incorporar no sistema de CAM um mecanismo de deteção de colisões que analisa o percurso que cada cabeça de impressão irá realizar e, se detetar que uma posição da área de trabalho irá ser ocupada por mais que uma cabeça de impressão no mesmo instante de tempo, introduz um atraso na deposição do caminho de uma das cabeças ou então sugere a deposição de um caminho que não crie conflitos, regressando ao primeiro posteriormente. O autor sugere ainda que no fabrico de uma peça por múltiplas cabeças, esta seja dividida em várias zonas virtuais que serão depositados apenas por uma cabeça, mas na fronteira de duas zonas deve haver uma pequena região que será depositada por ambas as cabeças, alternadamente, para garantir uma melhor ligação da peça.

3. Estado da arte

Os polímeros são materiais que estão incorporados na maioria dos produtos comercializados atualmente devido às suas propriedades mecânicas combinadas com o baixo custo destes e a facilidade de mudar a sua geometria para obter a peça que se pretende criar. Como tal, o processo de modelação por deposição fundida tem sofrido bastantes desenvolvimentos no sentido de aproximar este processo ao de injeção de polímeros em termos de qualidade da peça. Por outro lado, a redução do tempo de fabrico permitirá tornar o FDM competitivo com a injeção de polímeros para tamanhos de séries de produção cada vez maiores. Para além da produção para venda, e talvez com maior peso ainda, este processo tem sido desenvolvido para prototipagem rápida, como é exemplo a utilização de uma máquina da Stratasys no *Toyota Technical Center* para criar protótipos de peças automóvel que, segundo a marca, permite criá-los em menor tempo do que os processos que eram aplicados até então, envolve menores custos e a qualidade da peça final não difere muito da qualidade das peças utilizadas nos veículos produzidos (Chua *et al*, 2003). Também a Lamborghini afirma que a utilização de FDM na criação destes protótipos permitiu uma redução de 92% do custo e de 80% do tempo de fabrico na produção de um protótipo do Lamborghini Aventador (Stratasys, 2013)

Como foi referido atrás, a área de impressão utilizada na maior parte das máquinas tem um valor aproximado de 200 mm por 200 mm com uma altura do mesmo valor. No entanto, com a necessidade de criar peças de maior dimensão para produzir, por exemplo, para-choques de carros ou mesas, variados sistemas foram desenvolvidos para se poder criar peças de maior volume, mas comprometendo a qualidade da peça ou o tempo de fabrico.

Neste documento pretende-se estudar um sistema que permita aumentar o volume de produção de uma máquina ou aumentar o limite máximo de volume de uma peça a ser fabricada, mantendo a qualidade da peça final e sem aumentar proporcionalmente o tempo de fabrico. Neste sentido, será de seguida será apresentado o estado da arte deste tema, ou seja, processos e sistemas que tenham sido criados para solucionar o mesmo problema.

3.1. Sistemas com uma cabeça de impressão

O tempo de fabrico de uma peça é o somatório dos tempos de deposição de cada caminho, adicionado ao somatório dos tempos de movimento da mesa de impressão (caso existam) e somando ainda os tempos de deslocamento da cabeça de impressão entre o final de um caminho e o início de outro. Nenhum destes aumenta linearmente com a distância, visto haver acelerações e desacelerações, especialmente o tempo de deposição, pois o início desta dá-se com a cabeça de deposição parada, para dar tempo para extrudir o material, e o fim da deposição de um caminho também se dá com a cabeça de impressão parada para haver retração de material, evitando que haja deposições inesperadas.

Parte da solução para os tempos excessivos de fabrico passa por conseguir obter maiores acelerações e maiores velocidades dos mecanismos envolvidos no processo, no entanto também a extrusora tem de aumentar a sua velocidade de extrusão e o elemento de aquecimento tem de ser mais eficaz para fazer face aos aumentos de velocidade da cabeça de impressão.

Por mais veloz que seja o sistema, há limitações físicas para os aumentos de velocidade e aceleração e há também aumentos de custo que se revelam exagerados para algumas aplicações. Trabalhos realizados por Jin *et al* (2014) e Wah *et al* (2012) foram desenvolvidos no sentido de otimizar o percurso da cabeça de impressão para que o movimento desta seja aquele em que o tempo de posicionamento é menor e que tenha também em conta as acelerações e desacelerações. Apesar desta solução ser bastante importante e poder ser implementada na maioria dos sistemas CAM sem grandes custos, o tempo despendido no reposicionamento da cabeça de impressão não representa elevadas perdas no tempo total de fabrico na maioria das peças e, em alguns casos, este método pode implicar perdas de qualidade na peça final.

Iyibilgin *et al* (2014) analisa um método que está implementado em alguns sistemas, como por exemplo máquinas da Stratasys, para acelerar o fabrico de peças, chamado de enchimento esparso. Este conceito é especialmente em protótipos que não são funcionais. No entanto, para reduzir o material utilizado e o tempo de fabrico da peça, o enchimento escasso tem de levar em conta a impossibilidade de depositar uma camada sem ter material presente na camada anterior. Assim foi desenvolvido *software* que cria um percurso de deposição com maior precisão nos contornos, ou seja, no exterior da peça, e uma geometria prismática no interior da mesma, por exemplo semelhante a um favo de mel, como se pode observar na Figura 3.1.

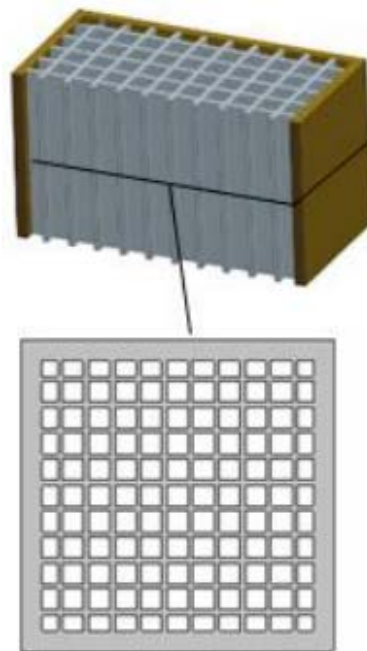


Figura 3.1 – Representação do método de enchimento esparso com caminhos interiores a 0° e 90° dos contornos. Adaptado de Iyibilgin *et al* (2014).

Por fim, a última abordagem que atualmente é tomada no sentido de acelerar o processo de fabrico é aumentar o caudal volúmico do material depositado. Tendo em consideração que o equipamento está a funcionar em plena capacidade, em termos de velocidade, e sabendo que o caudal volúmico é igual à multiplicação entre a velocidade e a área da secção, procede-se à substituição do *nozzle* por outro de maior diâmetro. A título de exemplo, numa peça em que se possa desprezar os tempos de reposicionamento da cabeça de impressão e da mesa de impressão, por serem reduzidos relativamente

ao tempo de deposição, se um bocal for substituído por outro com o dobro da área da secção, a peça criada com o segundo demora metade do tempo que demoraria uma peça igual criada com o primeiro. Contudo, se toda a peça fosse fabricada com este bocal o acabamento superficial e precisão geométrica da peça final seriam bastante piores, a capacidade de formar pequenos detalhes poderia ficar comprometida e seria necessário verificar o comportamento do material para diâmetros de extrusão muito maiores que os habituais.

Sabourin *et al* (1997) referem que trabalhos têm sido desenvolvidos desde 1994 para conjugar o método explicado no parágrafo anterior com um bom acabamento superficial. *Adaptive slicing* foi o nome dado a um processo também conhecido como “exterior preciso, interior rápido”. Utilizando um *software* que, para além de definir o percurso da cabeça de impressão, vai receber a informação do número de bocais presentes nesta e quais os seus diâmetros. Em seguida vai analisar a peça, dividindo-a em zonas cujos caminhos serão depositados pelo bocal de menor diâmetro, incluindo os caminhos exteriores, e caminhos que serão depositados pelos restantes bocais para preencher o interior, como se pode observar na Figura 3.2. Apesar de haver prejuízos nas propriedades mecânicas da peça, o exterior fica com um acabamento superficial bom e, através dos testes realizados por Sabourin *et al* (1997), nota-se diminuições do tempo de fabrico, em média, entre 50% e 80%.

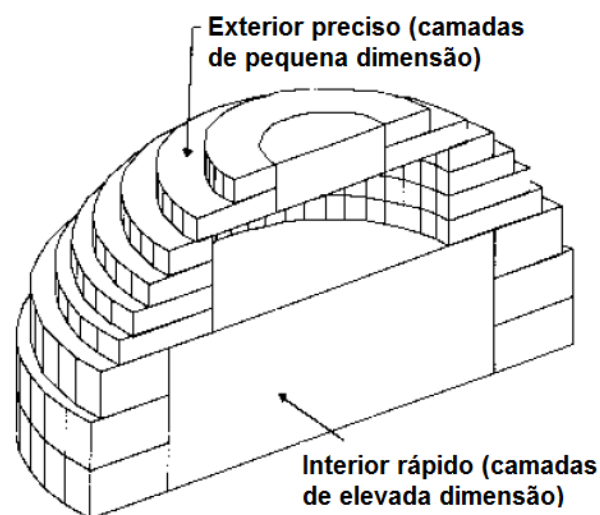


Figura 3.2 – Representação do método de *adaptive slicing*. Adaptado de Sabourin *et al* (1997).

Em termos comerciais, os sistemas com uma cabeça de impressão e que permitem fabricar peças com dimensões superiores às dimensões típicas de 200 mm x 200 mm x 200 mm que merecem mais destaque são:

1. BigRep One (Figura 3.3 (a)) – Este sistema tem uma cabeça de impressão com dois bocais e um espaço de impressão de 1005 mm x 1005 mm x 1005 mm, que não está isolado do exterior. O seu preço ronda os €36.000 (BigRep, 2016).
2. Leapfrog XceL (Figura 3.3 (b)) – Tal como o sistema anterior, esta máquina tem uma cabeça de impressão com dois bocais, mas difere no sentido do seu espaço de impressão, de 935 mm x 1033 mm x 2775 mm, ser isolado termicamente. O valor de venda é €22.499 (<http://www.lpfrog.com/en/xcel>).
3. Massivit 3D (Figura 3.3 (c)) – Esta máquina fabrica peças utilizando um processo proprietário da máquina, semelhante ao FDM, mas utilizando radiação ultravioleta para

proceder à cura do material. Tem um espaço de impressão de 1200 mm x 1500 mm x 1800 m, isolado do exterior (<http://goo.gl/asy2N5>). O preço deste equipamento é de €235.000.

4. Stratasys Fortus 900mc (Figura 3.3 (d)) – O preço desta máquina pode atingir os €665.000 pois utiliza o método de *adaptive slicing* para acelerar o processo. O seu espaço de impressão isolado termicamente corresponde a 914 mm x 610 mm x 914 mm (<http://goo.gl/DdbQgj>).

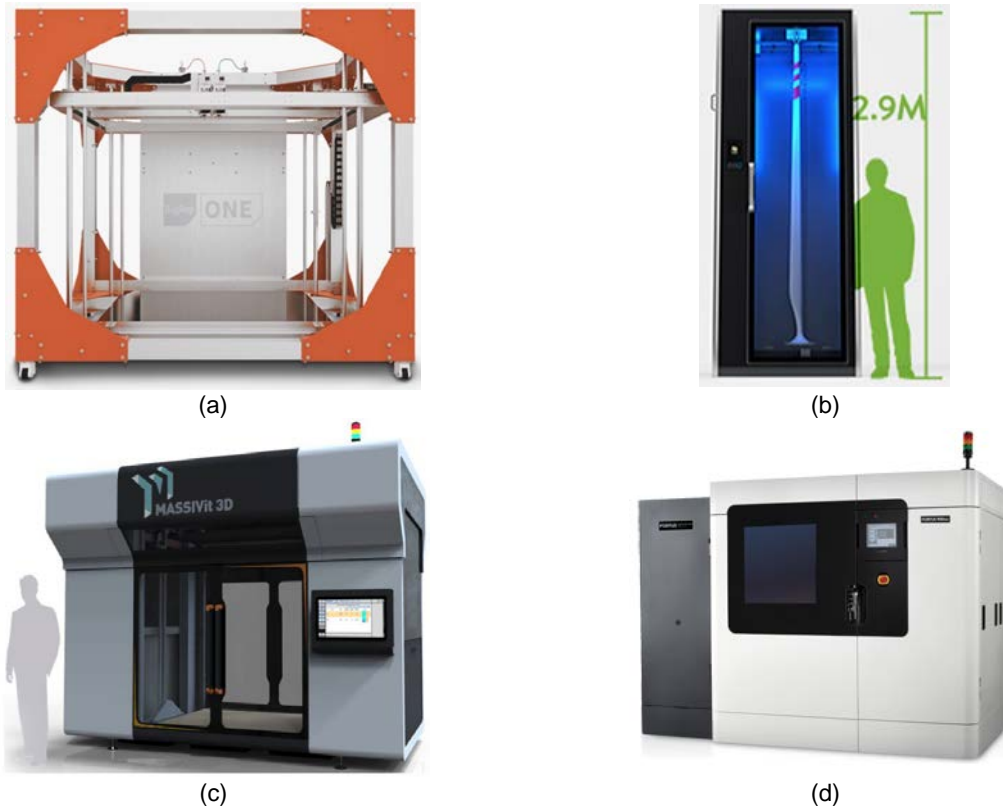


Figura 3.3 – Sistemas FDM de grandes dimensões. (a) BigRep One. Retirado de <http://goo.gl/64dcJW>. (b) Leapfrog XceL. Retirado de <http://www.lpfrog.com/en/xcel>. (c) Massivit 3D. Retirado de <http://goo.gl/asy2N5>. (d) Fortus 900mc. Retirado de <http://goo.gl/DdbQgj>.

3.2. Sistemas com múltiplas cabeças de impressão

Para se poder classificar uma máquina como um sistema com múltiplas cabeças de impressão, esta tem de ser capaz de controlar simultaneamente 2 ou mais cabeças de impressão. Estas podem ser independentes uma da outra ou podem trabalhar solidariamente. Pode ser fabricada uma peça com múltiplas cabeças de impressão ou fabricadas várias peças com várias cabeças de impressão. O funcionamento destes sistemas é semelhante ao funcionamento dos sistemas com apenas uma cabeça de impressão, pelo que os métodos para acelerar o processo explicados na secção 3.1 podem ser utilizados, sem condicionamentos, nestes sistemas. Obviamente, em sistemas com múltiplas cabeças de impressão terá de haver um mecanismo para evitar colisões entre as mesmas durante a impressão. Este mecanismo poderá ser realizado mecanicamente, no caso de múltiplas cabeças de impressão solidárias, ou através de controlo, no caso de múltiplas cabeças de impressão independentes.

Zhu e Yu (2002) propõem um sistema que permite fabricar uma peça com duas cores, ou seja, dois materiais. A sua abordagem não inclui uma cabeça de impressão com dois bocais, mas sim duas cabeças de impressão independentes. Este método, apesar de ser mais complexo, pode trazer vantagens, nomeadamente no tempo de fabrico, pois uma cabeça de impressão apenas permite depositar um caminho de cada vez, enquanto que com duas cabeças de impressão pode depositar-se dois simultaneamente. Para se implementar este modelo todas as cabeças de impressão terão de poder depositar material em todos os pontos da mesa de impressão da máquina. O *software* de controlo cria primeiro o percurso de deposição das cabeças de impressão, e de seguida analisa em todos os instantes se a distância entre as cabeças de impressão é inferior à soma dos raios de ambas. Um resultado positivo dessa análise significa que haveria colisão entre ferramentas, pelo que o programa define um novo ponto de partida das cabeças de impressão para que a deposição seja contínua e sem colisões.

Choi e Zhu (2010) propõem outro método para gerar trajetórias. Este método envolve maiores custos por necessitar de ser feito em controlo por anel fechado, ou seja, a informação sobre o posicionamento das cabeças de impressão é transmitida constantemente para o controlo ser realizado. Os mesmos autores sugerem uma hierarquia de prioridade entre cabeças de impressão para evitar as colisões. Este método, à semelhança do método anterior, tem em conta que todas as cabeças de impressão possam depositar em qualquer ponto da mesa de impressão, mas o planeamento do percurso não tem em conta as possíveis colisões. Isto é resolvido analisado cada caminho a ser depositado, imediatamente antes de ser depositado. Sempre que as cabeças de impressão chegam ao fim da deposição de um caminho, o *software* analisa o percurso que irá ser percorrido por todas as cabeças de impressão na deposição da próxima camada. Se for detetada uma possível colisão, a cabeça que se for a mover com mais velocidade, entre as que poderão entrar em conflito, fará o seu percurso como planeado e as restantes ficaram paradas até a primeira terminar a sua deposição.

Espalin *et al* (2014) sugere resolver o problema de uma maneira mais simples em termos de controlo, mas que envolve mais mecanismos e maiores custos. Em primeiro lugar, divide-se a máquina em 2 partes, a parte superior que contém a cabeça de impressão e a parte inferior que contém a mesa de impressão. As cabeças de impressão são colocadas em série numa direção de impressão, sendo que não partilham o espaço de movimentação das restantes cabeças. Desta forma é a peça que se desloca entre cabeças de impressão dependendo do material a depositar. Este método não é eficaz para obter menores tempos de fabrico, mas sim para poder fabricar uma peça com diferentes materiais ou depositar caminhos com várias espessuras. Para além deste aspeto, existe muito tempo perdido na movimentação da base entre cabeças de impressão.

Noutro estudo, Wachsmuth (2008) propõe a estrutura de uma máquina de FDM de múltiplas cabeças assim como um *software* para evitar colisões entre estas. No seu modelo, as cabeças de impressão não são capazes de depositar em todos os pontos da mesa de impressão. Cada uma das cabeças de impressão é responsável por uma divisão da mesa onde depositará o seu material. Como a ligação de dois caminhos não é tão resistente como um caminho, visto a área da secção do primeiro ser inferior à do segundo, Wachsmuth (2008) propõe que a zona de impressão de uma cabeça tenha uma zona de área mais reduzida onde as cabeças adjacentes também possam trabalhar, o que permite

que a zona de ligação entre diferentes zonas da mesma peça depositadas por cabeças diferentes não seja uma linha. Isto obriga a que esta seja uma zona de área retangular que, em camadas alternadas, será depositada por cabeças diferentes, como se pode observar na Figura 3.4 (a). Devido a este fato, as zonas de deposição de cada cabeça ficam divididas numa zona individual, onde apenas a cabeça de impressão consegue depositar material, e numa zona partilhada, a vermelho na Figura 3.4 (b), que permite deposição de material das cabeças de impressão adjacentes. A estrutura proposta pelo autor permite a utilização de, no máximo, nove cabeças de impressão, visto todas terem um formato diferente para que o material possa ser depositado numa localização exterior aos elementos que a suportam. O método de prevenção de colisões é semelhante ao proposto por Zhu e Yu (2002), mas neste caso o fator que faz alterar o ponto de início de deposição de um caminho é o posicionamento de uma cabeça de impressão ser, num dado instante, na sua zona partilhada e uma cabeça de impressão adjacente também se vir a encontrar, nesse mesmo instante, nessa zona.

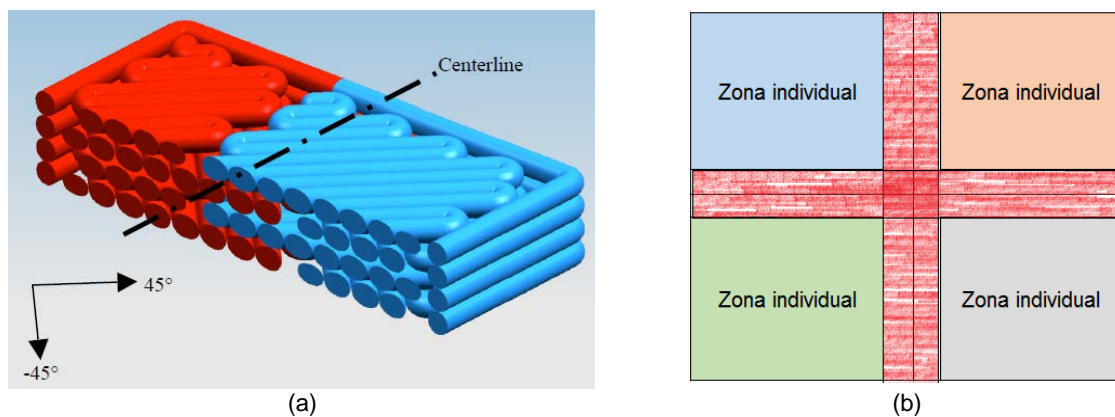


Figura 3.4 – (a) Representação de ligação de zonas da peça feita de forma alternada. Retirado de Wachsmuth (2008). (b) Ilustração da divisão em zonas individuais e zonas partilhadas proposta por Wachsmuth.

Atualmente não se comercializa nenhum sistema com múltiplas cabeças que se centre em acelerar o tempo de fabrico de uma peça, mas sim aumentar o volume de produção, permitindo fabricar peças semelhantes simultaneamente. Os dois sistemas que merecem mais destaque são a Beast da Cultivate 3D (<https://goo.gl/Llxf19>), representada na Figura 3.5 (a), e a Stacker 500S (<https://goo.gl/ldsJU6>), representada na Figura 3.5 (b). Ambos os sistemas permitem o fabrico de, no máximo, 4 peças iguais simultaneamente através de 4 cabeças de impressão que trabalham solidariamente.

Apesar de não serem comercializados, há sistemas de FDM com múltiplas cabeças que permitem a utilização destas para fabricar apenas uma peça, diminuindo assim o tempo de fabrico desta. Estes sistemas estão protegidos como propriedade intelectual.

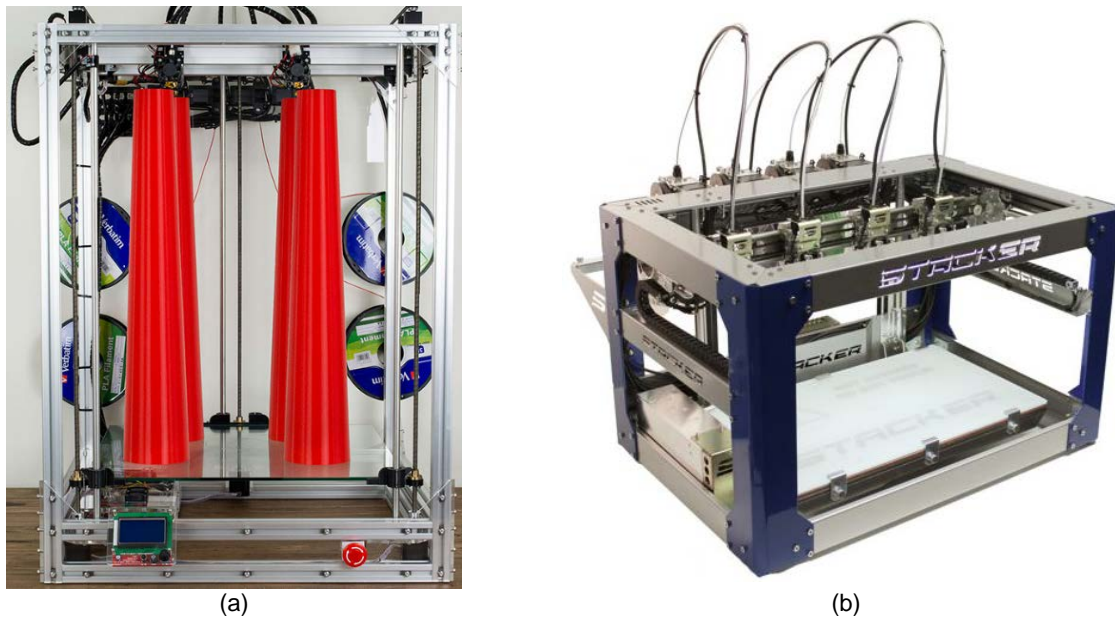


Figura 3.5 - Sistemas FDM de múltiplas cabeças. (a) Beast. Retirado <https://goo.gl/LIxfI9>. (b) Stacker 500S. Retirado de <https://goo.gl/ldsJU6>.

Em Zhang (2015) é protegido um sistema que permite fabricar uma peça com várias cabeças de impressão ou várias peças diferentes. As cabeças de impressão estão ligadas a um carril que lhes permite fazer um movimento paralelo a este e independente entre cabeças de impressão. Este carril, por sua vez, está fixo perpendicularmente a um veio vertical que permite que as cabeças tenham um movimento de rotação, tornando este sistema um de coordenadas polares. A grande desvantagem deste sistema é o espaço ocupado pelo veio vertical, que não irá permitir que duas cabeças posicionadas a 180° uma da outra fabriquem uma peça que não tenha um furo no meio, visto este espaço ter de ser ocupado pelo eixo da máquina (Figura 3.6 (a)).

Em Wang (2015) é patenteado um sistema que permite ter n cabeças de impressão, onde todas podem depositar material em todos os pontos da mesa de impressão, exceto no espaço ocupado pelas cabeças posicionadas ao lado da cabeça em questão. A saída dos bocais é coplanar entre todos, mas a sua altura aumenta progressivamente para permitir que os elementos que movimentam as cabeças de impressão estejam posicionados num plano superior uns dos outros. O controlo necessita de ser feito em anel fechado para evitar as colisões das cabeças (Figura 3.6 (b)).

Em último lugar, Uzan e Yakubov (2015) registaram em patente um sistema que também permite realizar uma peça utilizando várias cabeças de impressão. As cabeças de impressão são movimentadas por um fuso e orientadas por uma guia. Neste sistema é apenas possível utilizar dois conjuntos fuso guia, paralelos entre si e ao eixo “x”, enquanto as cabeças de impressão são movimentadas em “y” por outro fuso, perpendicular aos anteriores. Os fusos dispostos segundo “y” estão unidos a apenas uma guia, de tal forma que seja possível movimenta-los segundo “x”. Esse movimento é garantido por um mecanismo que pode ser acionado de modo a que o fuso que garante o movimento em “x” não tenha influência sobre a cabeça de impressão (Figura 3.6 (c)).

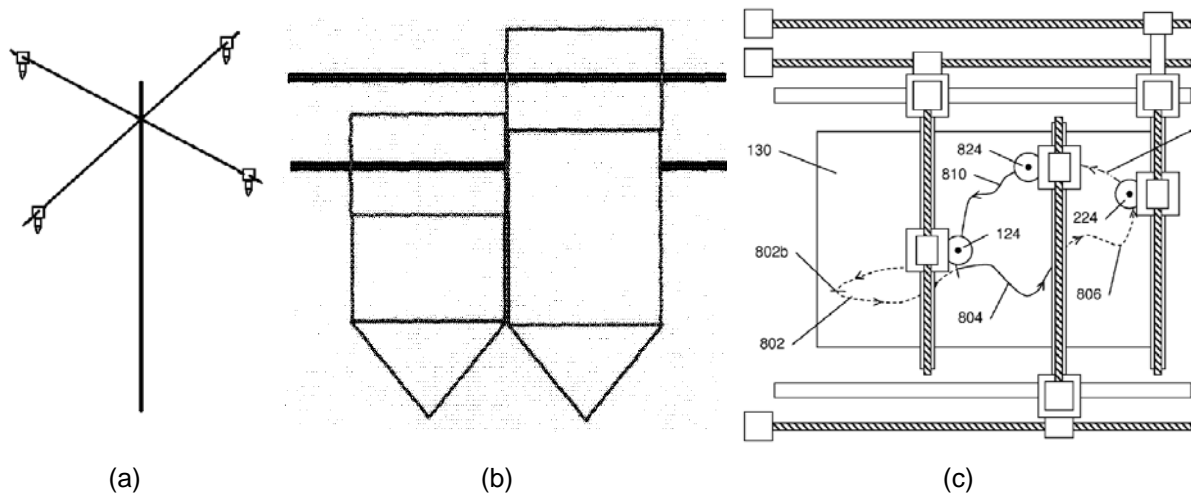


Figura 3.6 – Mecanismos protegidos por: (a) Zhang (2015); (b) Wang (2015); e (c) Uzan e Yakubov (2015).

Tendo em conta todos os sistemas discutidos anteriormente, a necessidade de se poder fabricar por FDM peças de elevadas dimensões com eficiência (com o tempo a ser um fator determinante) não é completamente satisfeita. Comercialmente não existe nenhum sistema que permita conjugar reduzidos tempos de fabrico com elevada qualidade de fabrico e elevada dimensão máxima de fabrico e, embora o sistema protegido por Uzan e Yakubov (2015) permita, em teoria, produzir peças de dimensões infinitas, na prática, o módulo de *Young* inerente aos materiais não permite que a conjugação dos 3 fatores referidos atrás seja alcançada sem elevados custos. Por estas razões, a criação de um sistema que permitisse obter a melhor qualidade alcançável em sistemas de FDM no fabrico de peças sem limite de dimensões e sem elevados aumentos de tempo de fabrico e que não dependesse de aumentos de custo desproporcionais ao aumento de volume da peça a fabricar introduzia uma inovação no mercado que traria grandes vantagens nos processos de AM.

4. Estrutura, componentes e funcionamento

Para ser possível implementar o sistema de controlo das múltiplas cabeças de impressão é necessário projetar uma máquina de FDM composta por mesas de impressão, sistemas de movimentação das cabeças e das mesas de impressão e ainda a estrutura deste sistema, resultando numa máquina que seja competitiva tanto a nível de processo como a nível económico. Com esse objetivo, a partir do modelo de Frutuoso (2016), procedeu-se às alterações necessárias ao mesmo, de modo a criar um sistema de fabrico aditivo modular.

4.1. Considerações iniciais

Frutuoso (2016) desenvolveu um programa para gestão de trajetórias numa máquina com múltiplas cabeças de impressão independentes. Este programa recebe informação sobre a peça pretendida no formato .svg, onde esta já se encontra dividida em camadas bidimensionais e inclui também a informação sobre a deposição do material de suporte. Esta informação será processada e será determinado, em primeiro lugar, o número de cabeças que permite obter o tempo de fabrico mais rápido. Em seguida, será analisada a posição e orientação desta na mesa de impressão que melhor permite utilizar os recursos disponíveis e que, mais uma vez, garante o melhor tempo de produção. Depois a camada da peça será dividida em regiões, que serão alocadas a cada cabeça de impressão. Em quarto lugar, o tempo do melhor percurso de deposição será calculado, tendo em conta que os caminhos do interior da peça serão depositados paralelamente entre si. Por fim, será feita uma análise de possíveis colisões entre cabeças de impressão e, caso o resultado seja positivo, novos percursos de deposição serão encontrados.

Este sistema de múltiplas cabeças de impressão, por permitir fabricar uma peça através da deposição dos vários caminhos por parte de diversas cabeças, necessita de garantir boas ligações entre as várias zonas depositadas e, para tal, vai seguir o método similar ao proposto por Wachsmuth (2008), onde existem zonas partilhadas por cabeças de impressão adjacentes. Áreas de impressão retangulares possibilitam que haja esta interseção e resultam numa área de impressão total maior do que no caso de áreas de impressão circulares. Tal como se pode observar na Figura 4.1, quatro áreas de impressão de dimensões 10 mm x 10 mm e com uma interseção de 0,5 mm x 0,5 mm entre estas resultam numa área de impressão total de 19,5 mm x 19,5 mm, enquanto quatro áreas de impressão circulares de diâmetro 10 mm e com uma interseção entre estas igual à anterior resultam numa área de impressão total que tem uma largura e um comprimento máximos de 17,24 mm. Daqui resulta que o conceito de robot Delta (recordar Figura 2.12) se mostra ineficiente em relação aos sistemas lineares.

Frutuoso (2016) refere também que o utilizador da máquina deve poder escolher o número de cabeças de impressão que estão dispostas segundo “x” e segundo “y”. Frutuoso (2016) limita a área de impressão a 200 mm x 200 mm. No entanto, a arquitetura definida permite aumentar essa área de impressão visto que se permite depositar material em “y” em todo o comprimento da máquina, estando limitado pelas dimensões dos componentes desta e da cabeça de impressão e também pelas dimensões das cabeças de impressão adjacentes à primeira.

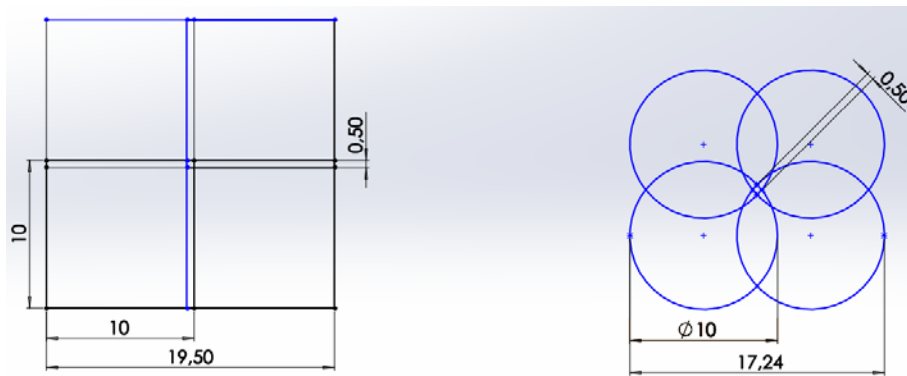


Figura 4.1 – Área de impressão resultante de áreas de impressão retangulares e circulares, com zonas partilhadas. Dimensões em mm.

4.2. Plataforma de impressão

As cabeças de impressão depositam o material da mesma peça em zonas diferentes, exceto nas zonas compartilhadas, onde há deposição de material na mesma zona por várias cabeças, em camadas alternadas. Para além desse fato, o limite da zona de deposição de cada cabeça de impressão ultrapassa o limite das zonas das cabeças de impressão adjacentes. Estas cabeças de impressão, independentemente dos componentes que as compoñham, têm dimensões sempre superiores ao diâmetro dos caminhos depositados, o que implica que os bocais destas tenham de ser coplanares durante todo o fabrico, para garantir que não há colisão destes com o material já depositado. Como estas cabeças serão independentes entre si, é mais vantajoso garantir o movimento em “z” através da mesa de impressão.

Em grande parte dos sistemas de apenas uma cabeça de impressão comercializados, a mesa é atuada por um fuso vertical e a sua precisão é garantida por guias lineares verticais posicionadas junto a esta, tal como apresentado na Figura 4.2. Ao aumentar o volume de impressão, é possível aumentar apenas a altura máxima da peça que se pretende fabricar. O aumento da largura e do comprimento da máquina com o intuito de aumentar o volume máximo da peça a ser fabricada implica que, por sua vez, a largura e o comprimento da mesa de impressão tenha de aumentar. Apoiar a mesa de impressão apenas nos seus extremos causa deflexões no centro desta e, embora em mesas de pequenas dimensões estas deflexões sejam desprezáveis, o valor destas aumenta com o aumento do seu tamanho. Para solucionar este problema pode aumentar-se o momento de inércia de área da mesa, aumentando a sua espessura, aumentar o seu módulo de elasticidade, mudando o material, ou introduzir apoios em zonas interiores da mesa de impressão. A primeira solução implica aumento da massa da mesa de impressão, para além do aumento de massa proveniente do maior volume de material depositado, que obriga à introdução de motores com mais binário, aumentando o custo. Para aumentar a rigidez por via do material, os aumentos de custo também seriam bastante elevados pois os materiais com essas características são mais caros. Por fim, colocar apoios em zonas interiores da mesa torna-se complicado, pois a mesa de impressão tem um movimento vertical, o que implica colocar guias verticais a atravessar esta. No entanto, estas guias impediriam o fabrico de uma peça que ocupasse o total da largura e comprimento da mesa de impressão, visto haver elementos fixos no interior do volume de impressão.

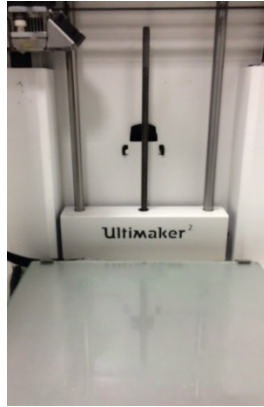


Figura 4.2 - Exemplo do fuso e das guias lineares de uma mesa de impressão.

Em vez de apoios ou de guias, é possível colocar atuadores lineares na parte inferior da mesa para oferecer reação à força provocada na mesa, impedindo elevadas deflexões e permitindo utilizar toda a sua área para depositar material.

A opção tomada para a plataforma de impressão foi a utilização dos vários atuadores lineares sob esta plataforma. A plataforma de impressão foi dividida em mesas de impressão de 200 mm por 200 mm, à semelhança dos sistemas mais simples, cada uma com um atuador e com guias lineares colocados na parte inferior destas, o que as torna independentes. Cada uma tem um movimento segundo o eixo “z” que não tem de ser nem simultâneo nem no mesmo sentido que o das restantes. Isto permite que, se a peça a ser fabricada necessitar de mais de uma mesa de impressão, estas possam funcionar solidariamente, e também que se fabriquem peças diferentes sobre diversas mesas sem que o movimento segundo o eixo “z” seja simultâneo, podendo até iniciar-se o fabrico de novas peças no decorrer do fabrico de outras, desde que haja pelo menos uma mesa e uma cabeça de impressão livres. Outra vantagem que surge deste mecanismo inovador é no caso de haver peças com zonas suspensas, onde se pode aproveitar uma diferença de alturas de duas mesas de impressão para reduzir a utilização de material de suporte. Desde que a estrutura o permita, será possível adicionar e remover estas mesas para obter as dimensões e geometria pretendidos da plataforma de impressão final.

4.3. Cabeças de impressão

Existem duas opções possíveis para as cabeças de impressão. A primeira utiliza o cabo de *Bowden* para unir o alimentador ao elemento de aquecimento. A segunda corresponde a colocar o alimentador acoplado ao elemento de aquecimento, tal como se pode observar na Figura 2.10. A utilização do cabo de *Bowden* revela-se a melhor abordagem pois permite que a massa da cabeça de impressão seja menor e, portanto, se atinjam velocidades mais elevadas do que no segundo caso.

No entanto, para além da deposição de material no fabrico de uma peça, em certos casos é necessário utilizar material de suporte, o que implica que este tenha de ser removido depois do fabrico da peça. Para isso é necessário utilizar uma cabeça de impressão constituída por dois bocais. Deste modo, é possível utilizar material solúvel para material de suporte e também possível utilizar material insolúvel, mas de uma cor diferente, para facilitar o processo de remoção. Fabrico de peças com dois materiais diferentes é também possibilitado por este método.

A opção passa então por selecionar as cabeças de impressão deste sistema, que serão constituídas por 2 conjuntos com um *nozzle*, um elemento de aquecimento, um ventilador para arrefecer este e um ventilador para arrefecer o material depositado.

4.4. Componentes e funcionamento

A estrutura da máquina que se pretende desenvolver neste documento tem como função suportar os vários subsistemas que a compõem. Como se pretende fabricar peças com uma dimensão maior que as dos sistemas atuais, a estrutura deverá ter as dimensões que permitam o fabrico de uma peça desejada e, da mesma forma, pretende-se que os seus vários subsistemas sejam reconfiguráveis.

Adicionando aos vários tamanhos que as peças podem ter, também diversos formatos caracterizam estas. Se, por exemplo, a peça que se pretende fabricar tiver a forma de “U” de uma espessura reduzida, é mais vantajoso depositar o material de tal modo que a espessura da peça esteja alinhada com o eixo “z” da máquina (Figura 4.3 (d)), para se evitar perdas de tempo com o movimento da mesa de impressão. No entanto, uma peça com este formato implica que a área de impressão não seja completamente utilizada, pois a abertura no meio da peça significa que não há necessidade de deposição de material nessa zona. Por essa razão projeta-se as mesas de impressão para poderem ser adicionadas ou removidas em qualquer altura.

O utilizador pode apenas utilizar as mesas de impressão que satisfazem o formato das peças que se pretende fabricar, reduzindo assim os seus custos na compra do equipamento. Na Figura 4.3 estão representados diversos posicionamentos da peça a fabricar que irão afetar os tempos de fabrico, não utilizando material de suporte. Na Figura 4.3 (a) o objeto está posicionado em “U” e o tempo de fabrico, obtido para certas condições e utilizando o *software* Cura (<https://goo.gl/pGTuSn>), foi calculado como sendo de 59 minutos. O “U” invertido da Figura 4.3 (b) terá um tempo de fabrico de 60 minutos. Na Figura 4.3 (c) a peça tem o posicionamento de um “U” deitado e o tempo de fabrico é igual a 63 minutos. Finalmente, com a espessura alinhada com o eixo “z” da máquina, o caso da Figura 4.3 (d) tem o tempo menor, sendo este de 55 minutos, confirmado a afirmação inicial. Contudo, apesar do posicionamento em “U” deitado ter uma altura menor que os casos das Figura 4.3 (a) e (b), por ter camadas cujo material depositado tem uma quantidade reduzida, o tempo de fabrico é superior pois a cabeça de impressão necessita de estar constantemente a iniciar e interromper o movimento.

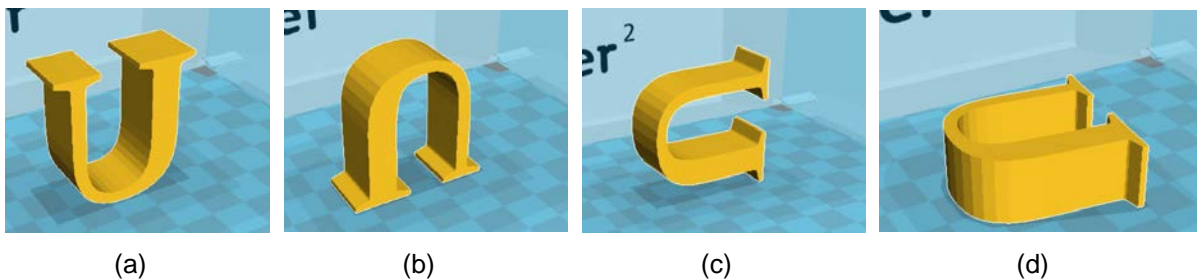


Figura 4.3 – Representação de vários posicionamentos de fabrico de uma peça. (a) Posicionamento em “U”. (b) Posicionamento em “U” invertido. (c) Posicionamento em “U” deitado. (d) Posicionamento com a espessura alinhada com o eixo “z” da máquina.

Para garantir a eficiência do processo é necessário alocar, no mínimo, uma cabeça de impressão por cada mesa de impressão. Se a geometria da peça o permitir, como por exemplo um anel

de secção quadrangular, é possível fabricar uma peça n vezes maior que uma peça fabricada numa máquina típica com um volume de impressão de 200 mm x 200 mm x 200 mm no mesmo exato tempo, com apenas uma cabeça de impressão por cada mesa. Na Figura 4.4 esta situação dá-se quando $m = n$. Em peças mais complexas haverá perda de eficiência. Se o número de cabeças for superior ao número de mesas ($m > n$) é possível atingir menores tempos de fabrico, até um ponto onde o número de cabeças de impressão atrasa o processo devido às possíveis colisões. Se se der o caso contrário ($m < n$), o tempo de fabrico será sempre superior ao da peça de menores dimensões fabricada numa máquina de uma cabeça.

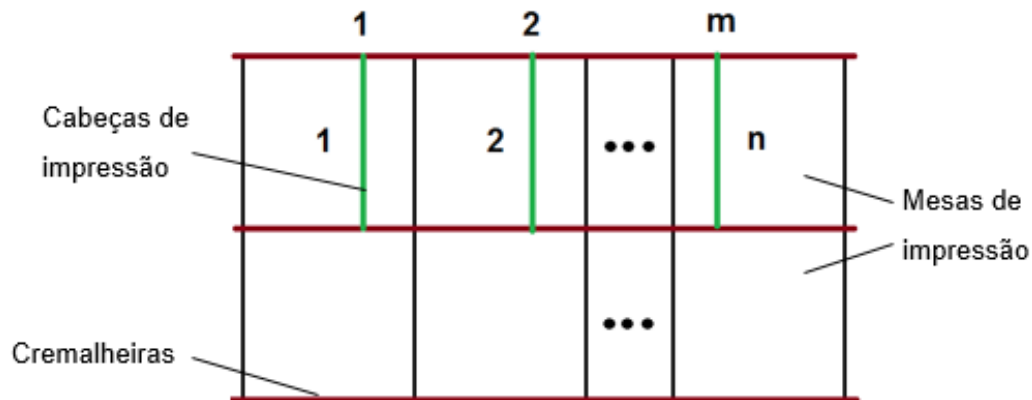


Figura 4.4 - Esquema representativo do número de mesas e cabeças de impressão.

Fruitoso (2016) definiu que o número de cabeças de impressão dispostas segundo “x” e segundo “y” devem poder ser escolhidas pelo utilizador o que permite que este possa adaptar e alocar as cabeças de impressão segundo as suas necessidades e segundo as mesas de impressão, o que torna este sistema reconfigurável. No entanto, estas têm de garantir uma boa precisão, independentemente da sua posição, enquanto permitem que se deposite material nas zonas adjacentes à sua área de impressão. Como se definiu que é preciso, pelo menos, uma cabeça de impressão por cada mesa de impressão para haver vantagens neste processo, cada cabeça de impressão tem de possibilitar deposição numa área um pouco superior à área da base de impressão. Como todas as cabeças de impressão serão iguais e como as bases são quadradas, a área de impressão de cada cabeça será retangular, com os seus lados paralelos aos lados da mesa de impressão. As dimensões da área de impressão de cada cabeça serão superiores às dimensões da mesa de impressão no valor da dimensão da zona compartilhada.

Dependendo do formato da peça e do percurso de deposição pode ser necessário que duas cabeças de impressão adjacentes tenham de ocupar a mesma coordenada do eixo “x” ou do eixo “y” simultaneamente quer para fabricar nessa coordenada ou para permitir o posicionamento destas. Por esta razão, os componentes responsáveis por apoiar a cabeça de impressão e garantir a sua precisão segundo um certo eixo não podem ser comuns entre cabeças de impressão adjacentes que possam ocupar o mesmo valor da coordenada desse mesmo eixo. Na Figura 4.5 pode ser observada a representação de uma camada de uma peça a ser depositada simultaneamente por duas cabeças de impressão, onde uma destas deposita os caminhos da zona azul e da zona amarela enquanto a outra deposita a zona verde, todas estas zonas separadas fisicamente. Assumindo que ambas as cabeças de impressão iniciam o seu movimento e a sua deposição no canto inferior esquerdo da área de

impressão respectiva, por o círculo azul ter uma área bastante inferior ao retângulo verde, assim que a deposição da primeira zona estiver completa, a cabeça de impressão correspondente à área de impressão 1 terá de se posicionar numa coordenada superior de “y”, em relação à outra cabeça de impressão.

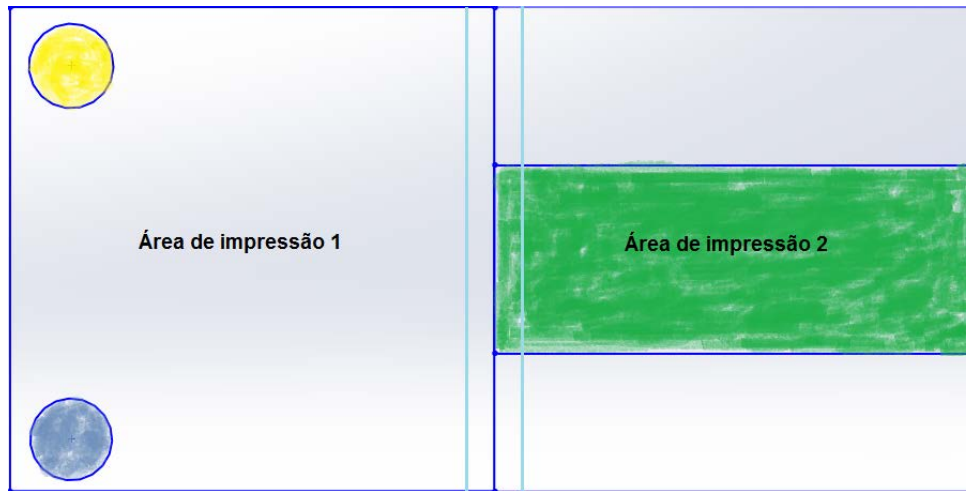


Figura 4.5 – Representação de uma peça com várias zonas de deposição fisicamente separadas.

Apesar de duas cabeças de impressão adjacentes segundo um dos eixos poderem ocupar uma posição cuja coordenada do eixo perpendicular ao qual estas estão dispostas seja igual, estas cabeças de impressão só poderão ocupar a mesma coordenada do eixo segundo o qual estão dispostas se se tratar de uma zona compartilhada. O *software* de Frutuoso (2016) evita colisões entre cabeças de impressão.

A solução encontrada para este sistema passa por ter um conjunto de 2 cremalheiras por cada conjunto de mesas de impressão posicionadas segundo o eixo “x”. Estas cremalheiras terão o comprimento correspondente ao comprimento da máquina segundo “y”, para possibilitar que qualquer cabeça de impressão possa depositar material em qualquer ponto dentro deste limite. Este conjunto poderá ser replicado na direção “x”, permitindo em teoria aumentar as dimensões da estrutura (Figura 4.4).

Tal como foi referido atrás, embora o diâmetro final do bocal tenha um valor bastante reduzido, as dimensões da cabeça de impressão são significativamente superiores a este. Para esta ter a capacidade de depositar material na zona partilhada definida é necessário que o *nozzle* se possa deslocar em qualquer ponto da área de impressão, até ao limite desta. Como a zona partilhada tem um limite que ultrapassa o limite da mesa de impressão, resulta que a cabeça de impressão ultrapasse essa mesma zona. Para se permitir cruzamentos entre estruturas de suporte das cabeças de impressão adjacentes é necessário existirem fixações ao veio de diferentes alturas e elementos que garantam coplanaridade das cabeças impressão, tal como representado na Figura 4.6.

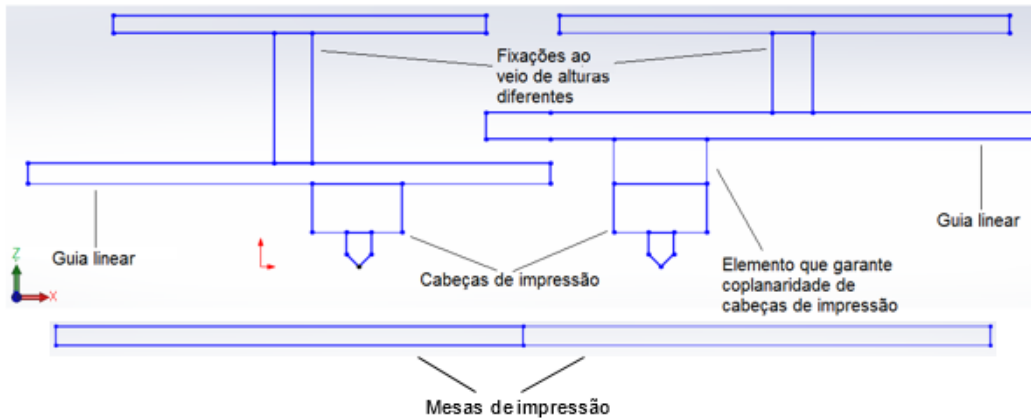


Figura 4.6 – Representação dos elementos que garantem a possibilidade de poder depositar material em coordenadas de “y” iguais simultaneamente.

4.5. Requisitos e especificações iniciais

O processo de fabrico por FDM é um método que tem sido bastante desenvolvido e investigado nos últimos anos. Apesar de haver muita informação disponível, há ainda muitos dados importantes para o projeto de um sistema destes cujos estudos se encontram em aberto. Por esta razão, foi necessário assumir a priori os valores de alguns parâmetros como opções de projeto. Quanto às outras opções do projeto foram feitas de acordo com as últimas tendências desta indústria para o segmento de mercado baixo. A lista das especificações mais importantes para o projeto apresentado é a seguinte:

- Os conjuntos de alimentador, cabo de *Bowden*, elemento de aquecimento e bocal que farão parte do sistema serão componentes produzidos por fabricantes que os fornecem para os sistemas de baixa gama devido à sua reputação de bom funcionamento e ao baixo custo.
- O diâmetro do filamento a ser usado, que condicionará os restantes componentes envolvidos na extrusão, será de 1,75 mm e o diâmetro de saída do *nozzle* será de 0,4 mm (medidas existentes no mercado).
- A velocidade e aceleração máxima das cabeças de impressão, tanto segundo o eixo “x” como o eixo “y”, foram baseadas em sistemas existentes e terão os valores mínimos de 100 mm/s e 4000 mm/s², respetivamente. Deste modo será possível comparar o tempo de fabrico e precisão da máquina com os sistemas já comercializados.
- Para todas as configurações da máquina admitiu-se um erro máximo na direção vertical da cabeça de impressão de 100 μm. Esta deflexão ainda não tem estudos no sentido de avaliar os erros geométricos que pode provocar na peça, pelo que foi arbitrado o valor de um quarto do diâmetro de saída do bocal.
- Para testar e provar o conceito de uma máquina de FDM com múltiplas cabeças que permita fabricar uma peça com o uso de mais que uma cabeça de impressão simultaneamente, o sistema neste documento será apresentado com 3 cabeças de impressão e 3 mesas de impressão. Esta constituição permite testar o *software* que evita colisões entre cabeças de impressão dispostas segundo o eixo “x” e segundo o eixo “y”.

Na Tabela 4.1 são resumidas as especificações mais importantes necessárias para o projeto deste sistema.

Tabela 4.1 - Especificações para provar o funcionamento do conceito.

Tipo de sistema	FDM
Número de mesas de impressão	3
Dimensões das mesas de impressão	200 mm x 200 mm
Número de cabeças de impressão	3
Dimensões da zona de impressão de cada cabeça (largura x comprimento x altura)	250 mm x 250 mm x 250 mm
Tipo de extrusão	Cabo de <i>Bowden</i>
Velocidade máxima das cabeças de impressão	100 mm/s
Aceleração máxima das cabeças de impressão	4000 mm/s ²
Diferença de altura máxima devido à deflexão	0,1 mm
Característica	Reconfigurável (mesas e cabeças de impressão)

5. Projeto

O conceito proposto, e cujos componentes serão projetados nos capítulos seguintes, foi desenvolvido de modo a possibilitar que tanto os conjuntos de mesa de impressão com o respetivo atuador linear: módulos de plataforma; como as cabeças de impressão e todos os componentes que se movem solidariamente com esta na direção do eixo “y”: módulos de deposição; sejam amovíveis e intermutáveis, de acordo com as necessidades de fabrico. Este sistema, representado na Figura 5.1 e com o desenho de conjunto no Anexo A¹, é constituído por uma estrutura, identificada com o número 1, projetada para permitir alocar quatro módulos de plataforma, identificados com o número 2. Para permitir deposição de material em qualquer ponto das mesas de impressão, há dois pares de carris alinhados com o eixo “y” sobre os quais se deslocam os módulos de deposição 3 e 4. Os vários tipos de módulos são controlados recorrendo ao programa de controlo desenvolvido em Frutuoso (2016), com as devidas adaptações.

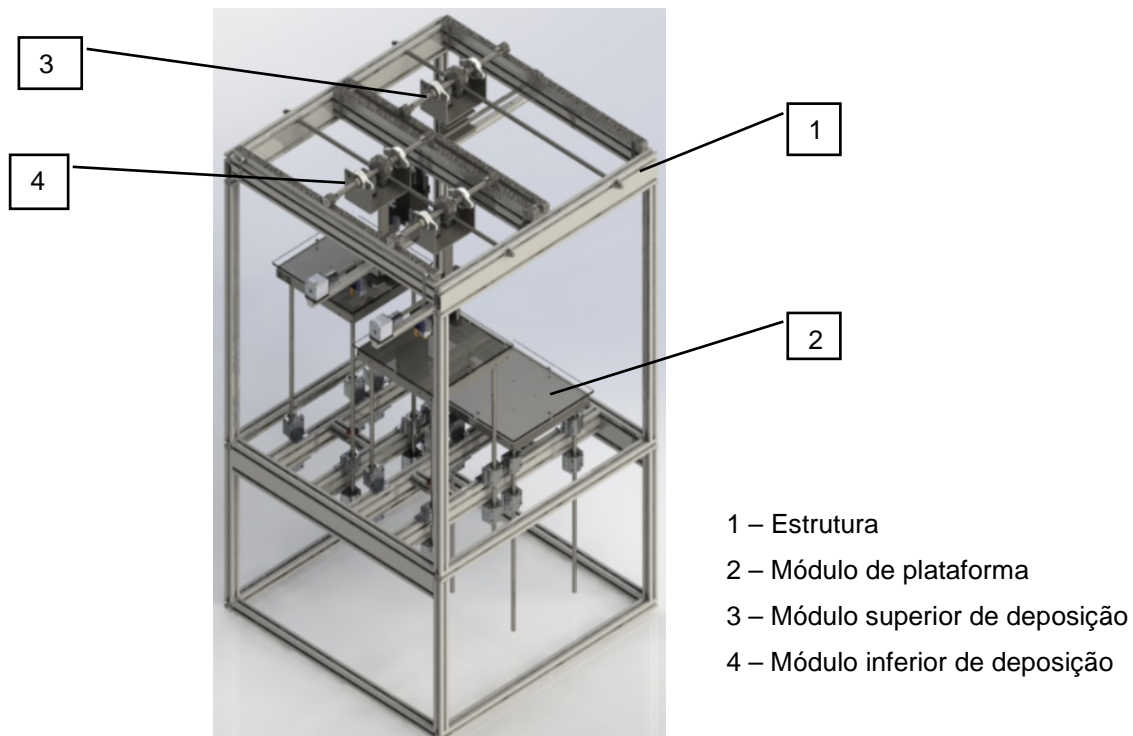


Figura 5.1 – Conceito proposto para o sistema de AM modular.

A estrutura (Figura 5.2), cujo desenho de conjunto está presente no Anexo A, foi concebida de modo a permitir a fixação de até quatro módulos de plataforma.

Embora tenha interesse que a máquina seja termicamente isolada do exterior, nesta fase de validação de conceito, este fator não é determinante, pelo que não foi considerado.

Na parte superior da máquina, os carris alinhados com o eixo “y” foram projetados para suportar o peso correspondente ao máximo de módulos de deposição que pudessem ser inseridos no sistema, tendo em conta as dimensões destes.

¹ Todos os desenhos de conjunto presentes em Anexo foram realizados à escala e os desenhos de conjunto originais bem como os desenhos técnicos de todos os componentes desenvolvidos podem ser encontrados em <https://goo.gl/4F27y8>.

Os membros da estrutura onde estão fixas as cremalheiras e que, por sua vez, suportam o peso destas, foram projetados para as dimensões da máquina referidas anteriormente. No entanto, este conceito pode ser aplicado, teoricamente, a quaisquer dimensões, sem limite de mesas de impressão nem de cabeças de impressão. Como esses membros da estrutura não podem ser fixos a outros elementos verticais, de modo a não interferir com a área de impressão, pode ser necessário adicionar uma estrutura em treliça na parte superior destes, para evitar falhas e deflexões.

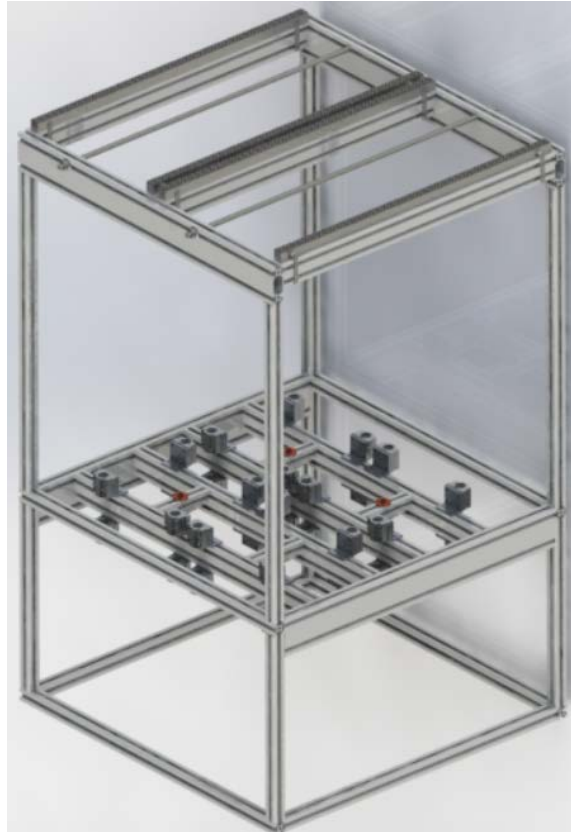


Figura 5.2 – Modelo da estrutura do sistema.

Na Figura 5.3 (a) está representado o modelo de um módulo de plataforma. Cada módulo é composto pela mesa de impressão de menor área e a geometria destes permite que se possam movimentar sem risco de colisões.

Na Figura 5.3 (b) está representado o modelo do módulo de deposição cujo pórtico tem maior altura e na Figura 5.3 (c) está representado o modelo do módulo de deposição cujo pórtico tem menor altura. Estes módulos não podem ser considerados totalmente independentes pois, mesmo que estejam a ser utilizados para fabrico de peças diferentes, as trajetórias planeadas para estes têm sempre de ter em conta a posição dos restantes módulos podendo mesmo de ter de ser alterada para não haver nenhuma colisão. Na Figura 5.4 está representada a situação onde se percebe que o cruzamento segundo o eixo “y” de dois módulos de deposição adjacentes tem de ser realizado tendo em conta que o módulo de deposição com o maior pórtico apenas colide com o outro se a cabeça de deposição do módulo de deposição com o menor pórtico estiver posicionada numa coordenada do eixo “x” que o permita, pelo que o programa de controlo tem de movimentar esta para uma posição onde o cruzamento seja realizado em segurança. Os desenhos de conjunto dos vários módulos como de diversos subconjuntos pertencentes a estes podem ser encontrados no Anexo A.

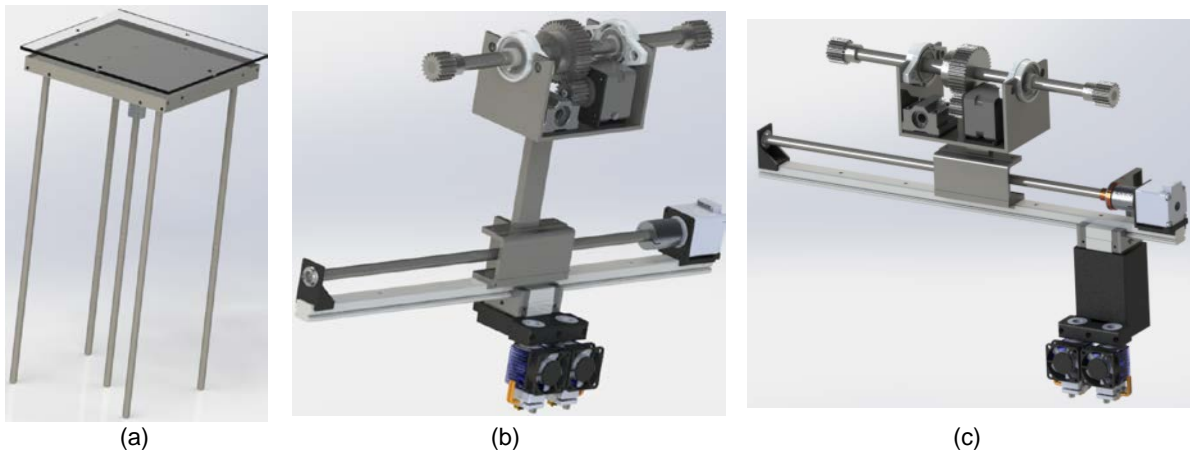


Figura 5.3 – Modelos dos módulos do sistema. (a) Módulo de plataforma. (b) Módulo de deposição com pórtico de maior altura. (c) Módulo de deposição com pórtico de menor altura.

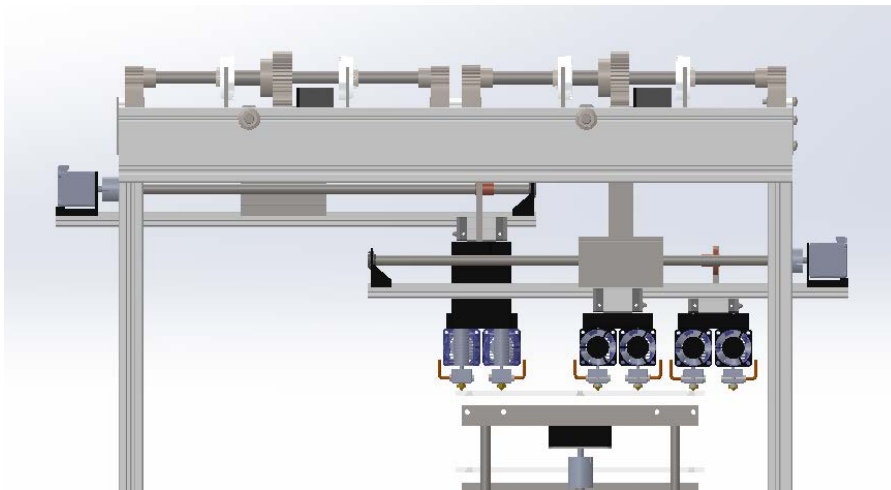


Figura 5.4 – Vista de frente do sistema de fabrico aditivo reconfigurável.

5.1. Mecanismo de extrusão

Para efetuar a extrusão do filamento que irá ser utilizado para o fabrico das peças foi selecionada o alimentador *Bulldog XL* (<http://goo.gl/BZg2O5>), com capacidade para extrudir filamento de diâmetro 1,75 mm, comercializada pela RepRapDiscount. Este alimentador é fornecida como um *kit* com mecanismo de alimentação, o respetivo motor NEMA 17, um ventilador um cabo de *Bowden*. Na Figura 5.5 (a) podem observar-se as dimensões gerais deste equipamento e na Figura 5.5 (b) pode observar-se o mecanismo de alimentação.

Para fundir o material e alterar o seu diâmetro, de modo a poder ser depositado para o fabrico da peça, foi utilizado o *hot end v6* adaptado para a extrusão por cabo de *Bowden*, comercializado pela E3D (<https://goo.gl/dUs8NA>). O conjunto inclui, tal como se pode observar Figura 5.6, um elemento de aquecimento, um bocal com diâmetro de saída de 0,4 mm, um dissipador de calor com um ventilador para fazer o ar circular por este e ainda um termístor para permitir o controlo da temperatura. A massa de todos os componentes é de 125 g.

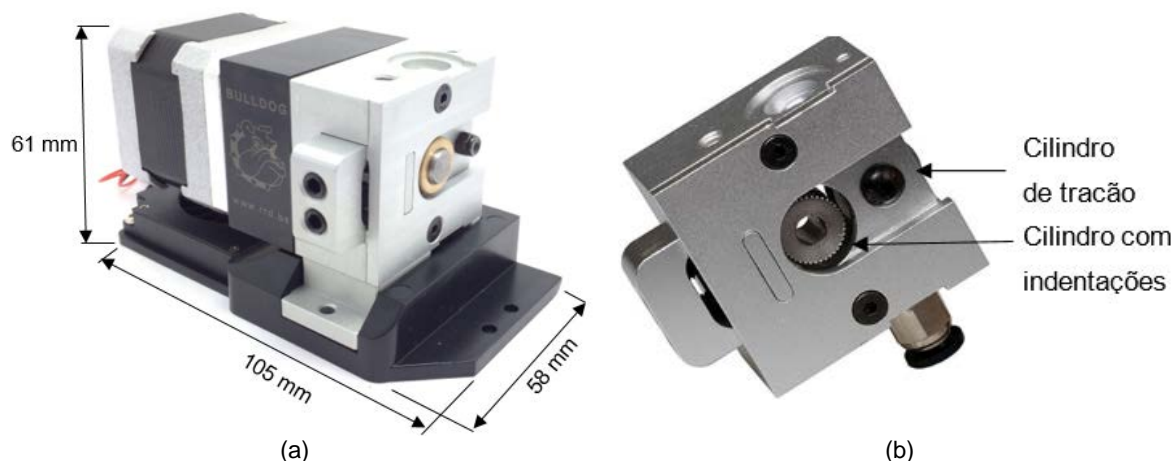


Figura 5.5 – (a) Dimensões do alimentador *Bulldog XL*. Adaptado de <http://goo.gl/3ADIOR>. (b) - Detalhe do mecanismo de alimentação. Adaptado de <http://goo.gl/jNJQ1m>.

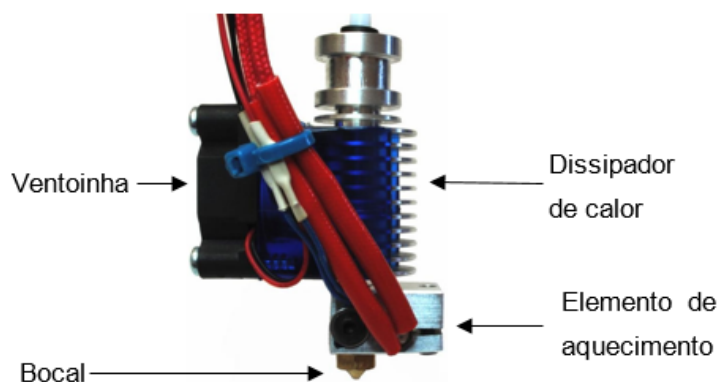


Figura 5.6 - Elemento de aquecimento. Adaptado de <https://goo.gl/dUs8NA>.

5.2. Cabeças de impressão

O sistema desenvolvido neste documento tem a particularidade de poder depositar dois materiais diferentes por cada cabeça de impressão, especialmente para permitir a utilização de material de suporte solúvel, mas para tal é necessário incorporar dois conjuntos de elementos de aquecimento em cada cabeça de impressão.

Os elementos de aquecimento serão montados verticalmente, como demonstrado na Figura 5.6, e a sua fixação será executada no colar por cima do dissipador de calor, que é constituída por uma zona de área circular com diâmetro de 16 mm e uma altura de 3 mm, seguida de uma zona de área circular com diâmetro de 12 mm e uma altura de 6 mm e, por fim, uma zona de área circular com o diâmetro igual à da primeira e com uma altura de 3,7 mm (Figura 5.7).

Por o bocal e os restantes componentes serem concêntricos, a posição em que este conjunto é montado não tem influência no processo de deposição. No entanto, é necessário garantir que os ventiladores dos dissipadores de calor permitem retirar o maior calor possível desse componente, pelo que não devem fazer circular o ar que vem diretamente do dissipador de calor adjacente ao que se pretende arrefecer, especialmente se se estiverem a utilizar ambos os mecanismos de extrusão na mesma peça. Por esta razão, o componente projetado para fixação destas peças permite o seu posicionamento em qualquer orientação, sendo a separação entre ambos os centros dos bocais tal que

possibilite colocar lateralmente os ventiladores. Estes são os componentes que conferem maior largura ao elemento de aquecimento, logo esta não será a configuração que minimiza as dimensões desta fixação e da cabeça de impressão.

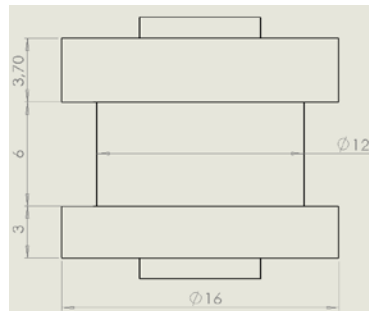


Figura 5.7 – Dimensões do colar do elemento de aquecimento.

O ventilador do dissipador de calor tem uma largura de 30 mm e é fixo de modo a que o eixo deste coincida com a linha que divide o ventilador ao meio, pelo que a distância do eixo do componente ao ponto mais afastado, perpendicularmente à vertical, é de 15 mm. Por esta razão, a distância entre os centros dos bocais deve ser no mínimo 30 mm, mais 2 mm para que os ventiladores não estejam encostados entre si, resultando num total de 32 mm. Adicionando a isto, no projeto da fixação dos elementos de aquecimento foi necessário ter em atenção que as forças aplicadas nestes elementos são apenas verticais e que pode ser necessário retirá-los para efetuar limpeza, manutenção ou troca, pelo que a fixação deve permitir esta ação.

A fixação dos elementos de aquecimento é constituída por duas peças (Figura 5.8 (a)) que dividem o negativo da zona superior do elemento de aquecimento descrita anteriormente ao meio e que são unidas utilizando 3 parafusos M3. O material destas peças é ABS para permitir que sejam fabricadas por uma máquina de FDM convencional. Os elementos de aquecimento são fixos ao conjunto tal como demonstrado na Figura 5.8 (b). Este conjunto também terá dois furos para permitir união ao elemento que permite o deslocamento segundo o eixo “x” e outro que possibilita a união ao atuador linear. Por fim, tal como foi referido na secção 4.4, em certas cabeças de impressão é necessário colocar um elemento para garantir a coplanaridade dos bocais, o que levou à criação de um conjunto diferente, de modo a ganhar a altura necessária. Na Figura 5.9 pode ser observada a comparação entre ambos os sistemas de fixação e na Tabela 5.1 estão descritas as características dos dois conjuntos, considerando também os elementos de aquecimento, mais relevantes para o projeto da máquina.

Tabela 5.1 – Características das cabeças de impressão.

Altura da guia linear	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Peso (g)
Menor	62	92	62,3	285
Maior	62	92	119,3	307

De notar que da Tabela 5.1 obriga a que a diferença de alturas dos conjuntos seja de 57 mm para garantir a complanaridade entre bocais.

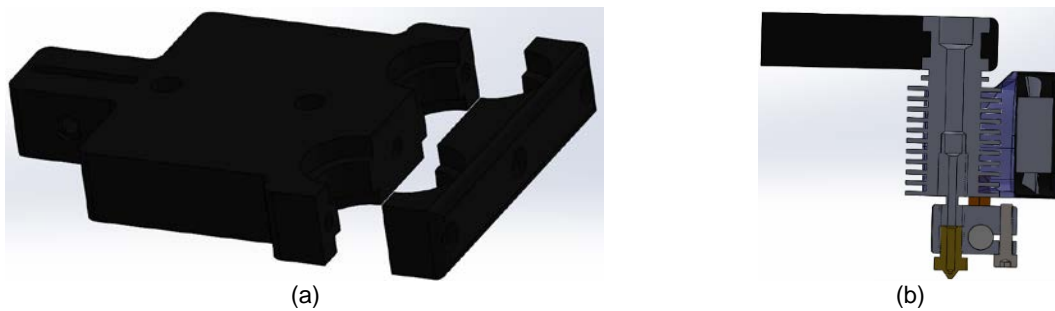


Figura 5.8 – (a) Modelo da fixação dos elementos de aquecimento. (b) Modelo da secção da cabeça de impressão.

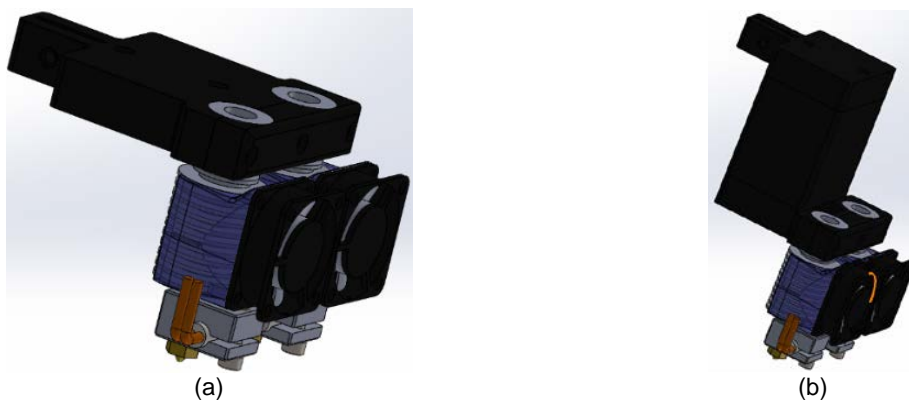


Figura 5.9 – Modelo das cabeças de impressão, que dependem da altura a que a guia linear a que estão fixos está posicionada. (a) Guia linear posicionada numa altura menor. (b) Guia linear posicionada numa altura maior.

5.3. Guia linear e atuador linear do movimento segundo o eixo “x”

Nesta máquina, a velocidade de fabrico é um fator bastante relevante para poder permitir tempos de fabrico menores. Esta velocidade está fortemente relacionada com a massa dos objetos que são movidos e com a força de atrito criada nos componentes onde há escorregamento. Por esta última razão, as guias lineares utilizadas, que permitem o movimento segundo o eixo “x”, foram escolhidas para minimizar as forças de atrito provenientes deste movimento o que, conseqüentemente, diminui a força necessária para fazer mover a cabeça de impressão. Deste modo, o atuador linear necessitará de exercer menor força, o que poderá significar a necessidade de um motor com menor massa, fato que corresponde à primeira condição de otimização do processo referida neste capítulo.

Estas guias lineares são fixas ao veio que une os pinhões pelo seu topo, visto este se encontrar a uma altura superior à das primeiras. Tal como se percebe pela Figura 4.3, para permitir a independência das cabeças de impressão e para permitir que estas ocupem a mesma coordenada em “y” simultaneamente a ligação entre os dois elementos não pode ser feita nos extremos das guias lineares, pois isso poderia causar colisões, tendo de ser feita no centro desta. No entanto, a guia linear tem de permitir que a cabeça de impressão se desloque em toda a sua zona de impressão, inclusivamente tem de poder ocupar o centro da guia linear, pelo que a fixação não pode impedir este movimento.

A solução encontrada foi uma guia linear do fabricante NSK que consiste num carril e num carro de rolamentos que permitem a fixação ao veio dos pinhões e à cabeça de impressão, respetivamente, sem que a união ao carril interfira com o movimento do carro. Este fato é garantido pelo formato do carril, visto o apoio do carro de rolamentos ser feito num plano diferente do plano onde se fará a fixação ao veio, tal como se pode observar na Figura 5.9.

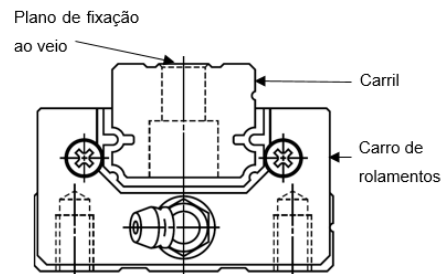


Figura 5.10 – Representação da secção guia linear da NSK. Adaptado de Motion & Control™ NSK (2014).

Numa primeira abordagem foi escolhido o carro de rolamentos presente no catálogo de Motion & Control™ NSK (2014) com o menor volume, para garantir a menor massa que tem de ser movida em conjunto com a cabeça de impressão e também o carril com menores dimensões para reduzir a força necessária para movimentar o conjunto segundo o eixo “y”. Segundo o catálogo, esta configuração tem a referência NS15 CL e é considerado, para este conjunto, que uma carga até 49 N requer uma pré-carga nula, a partir do qual se entra no domínio da pré-carga ligeira. A necessidade de pré-carga advém do fato das esferas dos rolamentos se deformarem com a aplicação de força sobre estas. Essa deformação pode ser prejudicial ao funcionamento da guia linear, pelo que esta é projetada para ter uma folga, que será anulada no momento em que a força é aplicada. Considerando a cabeça de impressão mais pesada calcula-se a força, \vec{P} necessária, neste caso 3 N.

Por este valor se bastante inferior ao limite de pré-carga ligeira e esse não ser o limite de peso que possa ser exercido neste sistema esta solução é viável quanto aos requisitos do fabricante, adicionando ao fato de que a velocidade máxima recomendada por este ser de 5000 mm/s e o objetivo do sistema em questão é atingir velocidades de 100 mm/s.

No catálogo é referido ainda que o coeficiente de atrito dinâmico deste conjunto, μ_c , tem o valor de 0,004 e que o coeficiente de atrito estático, μ_e , varia entre 1,5 a 2 vezes o valor do primeiro, dependendo da lubrificação aplicada. Como o projeto dos componentes deve ser feito para o pior cenário, considerou-se que o coeficiente de atrito estático tem o valor de 0,008.

Para se poder calcular a força necessária que o motor tem de exercer para movimentar a cabeça de impressão segundo o eixo “x”, \vec{F}_x , tendo em conta a aceleração que se pretende para o sistema, é necessário obter o valor total da massa movida, m_m , que, mais uma vez, irá ser a massa do conjunto cujo valor for maior somada à massa do carro de rolamentos. Segundo o mesmo catálogo, a massa do carro de rolamentos é de 140 g, que somada à cabeça de impressão resulta numa força, P , de 4,39 N.

Estabelecendo a aceleração segundo o eixo “x” em 4 m.s⁻² e utilizando os valores da massa movida, coeficiente de atrito estático e peso do conjunto calculados anteriormente, calcula-se a força, \vec{F}_x , necessária para cumprir os requisitos estabelecidos para este sistema, através de:

$$\vec{F} = m_m \vec{a} + \mu_e \vec{P} = 0,447 \times 4 + 0,008 \times 4,39 \cong 1,82 \text{ N} \quad (5.1)$$

Onde \vec{F} representa essa força em N, m_m a massa movida em kg, ou seja, a massa do objeto que se pretende deslocar, \vec{a} a aceleração que se pretende dar a esse objeto em m.s^{-2} , μ_e representa o coeficiente de atrito estático e, por fim, \vec{P} representa a força do peso do objeto que se pretende mover.

Analisado o resultado é perceptível que o atuador linear necessita de exercer uma força ligeiramente inferior a 2 N e tem de garantir a possibilidade de acelerar o conjunto a 4 m.s^{-2} e atingir velocidade de $0,1 \text{ m.s}^{-1}$, mantendo uma boa precisão e um bom controlo, visto o sistema ser em anel aberto.

Para esta função optou-se por um fuso unido a um motor de passo que, fixando uma porca ao conjunto da cabeça de impressão e carro de rolamentos, permite o movimento ao longo do primeiro através da rotação do motor. O fuso escolhido tem um diâmetro de 8 mm e um passo de 2 mm. Este tem uma rosca de quadrupla entrada, logo $n = 4$ implicando que o passo da hélice seja $l = 8 \text{ mm}$. O material do fuso é aço inoxidável 304 que tem um módulo de *Young* $E = 193 \text{ GPa}$ e uma tensão de cedência $\sigma_c = 290 \text{ MPa}$, segundo AK Steel (2007), e a sua massa é de 0,4 kg por cada metro de comprimento, de acordo com o fabricante. A porca que permitirá a transmissão de movimento será fabricada em cobre, com uma massa de 12 g. O coeficiente de atrito estático entre estes dois materiais é de $\mu_e^{A-C} = 0,23$.

No extremo do fuso oposto ao do motor foi utilizada a chumaceira de rolamento ECLM-08-02 da *Igus* (<http://goo.gl/7xbXNo>), que tem um diâmetro interno de 8 mm, possibilitado a utilização de um fuso com este diâmetro. A massa deste elemento é de 0,5 g e o coeficiente de atrito do rolamento é de 0,09 com lubrificante, segundo o fabricante. O exterior da chumaceira tem patilhas que facilitam a montagem, bastando exercer pressão desta sobre o suporte a que estará fixada, mas que, por outro lado, impedem a desmontagem, excetuando se for exercida pressão sobre as patilhas no sentido do centro da chumaceira. O limite de carga desta chumaceira é de 500 N no sentido radial e 12,5 N no sentido axial. Tal como foi calculada anteriormente, as forças axiais não ultrapassam os 2 N, pelo que o limite não é ultrapassado. Na Figura 5.11 (a) está representada a chumaceira de rolamentos e na Figura 5.11 (b) está representado o modelo CAD do suporte desta, que permitirá a sua fixação à guia linear e que teve de ser projetado e desenvolvido. O seu material é ABS, para poder ser fabricado por FDM e a sua massa é, aproximadamente, 0,12 g, o que implica que o conjunto deste suporte e da chumaceira tenha uma massa total inferior a 3 g.



Figura 5.11 – Constrangimento do extremo do fuso. (a) Chumaceira de rolamento. Retirado de <http://goo.gl/7xbXNo>. (b) Modelo do suporte da chumaceira de rolamento.

Para impor rotação no fuso, de modo a que haja movimento linear da cabeça de impressão, é utilizado um motor de passo, que é caracterizado por ter uma rotação precisa segundo um determinado ângulo ou um múltiplo desse valor, em qualquer sentido. Este tipo de motores é bastante comum em sistemas de FDM pois permite elevada precisão e repetibilidade, especialmente ao ser unido a um fuso, contudo o seu baixo custo e reduzida massa foram características determinantes para a sua escolha. Este tipo de motores requer que seja aplicado um binário elevado no veio para que este gire sem que esteja a ser atuado, anulando o efeito do fuso não ser autoblocante e, deste modo, garantido maior precisão da cabeça de impressão.

Geralmente denominado NEMA 11, a *LDO Motors* utiliza o nome *28mm Hybrid Stepper Series*, para o conjunto de motores que têm um funcionamento semelhante e cuja secção normal ao seu veio é um quadrado de lado igual a 28 mm. Como o objetivo deste projeto é minimizar a massa dos componentes, o motor escolhido foi o LDO-28STH32-0674 (<http://goo.gl/edHRqe>) cujas características são apresentadas na Tabela 5.2 e cujos desenhos técnicos são apresentados na Figura 5.12 (a). A velocidade de rotação do veio do motor depende do binário que este tem de fornecer, variando inversamente a este. Na Figura 5.12 (b) é possível observar a curva que relaciona o binário do motor, em N.m, com a sua velocidade em rot.s^{-1} .

Tabela 5.2 - Características do motor LDO-28STH32-0674. Informação retirada de <http://goo.gl/edHRqe> e de <http://goo.gl/B6NNxh>.

Massa (g)	Comprimento (veio não incluído) (mm)	Binário disponível (N.m)	Força axial máxima (N)	Ângulo do passo (°)	Aceleração máxima (passos.s^{-2})
110	31,5	0,0589	10	1,8	$1,25 \times 10^5$

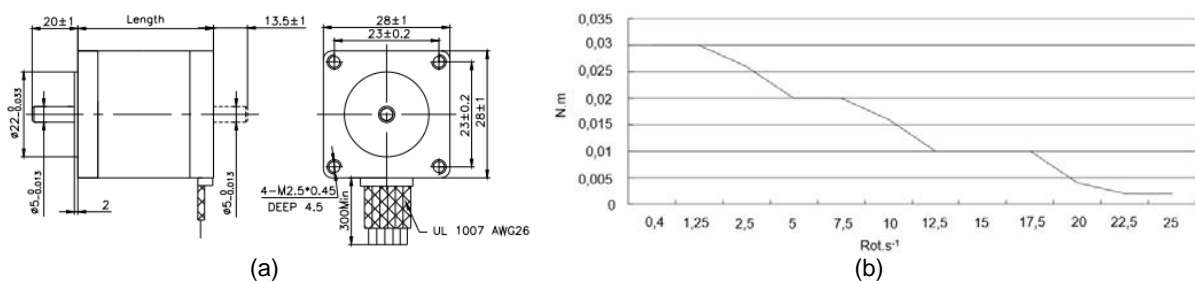


Figura 5.12 –Motor LDO-28STH32-0674. (a) Desenho técnico. Retirado de <http://goo.gl/edHRqe>. (b) Curva do binário em função da velocidade. Adaptado de <https://goo.gl/3OsLjS>.

Foi também projetado um suporte para fixar o motor à guia linear (Figura 5.13 (a)), de modo a que este mantenha a orientação pretendida. À semelhança do suporte da chumaceira o material deste é também ABS, pela mesma razão.

A transmissão de rotação do motor para o fuso é feita com uma união de veios. Como o diâmetro do veio do motor é de 5 mm e o diâmetro do fuso é de 8 mm, é necessário que a união de veios tenha furos internos com este diâmetro. A união de veios comercializada pela *Openbuilds* (<http://goo.gl/EyODss>) tem, para além destas características, um diâmetro exterior de 20 mm, um comprimento de 25 mm, uma massa de 15 g e o comprimento de cada furo é igual a 12,5 mm. Este componente está representado na Figura 5.12 (b).



Figura 5.13 – (a) Suporte do motor para fixação à guia linear. (b) Representação de uma união de veios. Retirado de <http://goo.gl/EyODss>.

Tal como foi referido anteriormente, para transmitir movimento linear do fuso para a cabeça de impressão é necessário a utilização de uma porca, que tem um comprimento de 15 mm, e um diâmetro exterior de 10,2 mm, de acordo com o fabricante. É também necessário um componente que faça a união entre a porca e a cabeça de impressão. Para tal foi desenvolvido o componente da Figura 5.14 (a) que consiste numa chapa de aço quinada, de modo a aumentar a rigidez deste elemento, com uma massa de 17,55 g. Num dos extremos há um furo que permite que este seja aparafusado à cabeça de impressão, enquanto no outro extremo há um furo que permite o encaixe na porca e quatro furos de menor diâmetro para permitir a fixação destes dois elementos. Na Figura 5.14 (b) está representado o método de funcionamento de todos os componentes referidos até este ponto.

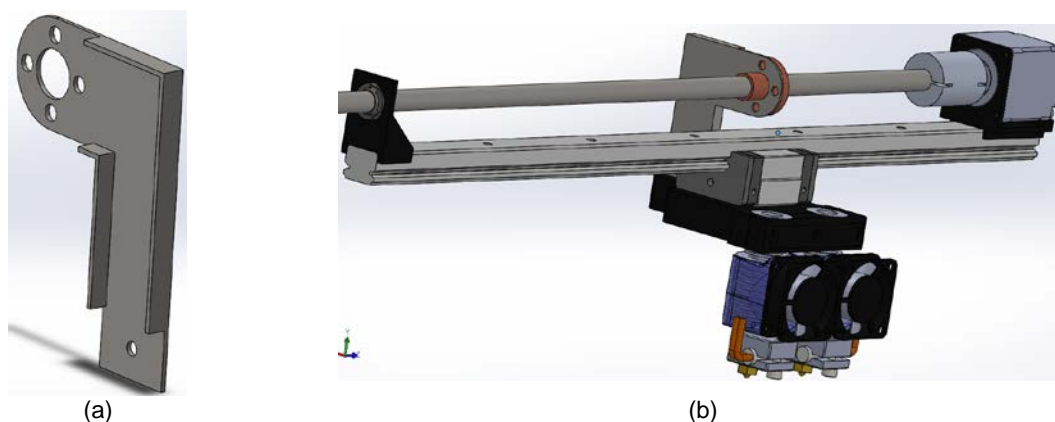


Figura 5.14 – (a) Modelo da fixação da cabeça de impressão à porca. (b) Modelo dos mecanismos que permitem o movimento segundo “x” da cabeça de impressão.

Tal como definido nas especificações, a dimensão segundo o eixo “x” que cada cabeça de impressão deve estar possibilitada de depositar material é de 250 mm. Isto significa que ambos os bocais têm de poder depositar material ao longo de uma distância de 250 mm que tem de ser comum a ambos, pois a peça pode necessitar de contribuição dos dois. Dada a configuração em que estes estão posicionados, o movimento da cabeça de impressão tem de ser superior a este valor, pelo que se tem de proceder ao cálculo da distância mínima, bem como ao cálculo do comprimento do fuso e do comprimento do carril da guia linear, para ser possível projetar todo o equipamento. Deste modo, é necessário definir a coordenada $x = 0$ mm da cabeça de impressão se dá quando esta está posicionada o mais junto ao motor possível e, neste ponto, só é possível depositar material pela cabeça de

impressão mais afastada do motor. Na secção 5.2 foi definida a distância entre o centro dos bocais, tendo resultado num valor de 32 mm, pelo que a cabeça de impressão mais próxima do motor só deposita material a partir de $x = 32$ mm. Ao longo de 250 mm, desde esta coordenada, tem de ser possível depositar material, pelo que o movimento da cabeça de impressão se dá num comprimento de 282 mm, sendo que no extremo oposto ao do motor a situação é idêntica à do primeiro, mas, neste caso, a cabeça de impressão mais afastada do motor deixa de poder depositar material a partir da coordenada $x = 250$ mm, terminando o seu percurso em $x = 282$ mm. Para além desta situação é necessário contabilizar com as dimensões do motor e do rolamento do fuso. Na Tabela 5.3 resume-se as dimensões necessárias ao projeto de todo o conjunto.

Tabela 5.3 – Comprimento de vários componentes que permitem o movimento da cabeça de impressão segundo o eixo “x”.

Componente	Comprimento (mm)
Motor (sem veio)	31,5
Veio do motor	20
União de veios	25
Rolamento	6
Porca	15
Ligação da cabeça de impressão à porca (espessura)	1
Carro de rolamentos	40,4

A dimensão do motor, união de veios e rolamento correspondem a aumentar ao comprimento útil de 282 mm o valor de 99,7 mm, totalizando o conjunto um comprimento de 381,5 mm. Para garantir margens de segurança o comprimento do carril utilizado é de 385 mm. O comprimento do fuso é igual ao comprimento do carril menos o comprimento do motor e do seu veio, ou seja, 385 mm menos 51,5 mm que é igual a 333,5 mm.

A utilização do fuso e do motor em questão deve permitir cumprir as especificações da aceleração e velocidade da cabeça de impressão. É conhecido o valor da aceleração do motor, que é de $1,25 \times 10^5$ passos. s^{-2} , e também o valor de cada passo, que é $1,8^\circ$. Multiplicando estes dois valores obtém-se $2,25 \times 10^5$ passos. s^{-2} , ou seja 625 rot. s^{-2} , onde rot representa rotações. Como o avanço do fuso é de 8 mm.rot $^{-1}$, multiplica-se este valor por 625 rot. s^{-2} e obtém-se uma aceleração de 5 m. s^{-2} .

Quanto à velocidade, para se obter 100 mm. s^{-1} de velocidade linear, v_x , divide-se este valor pelo valor do avanço do fuso. Sendo o avanço igual a 8 mm.rot $^{-1}$, obtém-se $\omega = 12,5$ rot. s^{-1} .

Recorrendo à Figura 5.12 (b) e à luz destes resultados é possível concluir que esta configuração permite cumprir tanto as especificações de velocidade e aceleração deste sistema no eixo “x”, desde que o binário de 10 N.mm não seja ultrapassado, bem como a especificação da dimensão na qual é possível depositar material. No entanto, é necessário perceber se o motor tem a força necessária para o movimento da cabeça de impressão e se o carril tem rigidez suficiente para não deformar de tal maneira que prejudique o processo.

O binário que o motor tem de aplicar é calculado utilizando a equação demonstrada em Budynas e Nisbett (2011) para calcular a força a força tangencial aplicada num fuso vertical derivada apenas da massa que se pretende mover. Como

$$P_R = F \times \frac{\mu_e \cos \lambda + \sin \lambda}{\cos \lambda - \mu_e \sin \lambda} \cong 1,08 N \quad (5.2)$$

Onde P_R corresponde à força tangencial aplicada no fuso num movimento ascendente em N, F é a força aplicada neste, na direção axial, em N, μ_e corresponde ao coeficiente de atrito estático entre o fuso e a porca e λ representa o ângulo de avanço

Multiplicando o valor de P_R pelo valor do raio do fuso obtém-se um binário $B_c = 4,32 N \cdot mm$, o que resulta num binário total $B_T = B_a + B_c \cong 4,6 N \cdot mm$. O binário de atrito corresponde a cerca de 0,27 N.mm. Este valor é inferior ao binário máximo do motor de 10 N.mm para a velocidade de 12,5 rot.s⁻¹, pelo que o motor também cumpre as especificações do sistema de FDM que se pretende projetar.

Resta, por fim, perceber qual o valor da deflexão máxima da guia linear para perceber se esse valor não é superior a 0,1 mm. Tal como foi referido anteriormente, a guia linear é fixa no seu centro, sendo simétrica para cada lado. No entanto, os elementos fixos a cada extremo desta têm massas diferentes, pelo que apenas interessa analisar o lado que estiver sujeito a elementos com mais massa. É também interessante analisar o conjunto da cabeça de impressão com mais massa pois será esta a causar maiores deflexões.

O fabricante indica no seu catálogo (Motion & Control™ NSK, 2014) que o material do carril é aço inoxidável. Por não ser especificado o aço inoxidável utilizado, foi assumido aço inoxidável 304, com o módulo de *Young* $E = 193 \text{ GPa}$, segundo AK Steel (2007). É ainda referido no catálogo que a massa deste componente é de 1,4 kg por metro de comprimento que, por este ter um comprimento de 385 mm, resulta numa massa total de 539 g. A análise realizada, por ser feita a metade do componente, também considerará só metade da sua massa, ou seja, 269,5 g.

Foi criado um diagrama de corpo livre na guia linear (Figura 5.15). É necessário perceber onde as cargas externas são aplicadas, em relação ao apoio, sendo este ponto o $x = 0$. Ao nível de forças distribuídas existe apenas uma, que é a força do peso da guia linear, w_{gl} , e está aplicada por todo o seu comprimento. As forças pontuais aplicadas neste elemento são apenas duas, surgindo de diversos componentes. Uma das forças é aplicada no centro do motor e contabiliza a massa deste, mas também do seu suporte, da união de veios, do fuso e da porca, sendo que a massa dos últimos três está dividida entre o motor e a chumaceira de rolamento equitativamente. A força deste conjunto representa o seu peso, P_{ca} , e é aplicada na zona onde o suporte do motor é fixa à guia linear, ou seja, a 12,5 mm da extremidade desta, que representa $x = 180$. A segunda é a força do peso da cabeça de impressão, P_{ci} , e contabiliza, na totalidade, a massa do conjunto de cabeça de impressão que tem este valor maior, a massa do elemento que faz a ligação entre esta e a porca e o carro de rolamentos. Esta força é aplicada no centro do carro de rolamento e é considerada a zona onde o maior momento é criado, que se situa no ponto mais afastado do apoio.

Sabendo que a guia linear tem uma massa de 1,4 kg.m⁻¹, que a massa do conjunto do atuador linear, tendo em conta a distribuição de massa no motor, é de 194 g e que a massa do conjunto da

cabeça de impressão é de 447 g, obtém-se a força do peso distribuída, w_{gl} , que é de $13,7 \text{ N.m}^{-1}$, e as forças do peso do conjunto do atuador linear, P_{ca} , e da cabeça de impressão, P_{ci} , que são 1,9 N e 4,4 N respetivamente.

O ponto onde interessa analisar a maior deflexão é no centro do bocal que está posicionado mais perto do apoio, visto este ser o único possibilitado de depositar material quando a cabeça de impressão se encontra nesta posição. No entanto, de modo a fazer uma análise conservadora e considerando que a folga do carro de rolamentos permite manter a horizontalidade do mesmo, foi considerado o ponto situado no centro deste componente, ou seja, $x = 123$, coincidente com a força P_{ci} e situado do lado do apoio, em relação à força P_{ca} .

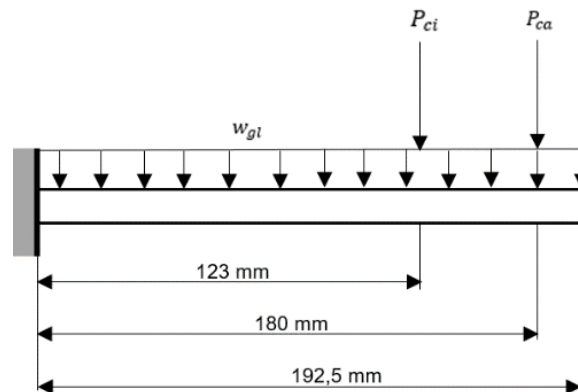


Figura 5.15 – Diagrama de forças aplicadas na guia linear do eixo “x”.

Para o cálculo da deflexão neste ponto utiliza-se a equação (5.4) para a carga distribuída e a equação (5.3) para a força P_{ca} , por esta estar mais próxima do apoio que o ponto onde se pretende estudar a deflexão, e também é utilizada para a força P_{ci} por ser coincidente com esse ponto. O valor do momento de inércia de área da guia linear, necessário para o cálculo da deflexão desta no centro do carro de rolamentos, δ_{cc} , foi calculado com ajuda do *software SolidWorks*, tendo resultado em $I_y = 2271 \text{ mm}^4$. Como tal:

$$\delta_{cc}^{ca} = \frac{Fx^2}{6EI}(x - 3a) \approx -0,004 \text{ mm} \quad (5.3)$$

$$\delta_{cc}^{ci} \approx -0,006 \text{ mm}$$

$$\delta_{cc}^{gl} = \frac{wx^2}{24EI}(4lx - x^2 - 6l^2) \approx -0,003 \text{ mm} \quad (5.4)$$

Onde δ representa a deflexão em mm, F a força concentrada em N, E o módulo de *Young* do material em MPa, I o momento de inércia de área do componente mm^4 , x a localização onde se pretende descobrir o deslocamento em mm, a a distância da força aplicada ao apoio do lado esquerdo em mm, b a distância da força aplicada ao apoio do lado direito em mm, l o comprimento do componente em mm e w o valor da força distribuída aplicada em N.mm^{-1} . Resultando num δ_{cc} total de 0,013 mm, em módulo, sendo bastante menor que o valor definido como deflexão máxima de 0,1 mm.

Validando todos os componentes referidos anteriormente, a massa do conjunto que contém o elemento que garante a coplanaridade é de 1,16 kg e a massa do outro conjunto é de 1,14 kg, aproximadamente.

5.4. Elemento vertical do pórtico

Para transmitir o movimento linear à cabeça de impressão foi utilizada uma estrutura em pórtico, com um elemento alinhado com o eixo “x” que suporta a cabeça de impressão, enquanto possibilita o movimento segundo o eixo “y”, e com um elemento vertical que faz a ligação entre a guia linear e o primeiro.

O elemento vertical do pórtico tem de ser unido ao carril da guia linear. No entanto, tal como pode ser observado na Figura 5.14 (b), esta ligação não pode ser feita na zona inferior do segundo para não impedir o movimento do carro de rolamentos nem pode ser feita com uma barra vertical fixa ao topo do carril, pois causaria interferência com o fuso. A solução encontrada passa pela criação de um componente em forma de “C” unido ao centro do carril, permitindo assim que não haja colisão de carris adjacentes na direção do eixo “x” da máquina, com o lado vertical posicionado do lado contrário ao elemento que faz a ligação entre a porca e o carril.

O fabricante da guia linear produz carris com furos de centros distanciados de 60 mm e, para a configuração utilizada neste sistema, um dos furos tem o seu centro no centro do carril, o que implicava que, para garantir a precisão do alinhamento segundo o eixo “x” do conjunto da cabeça de impressão, era necessário que o componente em “C” tivesse uma base com um elevado comprimento, para se poder utilizar os furos mais afastados, ou então que fosse desalinhado com o centro do conjunto. Para evitar estas soluções optou-se por se fazer um furo na base, para poder aparafusar esta ao furo do centro do carril, juntamente com um elemento que evite a rotação do primeiro quando o aperto do parafuso não é o adequado.

O componente em forma de “C”, representado na Figura 5.16 (a), consiste numa chapa de aço com 3 mm quinada duas vezes, de modo a criar o formato pretendido. O componente da Figura 5.16 fabricado em FDM, é responsável por impedir a rotação dos restantes componentes. Na Figura 5.17 (a) está representada a montagem destes componentes à guia linear e na Figura 5.17 (b) está representado um detalhe onde se percebe que o movimento da cabeça de impressão na direção do eixo “x” é completamente possibilitado por este componente em “C”.

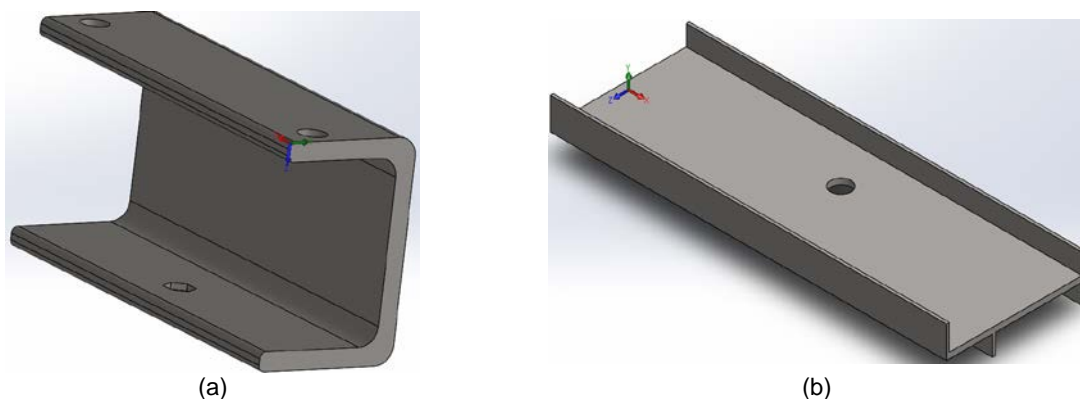


Figura 5.16 – Representação em CAD do conjunto do componente em forma de “C” do elemento vertical do pórtico. (a) Componente em “C”. (b) Componente que impede a sua rotação.

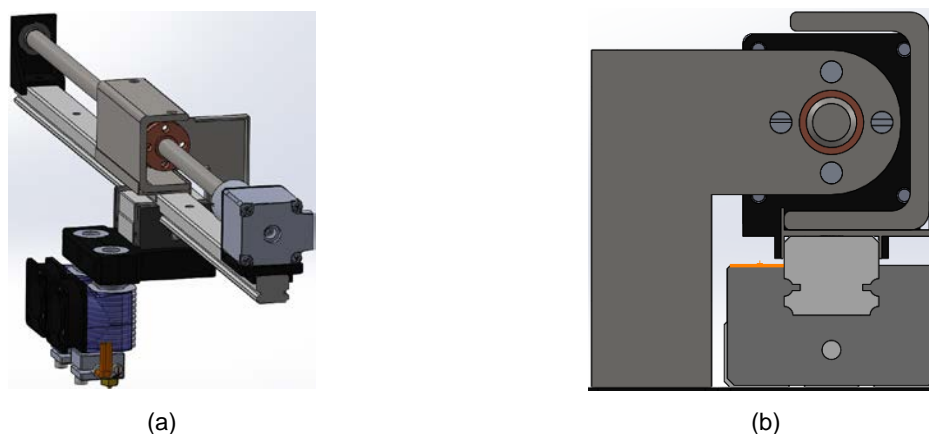


Figura 5.17 - Representação da montagem do conjunto do componente em forma de “C” do elemento vertical do pórtico. (a) Vista geral. (b) Detalhe da folga entre a porca e o elemento em “C”.

No entanto, este componente não está fixo ao mecanismo de atuação linear segundo o eixo “y” diretamente. Tal como referido atrás, o movimento da cabeça de impressão nesta direção será feito através de um conjunto de pinhões e cremalheiras que estarão posicionados numa altura superior às guias lineares. Optou-se por colocar as cremalheiras todas no mesmo plano, independente do tipo de cabeça de impressão que se movimentará sobre estas, fazendo com que o conjunto de atuação linear da direção “y” das cabeças de impressão também esteja num plano comum a todas. Para ligar este elemento ao componente em forma de “C” é necessário outro elemento vertical, que varia na altura, entre as cabeças de impressão de carris adjacentes. A diferença entre a altura dos elementos verticais é igual à diferença de altura das cabeças de impressão calculada na secção 5.2, que resultou em 57 mm. Os dois elementos, embora de alturas diferentes, têm uma estrutura bastante similar, partilhando as dimensões gerais nas restantes direções. Estes consistem em tubos de secção retangular, fabricados em aço inoxidável 304, com uma chapa de 1 mm de espessura soldada em cada um dos topos para permitir a união tanto ao conjunto da cabeça de impressão como ao conjunto de atuação linear segundo “y”. Esta união é feita através de dois furos que permitem a utilização de parafusos M3.

Na Figura 5.18 (a) está representado o tubo utilizado para suportar a cabeça de impressão cuja guia linear segundo “x” está posicionada a uma menor altura enquanto na Figura 5.18 (b) está representado o tubo utilizado no caso contrário.



Figura 5.18 – Representação em CAD do tubo retangular do pórtico. (a) Correspondente à guia linear em “x” com menor altura. (b) Correspondente à guia linear em “x” com maior altura.

5.5. Sistema de atuação linear do movimento segundo o eixo “y”

Para este movimento optou-se por colocar cremalheiras ao longo de todo comprimento na direção do eixo “y” da máquina, sendo que cada cabeça de impressão necessita de um par de cremalheiras, uma em cada lado, e sendo estas comuns a todas os conjuntos de cabeça de impressão que depositem material nos mesmos limites de coordenadas do eixo “x”. Sobre cada par de cremalheiras trabalha um par de engrenagens (pinhões) para cada cabeça de impressão, estando as engrenagens unidas a um veio comum a estas, que permite que a rotação seja transmitida. Tal como sugerido por Silva *et al* (2004), as engrenagens não precisam de nenhum mecanismo para as fixar ao veio, sendo montadas com um ajustamento bloqueado. Este tipo de ajustamento significa que o diâmetro do veio pode ser ligeiramente superior ao diâmetro do furo das engrenagens, sendo montadas com a ajuda de um martelo e permitirá a desmontagem quando exercida alguma pressão, mas não no decorrer do processo de deposição do material. Embora este seja um veio motor e o autor sugira que o ajustamento nestes casos deva ser aperto a frio, os esforços a que as engrenagens estão sujeitas não são muito elevados, não se justificando tal situação. Para transmitir força ao veio decidiu utilizar-se o motor de passo LDO-35STH26-0284, semelhante ao atuador linear utilizado na direção do eixo “x”, mas com uma potência, P , mais elevada ($P = B \times 2\pi n$). As características mais importantes deste motor são resumidas na Tabela 5.4, o seu desenho técnico está representado na Figura 5.19 (a) e a sua curva do binário em função da velocidade está representada na Figura 5.19 (b).

Tabela 5.4 - Características do motor LDO-35STH26-0284. Informação retirada de <https://goo.gl/DvbeZC> e de <https://goo.gl/FTLGNV>.

Massa (g)	Comprimento (veio não incluído) (mm)	Binário disponível (N.m)	Força axial máxima (N)	Ângulo do passo (°)	Aceleração máxima (passos.s ⁻²)
140	28	0,098	10	1,8	6,25 x 10 ⁴

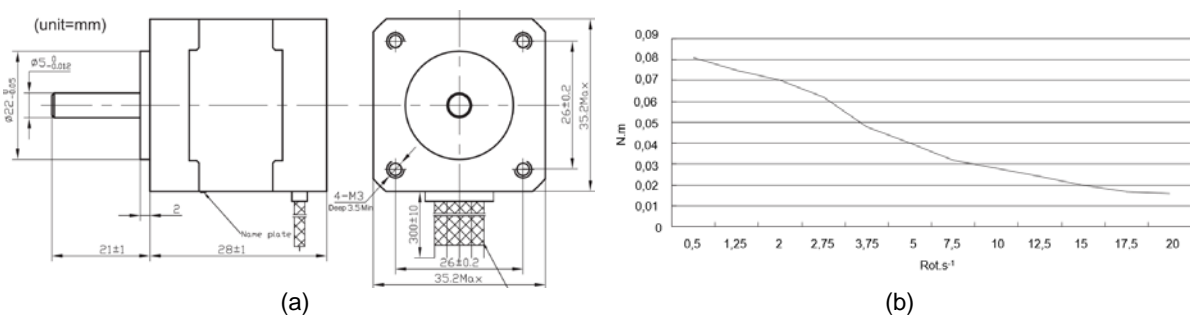


Figura 5.19 – Motor LDO-35STH26-0284. (a) Desenho técnico. Retirado de <https://goo.gl/DvbeZC>. (b) Curva do binário em função da velocidade. Adaptado de <https://goo.gl/DvbeZC>.

Para unir grande parte dos componentes necessários para este processo foi desenvolvida uma base (Figura 5.20 (a)) que consiste numa chapa de aço inoxidável 304 quinada, com uma massa de 280 g, e que permite a fixação do elemento vertical do pórtico, do motor que irá transmitir rotação às engrenagens e das chumaceiras de rolamento sobre as quais trabalhará o veio motor. Foi ainda necessário fixar a esta base uma chumaceira de rolamento linear para permitir que este conjunto funcione sobre uma guia linear, alinhada com o eixo “y” e com o comprimento da máquina. Esta guia

será comum a todos os pórticos que partilhem o mesmo par de cremalheiras e terá o intuito de manter o pórtico na posição vertical, ou seja, fazer com que a saída de material se dê perpendicularmente à mesa de impressão. Nesta base existem, na parte inferior, quatro furos que permitem a fixação desta a um suporte para o motor, através de parafusos M2.5, dois furos para parafusos M3.5 para fixar o elemento vertical e quatro furos para parafusos M4 que permitem fixar a chumaceira de rolamento linear.

O suporte do motor (Figura 5.20 (b)) é também semelhante ao suporte criado para o motor do atuador linear do eixo “x”, sendo fabricado em ABS.

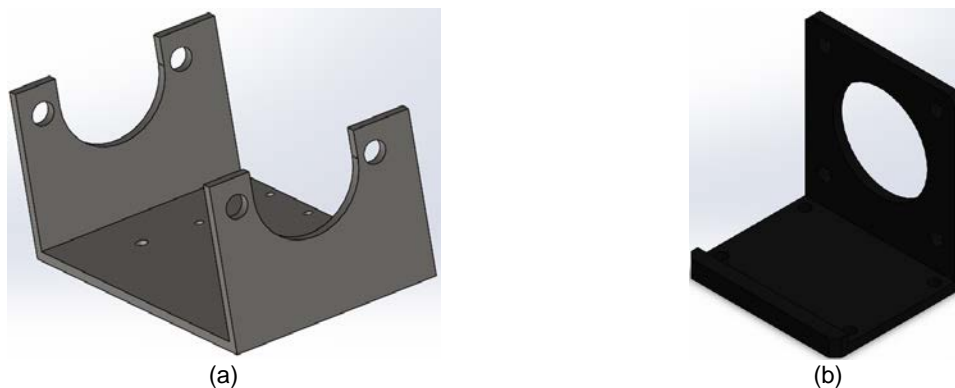


Figura 5.20 – (a) Modelo da base de suporte dos componentes do elemento horizontal do pórtico. (b) Modelo do suporte do motor do atuador linear no eixo “y”.

Utilizando os produtos comercializados pela Rolisa, foi escolhido o módulo $M = 1 \text{ mm}$ para todas as engrenagens do sistema, sendo este o valor mais baixo do catálogo elaborado por Rolisa (2007). Assumiu-se ainda, numa primeira iteração, que a massa de todos os componentes movidos na direção do eixo “y” seria $m_m = 2,5 \text{ kg}$, visto se ter considerado o valor de $1,185 \text{ kg}$ para a massa do conjunto total desde a cabeça de impressão até ao elemento vertical do pórtico. Como tal o peso P_m é igual a $24,525 \text{ N}$ e a força necessária para poder aplicar uma aceleração de 4 m.s^{-2} é calculada multiplicando a massa pela aceleração, ou seja, $\vec{F}_y = 2,5 \times 4 = 10 \text{ N}$.

O ponto de funcionamento do motor definido para o estudo foi o ponto cujo valor do binário é 40 N.mm e a velocidade angular é 5 rot.s^{-1} , sendo estes os valores que, através de engrenagens, resultaram nos valores especificados nos parágrafos anteriores.

O veio do motor tem 5 mm de diâmetro, tal como se pode observar na Figura 5.19 (a). Foi escolhida uma engrenagem com um módulo de 1 mm e 17 dentes. Isto significa que o diâmetro primitivo desta é igual a:

$$D_1 = M \times Z = 1 \times 17 = 17 \text{ mm} \quad (5.5)$$

Onde M é o módulo em mm , D é o diâmetro primitivo em mm e Z é o número de dentes.

Devido às dimensões do motor, foi necessário utilizar uma engrenagem com 41 dentes para que não houvesse contato entre o motor e o veio motor, sendo que o seu diâmetro interno é de 10 mm e o seu diâmetro primitivo é de $D_2 = 1 \times 41 = 41 \text{ mm}$, de acordo com a equação (5.5).

Com os valores obtidos é possível calcular a relação de transmissão, i , que relaciona o valor dos diâmetros primitivos de ambas as engrenagens, os seus números de dentes, os binários a que estão sujeitas e as suas velocidades angulares:

$$i = \frac{D_2}{D_1} = \frac{41}{17} = 2,41 \quad (5.6)$$

Isto implica que a velocidade angular do veio motor quando a velocidade angular do motor é de $\omega_1 = 5 \text{ rot.s}^{-1}$ seja a divisão deste valor por i , resultando em $\omega_2 = 2,07 \text{ rot. s}^{-1}$.

Sabendo que se pretende $\vec{v}_y \geq 100 \text{ m.s}^{-1}$ e que a multiplicação do perímetro da circunferência primitiva pela velocidade angular obtidas, recorre-se à seguinte inequação para se saber qual o raio da engrenagem que será utilizada como pinhão, ligada ao veio motor:

$$r_3 \geq \frac{100}{2\pi \times 2,07} \approx 7,7 \text{ mm}$$

Do mesmo modo, quando $B_1 = 40 \text{ N.mm}$, obtém-se um binário do veio motor igual a $B_2 = 96 \text{ N.mm}$.

E para se obter a força igual ou superior à definida como $\vec{F}_y = 10 \text{ N}$ divide-se o valor do binário por este, obtendo r_3 menor ou igual a 9,6 mm. Optou-se por utilizar uma engrenagem de raio igual a 9 mm, ou seja, diâmetro igual a 18 mm, com módulo igual a 1 mm e com um diâmetro interno de 8 mm. O número de dentes desta engrenagem é calculado através da equação (5.6), tal que Z_3 é igual a 18 dentes. Utilizando os valores de ω_2 e de B_2 calculado anteriormente é possível calcular \vec{v}_y e \vec{F}_y , cujos valores são 117 mm.s^{-1} e $10,7 \text{ N}$, respetivamente.

A guia que impedirá com que o pórtico tenha um movimento pendular quando há grandes variações de aceleração da cabeça de impressão segundo o eixo “y” terá 8 mm de diâmetro, 570 mm de comprimento e, por ser fabricada em aço inoxidável 304, a um peso de 229 g. Este veio terá os extremos roscados, para permitir a sua fixação à estrutura através de porcas, e permitirá que as chumaceiras de rolamento, com diâmetro interno de 8 mm, deslizem sobre este.

As chumaceiras de rolamento escolhidas foram as SC8 UU (Figura 5.21 (a)), comercializadas pela Adafruit, que suportam cargas dinâmicas de 260 N e que têm uma massa de 56 g. A escolha deste elemento deveu-se ao seu baixo custo e elevado desempenho. Os desenhos técnicos do mesmo estão representados na Figura 5.21 (b) e as suas dimensões são apresentadas na Tabela 5.5. No entanto, o valor do coeficiente de atrito estático não é disponibilizado pelo fabricante, tendo sido retirado o valor de uma chumaceira de rolamentos semelhante e assumiu-se que o valor é comum a ambos os componentes, sendo que o catálogo da Thomson (2016) refere que o coeficiente de atrito deste tipo de componentes varia entre 0,001 e 0,004.

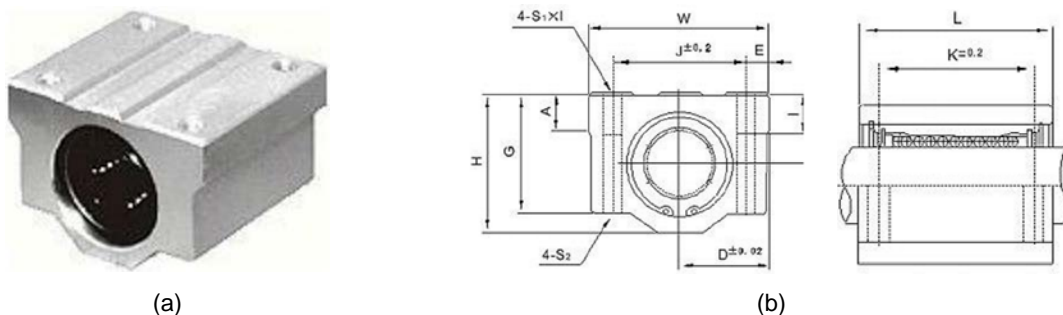


Figura 5.21 – Chumaceira de rolamento SC8 UU. (a) Representação da mesma e (b) Desenhos técnicos desta. Retirados de <https://www.adafruit.com/product/1179>.

Tabela 5.5 – Dimensões da chumaceira de rolamento SC8 UU. Informação retirada de <https://www.adafruit.com/product/1179>.

Diâmetro interno (mm)	h (mm)	D (mm)	W (mm)	H (mm)	G (mm)	A (mm)	J (mm)	E (mm)	S ₁ x I (mm)	S ₂ (mm)	K (mm)	L (mm)
Φ8	11	17	34	22	18	6	24	5	M4x8	Φ3,4	18	30

Para não existir colisão entre o veio sobre o qual este componente escorrega e a porca que une o elemento vertical do pórtico à base de suporte dos componentes do elemento horizontal do pórtico foi necessário projetar uma peça (Figura 5.22 (a)), feita de ABS, para elevar a chumaceira de rolamento, evitando assim qualquer conflito.

O projeto do veio motor (Figura 5.22 (b)), foi feito tendo em conta o diâmetro interno das engrenagens dos extremos, e tendo em conta o diâmetro interno da engrenagem que está em contato com a engrenagem ligada ao motor. O veio terá um comprimento de 260 mm, pois será esta a distância entre os lados exteriores das cremalheiras de cada par. Foi ainda criada uma zona com diâmetro igual a 12 mm que será responsável por impedir que o veio motor seja desviado da sua posição original, visto haver uma chumaceira de rolamento em contato com um dos lados desta zona e uma engrenagem com um aperto elevado do outro.

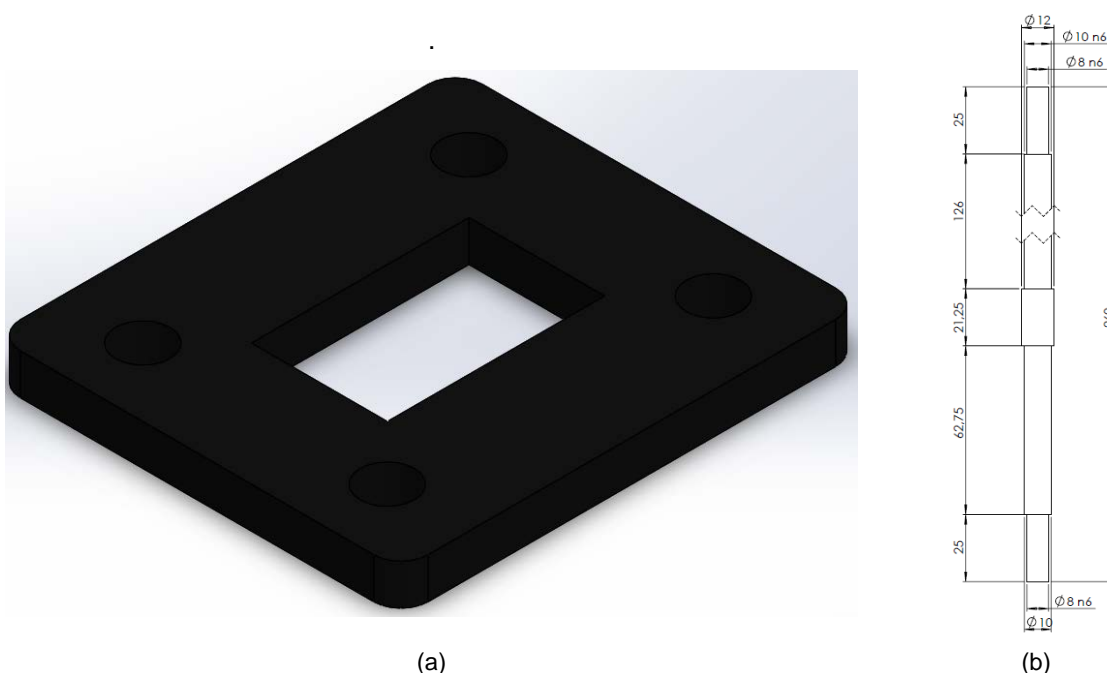


Figura 5.22 – (a) Modelo da peça que eleva a chumaceira de rolamento. (b) Dimensões do veio motor.

As chumaceiras de rolamento radiais que transmitirão a força do peso dos elementos da cabeça de impressão ao veio motor escolhidas foram as KFL 000 (Figura 5.23 (a)), devido ao seu baixo custo, e comercializadas UGE Eletronics (<https://goo.gl/x3NGIZ>). A sua massa é de 70 g, os seus desenhos técnicos estão representados na Figura 5.23 (b) e na Tabela 5.6 estão descritas as suas dimensões. No entanto, à semelhança da chumaceira de rolamento axial, o coeficiente de atrito deste componente não é disponibilizado e foi necessário assumir o valor de um componente semelhante. Recorrendo ao

catálogo da FYH (2015) é possível observar que o valor típico de rolamentos deste género para o coeficiente de atrito estático varia entre 0,0015 e 0,002

Tabela 5.6 – Dimensões da chumaceira de rolamento KFL 000. Informação retirada de <https://goo.gl/x3NGIZ>.

Diâmetro interno (mm)	a (mm)	e (mm)	i (mm)	g (mm)	l (mm)	s (mm)	b (mm)	z (mm)	B (mm)	n (mm)
Φ10	60	45	5,5	5,5	11,5	7	36	15,5	14	4

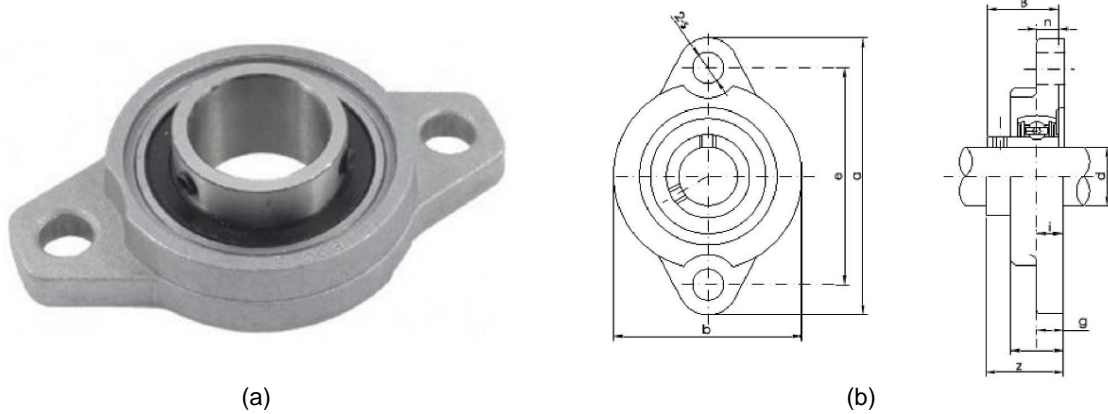


Figura 5.23 – Chumaceira de rolamento KFL 000. (a) Representação da mesma e (b) Desenhos técnicos desta. Retirados de <https://goo.gl/x3NGIZ>.

Na Figura 5.24 pode ser observada a representação da montagem dos componentes do conjunto discutido nesta secção e que, em conjunto com os componentes referidos desde a secção 5.1 formam os dois tipos de módulos de deposição, que têm ambos com uma massa de 2,24 kg.

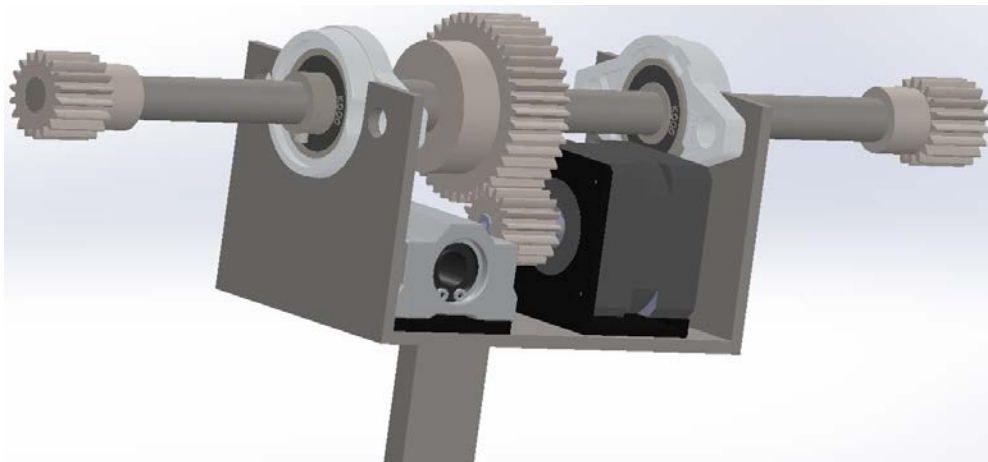


Figura 5.24 – Modelo do conjunto do pórtico da cabeça de impressão.

5.6. Estrutura de suporte dos módulos de deposição

Tal como referido anteriormente o veio motor está fixo, nos extremos, a dois pinhões. Para ser transmitido o movimento é necessário que estes trabalhem sobre uma cremalheira cada um, que terá de ter o mesmo módulo e também terá de ter comprimento suficiente para que seja possível depositar material em todos os pontos da área de impressão.

Recorrendo, mais uma vez, ao catálogo de Rolisa (2007), foi escolhida a cremalheira de módulo, $M = 1$ e com 500 mm de comprimento, pois este projeto considera duas mesas de impressão na direção do eixo “y” que perfazem, no total, um comprimento de 400 mm nesta direção. Este elemento tem uma largura e uma altura de 15 mm, sendo a sua massa de 800 g, o que representa uma carga distribuída de $15,7 \text{ N.m}^{-1}$.

Embora o pinhão não possa ultrapassar os limites da cremalheira, o elemento que limita o posicionamento do módulo de deposição na direção do eixo “y” é a base de suporte dos componentes do elemento horizontal do pórtico pois a distância dos extremos desta ao centro do veio motor é de 34 mm, em ambos os lados, e esse valor é superior ao raio dos pinhões, tal como se pode perceber na Figura 5.25. Por esta razão o movimento do módulo nesta direção está limitado a $500 \text{ mm} - 2 \times 34 \text{ mm}$, ou seja, 432 mm. Este valor é superior ao comprimento de duas mesas de impressão posicionadas lado a lado e este valor é suficiente pois a máquina apenas permite que sejam colocadas duas mesas nesta direção. Se se pretender uma máquina com uma maior área de impressão é necessária uma estrutura maior e basta que o comprimento da cremalheira seja 68 mm superior à dimensão na direção “y” da área de impressão pretendida.

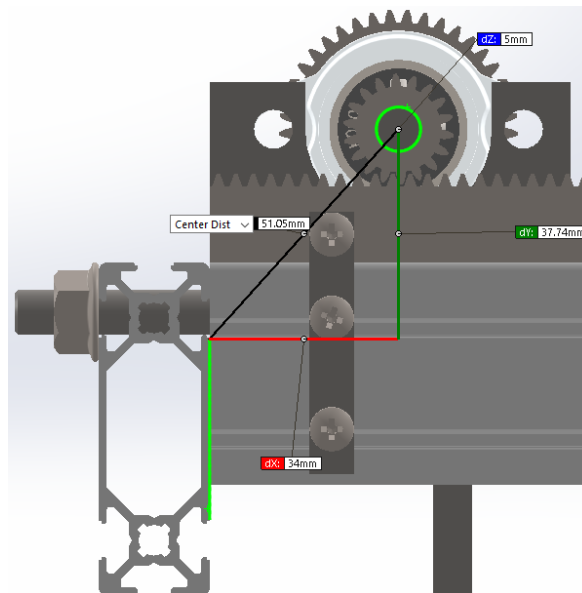


Figura 5.25 - Representação da distância entre o centro dos pinhões e o final da cremalheira.

A estrutura que suporta a cremalheira e que, por sua vez, suporta os módulos de deposição será feita de perfis de alumínio comercializados pela Bosch Rexroth AG e cuja informação pode ser consultada no catálogo Bosch Rexroth AG (2016). Para este projeto, devido aos reduzidos esforços existentes, foram escolhidos os perfis com ranhura de 6 mm e com dimensões 20 mm x 20 mm (Figura 5.26 (a)), 20 mm x 40 mm (Figura 5.26 (b)) e 20 mm x 60 mm (Figura 5.26 (c)), pois permitem que as dimensões gerais destes sejam as menores também e são suficientes para satisfazer os requisitos do sistema. O comerciante afirma que o material utilizado tem um módulo de *Young*, E , igual 70 GPa e uma tensão de cedência, σ_c , igual a 245 MPa.

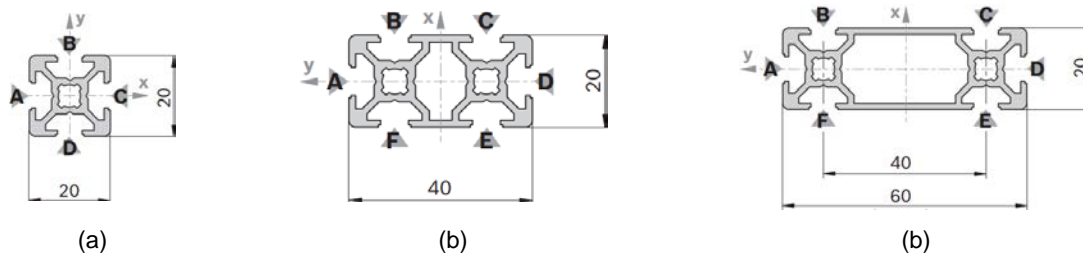


Figura 5.26 – Representação da secção de perfis de alumínio com ranhura de 6 mm. (a) 20x20. (b) 20x40. (c) 20x60. Retirado de Bosch Rexroth AG (2016).

Para esta função foram escolhidos os perfis de alumínio 20x40 com ranhura de 6 mm, presentes no mesmo catálogo, cuja secção pode ser observada na Figura 5.26 (b), e terão um comprimento de 500 mm. Este componente tem uma massa de $0,8 \text{ kg.m}^{-1}$ e um momento de inércia de área de $4,6 \times 10^4 \text{ mm}^4$ (segundo o eixo “x” da Figura 5.26 (b)).

A fixação deste elemento à cremalheira é feita recorrendo a porcas comercializadas pela marca, que permitem o encaixe na ranhura do perfil facilmente, e têm uma rosca M4. Como o maior lado da secção deste perfil de alumínio será alinhado com o eixo “z” da máquina, são introduzidas duas porcas em cada lado deste elemento, uma em cada ranhura, às quais será aparafusada uma chapa de aço inoxidável de com três furos, que permite também a ligação da cremalheira, que terá de ser furada para permitir passagem de um parafuso. No entanto, como a largura da cremalheira é inferior à largura deste perfil, é necessário adicionar uma anilha fabricada em ABS entre a cremalheira e a chapa que permite a união entre os elementos. Na Figura 5.27 está representada a montagem de todos os componentes. Para as cremalheiras que não estão posicionados nos extremos da máquina é necessário colocar dois perfis de alumínio encostados entre si, para suportar uma cremalheira cada um, deste modo não é possível utilizar a configuração da fixação utilizada para as cremalheiras dos extremos. Por os perfis se encontrarem encostados, colocou-se apenas duas porcas no lado contrário do perfil ao lado que está em contato com o adjacente, colocando-se uma chapa em cada um dos lados e, para manter as cremalheiras fixas, utilizaram-se duas anilhas, semelhantes às do caso anterior, a separá-las. A massa deste conjunto tem o mesmo valor, aproximadamente, sendo que a força do peso exercida é dividida igualmente pelos dois perfis.

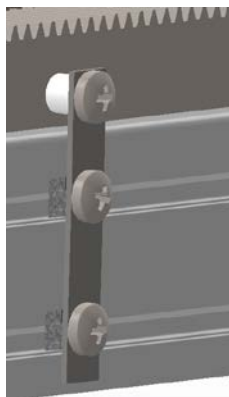


Figura 5.27 – Fixação da cremalheira ao perfil de alumínio.

Os perfis de alumínio, por suportarem os módulos de deposição, estão sujeitos a deflexão, que depende das cremalheiras e das suas fixações, sendo que cada perfil suporta apenas uma cremalheira, e depende também do número de módulos de deposição posicionados em cada cremalheira, sendo que a força do peso destes é dividida pelos dois perfis que suportam as cremalheiras sobre as quais se movimenta cada módulo.

Tal como se pode observar na Figura 5.28, a maior distância segundo o eixo “y” entre componentes do módulo de deposição é de 92 mm e é a distância entre o ventilador e a fixação dos elementos de aquecimento. Por esta razão, a distância mínima entre centros de módulos de deposição tem este valor. Tendo em conta que o comprimento útil da cremalheira é de 432 mm, divide-se este valor por 92 mm e obtém-se o valor de 4,7, resultando que o número máximo de módulos de deposição que se pode colocar em cada par de carris no sistema que se está a projetar é de quatro, ficando com 64 mm livres para movimento destes. No entanto, a utilização de 4 módulos de deposição no mesmo par de carris simultaneamente não permite que se fabrique uma peça com a cooperação de vários módulos de deposição. Isto deve-se ao fato da folga ser inferior à dimensão de cada módulo. Para que a deposição alternada na zona de ligação seja possível, o número máximo de módulos utilizados é 3, com uma folga de 156 mm. A utilização de 4 módulos de deposição simultaneamente permite o fabrico de 4 peças com a dimensão do eixo “y” igual ou inferior a 64 mm, pelo que se considerou também este caso no projeto dos componentes.

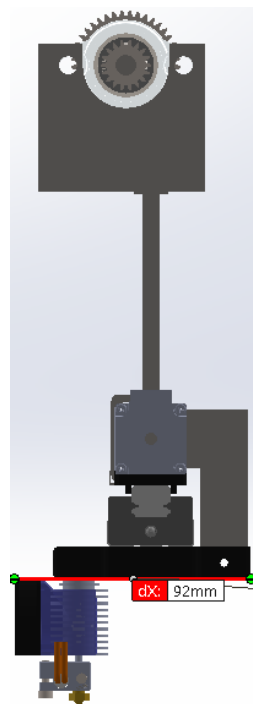


Figura 5.28 – Módulo de deposição com representação da maior distância segundo o eixo “y”.

A análise da deflexão dos perfis de alumínio foi sujeita à consideração de que a fixação destes será um apoio simples em cada extremo, apesar da fixação também criar reação a momentos, mas garantindo que o valor resultante é majorado. Considerou-se também que a deflexão máxima deste elemento seria no seu centro.

Há duas situações com interesse de estudar: o caso A, em que se utilizam quatro módulos de deposição, estando os dois do centro encostados entre si, sendo o contato coincidente com o centro do perfil de alumínio, e os restantes módulos encostados também aos do centro; o caso B, em que se utilizam três módulos de deposição, estando o centro do veio do módulo central coincidente com o centro do perfil de alumínio e os restantes módulos encostados também ao do centro.

Em ambos os casos há duas forças distribuídas, que resultam do peso da cremalheira, w_c , e da força do peso do perfil de alumínio, w_{pa} , com os valores de $15,7 \text{ N.m}^{-1}$ e $7,8 \text{ N.m}^{-1}$, respetivamente.

A força exercida pelos módulos de deposição neste perfil vem do seu peso e, tal como se concluiu anteriormente, a massa de cada módulo de deposição, m_{md} , é de $2,24 \text{ kg}$ que representa um peso de 22 N . No entanto, como a força do peso dos módulos está dividida por duas cremalheiras, a força aplicada em cada uma é apenas metade, ou seja, $P_{md} = 11 \text{ N}$. Apesar da posição da cabeça de deposição segundo o eixo "x" poder fazer variar este valor, a diferença é desprezável. Nas Figuras 5.29 (a) e (b) estão representados os diagramas de forças dos casos A e B, respetivamente.

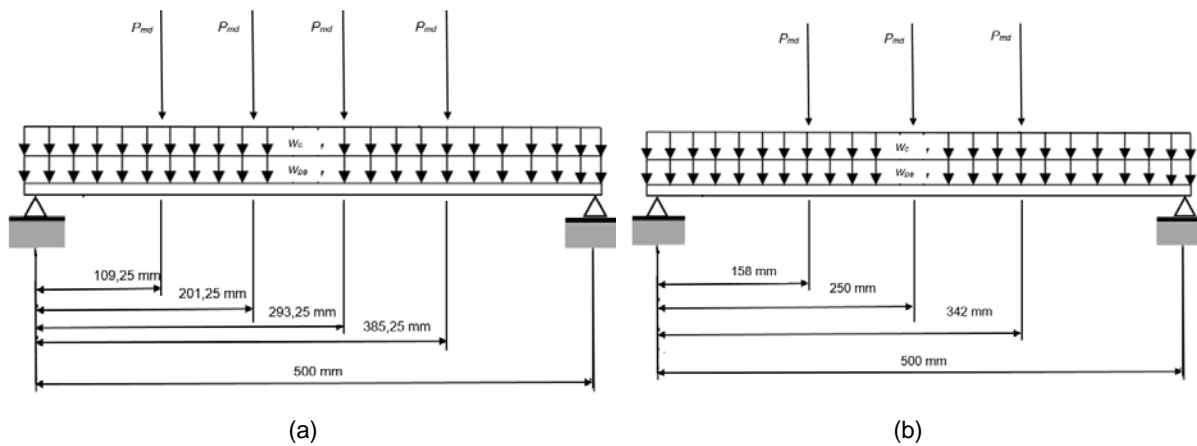


Figura 5.29 – Diagrama de forças dos perfis de alumínio alinhados com o eixo "y". (a) Caso A. (b) Caso B.

Budynas e Nisbett (2011) resume as equações para o cálculo das deflexões em membros bi-apoiados simplesmente, sendo a equação (5.7) utilizada para o cálculo da deflexão causada pelas forças distribuídas. Como em ambos os casos se tem as mesmas cargas distribuídas obtém-se:

$$\delta_c = \frac{wx}{24EI} (2lx^2 - x^3 - l^3) = -0,004 \text{ mm} \quad (5.7)$$

$$\delta_{pa} = \frac{wx}{24EI} (2lx^2 - x^3 - l^3) = -0,002 \text{ mm}$$

Onde δ representa a deflexão em mm, E o módulo de Young do material em MPa, I o momento de inércia de área do componente mm^4 , x a localização onde se pretende descobrir o deslocamento em mm, l o comprimento do componente em mm e w o valor da força distribuída aplicada em N.mm^{-1} .

O que faz com que a deflexão total dos componentes graças a estas cargas seja de:

$$\delta_t^c = \delta_c + \delta_{pa} = 0,006 \text{ mm}$$

Para calcular a deflexão causada pelo peso dos módulos utilizou-se a equação (5.8) para as cargas aplicadas à direita do ponto de deflexão máxima e a equação (5.9) para as cargas à esquerda desse ponto. Tal que:

$$\delta_{AB} = \frac{Fbx}{6EI} (x^2 + b^2 - l^2) \quad (5.8)$$

$$\delta_{Bc} = \frac{Fa(l-x)}{6EI} (x^2 + a^2 - 2lx) \quad (5.9)$$

Onde se verificou que a deflexão total causada pelos módulos no caso A, δ_{md}^A , é de 0,028 mm e no caso B, δ_{md}^B , é de 0,024 mm. À luz destes resultados é perceptível que o caso A tem um efeito pior efeito em termos de deflexão que o caso B, pelo que se torna apenas importante analisar o primeiro. Somando δ_{md}^A a δ_t^c obtém-se a deflexão total no centro do perfil de alumínio, que resulta em 0,034 mm em módulo.

Na secção 5.3 foi calculada a deflexão total do carril onde a cabeça de impressão se move segundo o eixo “x”, δ_{cc} , quando esta está posicionada mais perto do motor, tendo resultado em 0,014 mm. Somando este valor ao anterior obtém-se uma deflexão combinada de 0,048 mm, que é bastante inferior aos 0,1 mm definidos como deflexão máxima, concluindo assim que o projeto deste elemento não impede o bom funcionamento do sistema.

Os elementos que suportam as cremalheiras estão fixos, nos seus extremos, a elementos alinhados com o eixo “x”. Estes, à semelhança do caso anterior, serão também perfis de alumínio comercializados pela Bosch Rexroth AG, tendo sido utilizados os perfis 20x60 com ranhura de 6 mm, tal como apresentado na Figura 5.26 (c), com $I_x = 1,42 \times 10^5 \text{ mm}^4$ e uma massa de $0,9 \text{ kg.m}^{-1}$ (Bosch Rexroth AG, 2016). Para as dimensões definidas do sistema a ser estudado é necessário que os perfis de alumínio alinhados com o eixo “x” tenham 540 mm de comprimento, coincidindo com os lados do exterior dos perfis de alumínio alinhados com o eixo “y” que estão posicionados na posição mais afastada do centro da máquina. A ligação é feita graças ao elemento representado na Figura 5.30 que, segundo o mesmo catálogo, resiste a uma força pontual vertical máxima de 600 N.

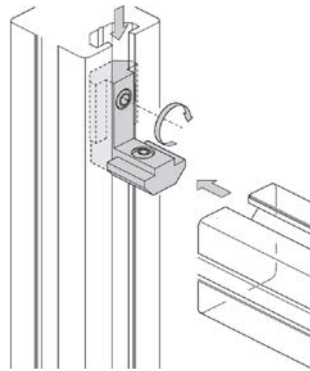


Figura 5.30 – Representação do elemento de ligação entre os vários perfis de alumínio. Adaptado de (Bosch Rexroth AG, 2016).

Cada módulo de deposição exerce 11 N de força em cada carril e este, por estar fixo ao perfil de alumínio que o suporta, causa uma força nos apoios de metade deste valor em cada um, ou seja, 5,5 N. Multiplicando este valor por quatro módulos resulta que a força do peso dos módulos de deposição é, no máximo de 22 N em cada apoio. Como a massa da cremalheira é de 800 g e a massa do membro que a suporta é de 400 g a força do peso que resulta destes é de 11,772 N. Mas que, pela mesma razão enunciada anteriormente, tem de ser dividido por dois para se obter a força em cada apoio, ou seja, 5,886 N. Somando este valor a 22 N e aos 0,1034 N da fixação entre a cremalheira e o perfil de alumínio obtém-se, aproximadamente, 28 N que é bastante inferior ao limite da fixação entre os dois perfis.

Tal como demonstrado na Figura 5.31 (a), os perfis de alumínio dispostos segundo o eixo “x” estão posicionados sobre perfis de alumínio 20x20 com ranhura de 6 mm (Figura 5.26 (a)) verticais, com $I_x = 0,7 \times 10^4 \text{ mm}^4$ e uma massa de $0,4 \text{ kg.m}^{-1}$, tal como referido em Bosch Rexroth AG (2016). O elemento de ligação utilizado será o mesmo que no caso anterior, mas os esforços a que este elemento está sujeito são bastante inferiores visto o peso estar todo sobre o próprio perfil vertical. Cada perfil de alumínio alinhado com o eixo “x” está sujeito a deflexões causadas pelos perfis de alumínio alinhados com o eixo “y” fixos no centro do primeiro e pelas guias lineares que têm a função de garantir a verticalidade do módulo de impressão. A guia, tal como referido anteriormente, tem uma massa de 229 g, o que representa um peso de, aproximadamente, $F_{gl} = 2,25 \text{ N}$.

Como os elementos verticais têm uma largura de 20 mm e a fixação se dá no centro, considera-se que o comprimento do perfil disposto segundo o eixo “x” que está sujeito a deflexão é apenas de 520 mm. Na Figura 5.31 (b) é apresentado o diagrama de corpo livre destes perfis, onde também se considerou que este elemento tem uma fixação que equivale a apoios simples para ter uma margem de segurança no projeto.

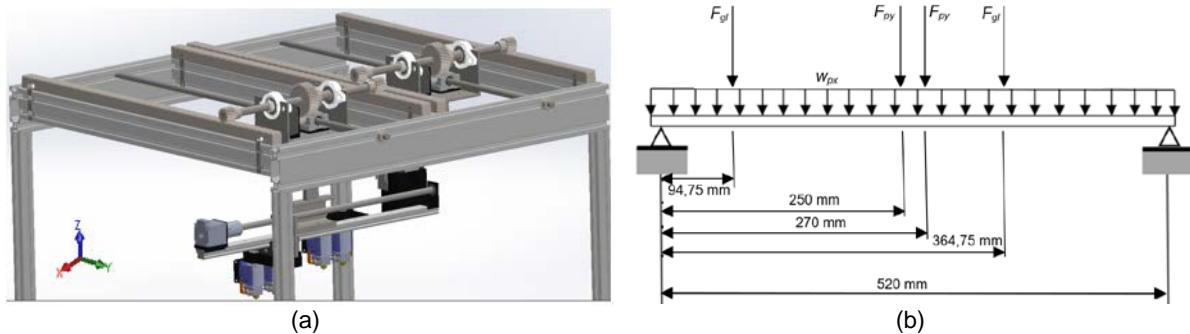


Figura 5.31 – (a) Modelo dos elementos de suporte dos módulos de deposição. (b) Diagrama de forças sobre o perfil de alumínio disposto segundo o eixo “x”.

Para além da força do peso das guias lineares, há também o peso do perfil de alumínio disposto segundo o eixo “y” e todos os elementos que este suporta, $F_{py} = 28 \text{ N}$ e a força distribuída da correspondente ao peso próprio do elemento que é $w_{px} \approx 8,8 \text{ N.m}^{-1}$.

O cálculo da deflexão máxima deste componente, que coincide com o centro do mesmo, foi calculado recorrendo à equação (5.7) para a carga distribuída, à equação (5.8) para as cargas aplicadas à direita do ponto de deflexão máxima e à equação (5.9) para as cargas à esquerda desse ponto. O resultado final desta deflexão é de 0,018 mm e que somado à deflexão total máxima dos elementos anteriores resulta em 0,066 mm, inferior aos 0,1 mm definidos para o projeto.

Os elementos verticais, por estarem sujeitos a forças de compressão, têm de ser analisados quanto à sua instabilidade. Recorre-se à equação (5.10) para se perceber em que regime se encontra este elemento, utilizando $C = 1$ para garantir que o projeto tem margem de segurança:

$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = \sqrt{\frac{2C\pi^2 E}{\sigma_c}} \approx 75,1 \quad (5.10)$$

Onde l corresponde ao comprimento do componente em mm, k ao seu raio de giração em mm, C a constante que depende da fixação deste, E o módulo de Young do material em MPa e σ_c a tensão de cedência deste em MPa.

Para se poder utilizar a equação (5.11) para o cálculo do valor da força crítica é necessário que $\frac{l}{k} > \left(\frac{l}{k}\right)_1$. O comprimento deste elemento é de 502 mm e o valor k , tal como explicado em Budynas e Nisbett (2011), é igual a. Bosch Rexroth AG (2016), refere que o valor do momento de inércia de área é de 7000 mm⁴ e a área da sua secção é de 163,31 mm², o que implica que k é igual a 6,55 mm. Deste modo, $\left(\frac{l}{k}\right) \approx 76,7$ que é superior a $\left(\frac{l}{k}\right)_1$, portanto é possível utilizar a equação (5.11) para o cálculo da força crítica, tal que:

$$F_{cr} = \frac{C\pi^2 E A k^2}{l^2} \approx 20 \text{ kN} \quad (5.11)$$

Existem quatro elementos verticais que suportam todos os componentes referidos. A distribuição do peso sobre estes é, aproximadamente, equitativa o que faz com que o peso dos dois perfis de alumínio, $P_{px} = 9,6 \text{ N}$, e o peso dos restantes componentes, $P_{pc} = 224 \text{ N}$, tenham de ser divididos por quatro para estudar os esforços sobre os elementos verticais. Como tal:

$$F_z = \frac{P_{px} + P_{pc}}{4} = 58,4 \text{ N}$$

Que é bastante inferior ao valor da força crítica, pelo que o elemento não entra em instabilidade.

Visto todos os elementos estar projetados para o bom funcionamento da máquina, estes serão utilizados e a sua massa máxima total é de, aproximadamente, 24,6 kg.

5.7. Mesa de impressão

A mesa de impressão, tal como referido anteriormente, será composta por várias mesas de impressão de menores dimensões (200 mm x 200 mm), chamados módulos de plataforma, que poderão ser posicionados de acordo com as várias posições pré-definidas que estiverem livres e, dando assim, o formato pretendido para a mesa de impressão.

O aquecimento de cada plataforma de impressão será feito graças a um elemento com o nome de *Kapton*, comercializado pela Omega, que consiste num aquecedor elétrico flexível incorporado numa película de poliamida (Figura 5.32 (a)), com capacidade para aquecer até a uma temperatura de 149 °C. A película com a referência KH-808/10-P tem as dimensões exatas que se pretende para cada plataforma de impressão e tem adesivo para permitir que esta fique fixa (<https://goo.gl/Hs82RX>).

Para não danificar esta película foi adicionado um vidro, representado na Figura 5.32 (b), ao qual a película estará fixa, com largura e comprimento de 200 mm e espessura de 4 mm. Outra função deste componente é aumentar a rigidez da plataforma, pois tem um módulo de *Young* $E = 46,2 \text{ GPa}$ (Budynas e Nisbett, 2011) e tem um momento de inércia de área de 1067 mm⁴ segundo o eixo "x", calculado no *Solidworks*. A massa deste componente é de 393 g e a sua fixação é feita através de quatro furos para parafusos M4x25 mm de cabeça de embeber. A superfície do vidro permite que o plano da cabeça dos parafusos seja coincidente com o plano da plataforma, garantindo assim a precisão do fabrico. Estes parafusos, à semelhança dos sistemas mais comuns e menos dispendiosos, terão uma mola entre o vidro e o componente a que este está fixo para permitir a calibração da plataforma, apertando ou desapertando o parafuso.

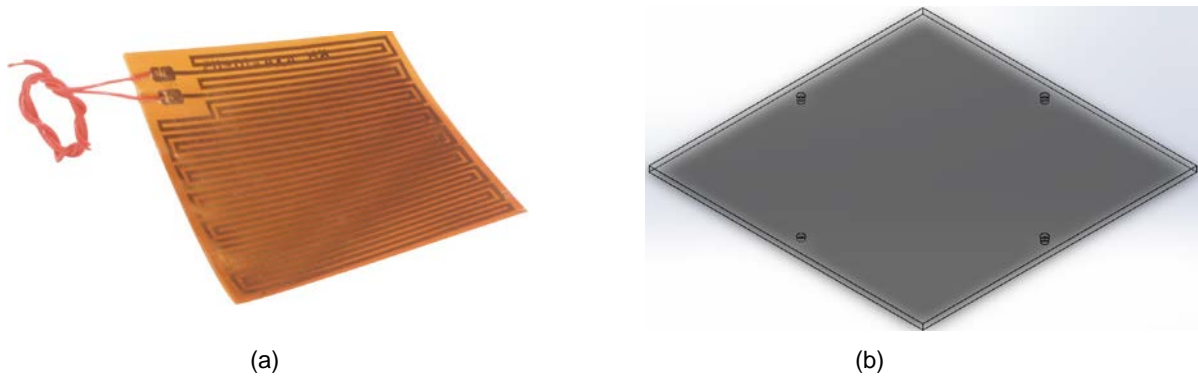


Figura 5.32 - Elementos do módulo de plataforma. (a) Película de poliamida. Retirado de <https://goo.gl/Hs82RX>.
(b) Modelo do vidro.

Para o cálculo das deformações considerou-se a deposição de ABS em toda a área da plataforma e segundo toda a altura disponível, ou seja, assumiu-se a deposição de material numa área de 200 mm por 200 mm numa altura de 250 mm, que resulta num volume de 10.000 cm³. Como a densidade do material é de 1,04 x 10⁻⁶ kg.mm³ (<https://goo.gl/ZyhuoL>), multiplica-se este valor pelo anterior e obtém-se que a massa máxima que se pode depositar sobre a plataforma é de 10,4 kg. Deste modo, o peso máximo criado por material depositado é $P_{ABS} = 102 \text{ N}$.

Recorreu-se ao *software Siemens NX* para perceber o comportamento deste elemento, tendo sido definidos os apoios como apoios simples e a força aplicada como uma pressão. Essa pressão é calculada dividindo a força do peso aplicada pela área da plataforma, ou seja, 2551 Pa.

A esta pressão foi adicionada também a pressão resultante da massa do vidro, que foi calculada multiplicando a massa deste pela aceleração gravítica, resultando em $P_{vidro} \cong 3,852 \text{ N}$, e dividindo, de seguida, este valor pela sua área, onde $p_{vidro} = 96,3 \text{ Pa}$.

Somando ambos os valores obtém-se $p_t = p_{ABS} + p_{vidro} = 2,647 \text{ kPa}$.

Com os valores calculados procedeu-se à simulação apresentada na Figura 5.36 (a) e obteve-se os resultados apresentados na Figura 5.36 (b).

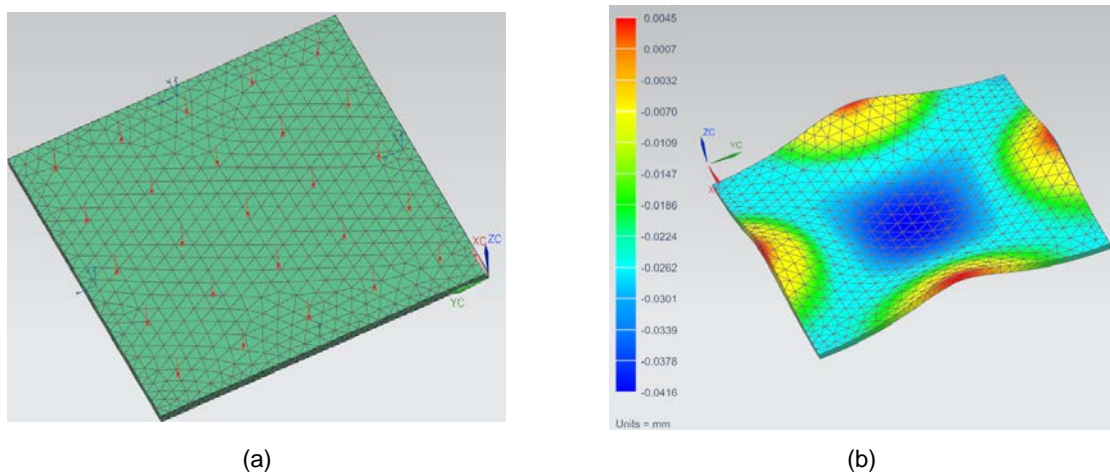


Figura 5.33 - Análise do vidro da plataforma em *Siemens NX*. (a) Simulação. (b) Resultados.

Na Tabela 5.7 são apresentados os resultados das deflexões nos 3 pontos do vidro com maior interesse de estudo: o seu centro; os seus cantos; e no centro entre os apoios do vidro. As deflexões

calculadas para o vidro terão de ser compatibilizadas com as deflexões calculadas do sistema de deposição, visto que em alguns casos existe benefícios para a qualidade da peça. Na mesma tabela são apresentados também os valores das deflexões de todos os componentes dos módulos de deposição e da estrutura que os suporta para permitir o cálculo dos valores totais.

Tabela 5.7 – Deflexões totais do sistema em diversos pontos.

	Centro do vidro	Cantos do vidro	Entre apoios
Estrutura de deposição	-0,052 mm	-0,065 mm	-0,065 mm
Vidro da mesa de impressão	-0,042 mm	-0,026 mm	0,005 mm
Total	-0,094 mm	-0,091 mm	-0,06 mm

Da Tabela 5.7 retira-se que o valor da deflexão máxima se dá quando a cabeça de deposição se encontra a depositar material no centro da mesa de impressão e tem o valor de 0,094 mm, que é inferior ao valor especificado de 0,1 mm.

Os parafusos que fixam o vidro irão uni-lo a uma chapa de aço inoxidável quinada, representada na Figura 5.34 (a), através de quatro furos no topo de cada componente. Esta base de aço inoxidável tem ainda quatro furos no centro para fixar o motor que vai servir de atuador linear deste componente e 4 furos em cada lado para fixar as uniões das guias lineares. A sua massa é de 559 g.

A fixação às guias lineares verticais é realizada graças a quatro blocos de aço inoxidável (Figura 5.34 (b)) divididos ao meio, um em cada canto da base, que têm um furo de diâmetro de 8 mm no centro destes para permitir a fixação ao veio e têm dois pares de furos que atravessam toda a peça, perpendiculares entre si, para permitir a fixação à base e à guia linear.

Para se fabricar este componente é necessário ter um bloco com 35 mm de largura, 35 mm de comprimento e 15 mm de altura. No centro da base do paralelepípedo, de altura igual a 15 mm, é feito um furo com diâmetro igual a 8 mm. Em seguida, num dos lados são realizados dois furos de diâmetro igual a 4 mm que atravessam toda a peça, com os centros distanciados em 29 mm entre si, distanciados 3,75 mm da base e distanciados 3 mm do lado perpendicular mais próximo. Dois furos semelhantes são efetuados nos lados perpendiculares aos primeiros, mas distanciados 3,75 mm da base contrária à referida para o caso anterior. Por fim, o bloco é dividido ao meio, formando dois paralelepípedos triangulares. O corte, ao ser efetuado, retira material implicando que o furo central não seja perfeitamente circular ao juntar os dois componentes e, conseqüentemente, permitindo a fixação das guias lineares com o aperto de parafusos.

As guias lineares com diâmetro de 8 mm têm um comprimento de 385 mm e são fabricadas, também, em aço inoxidável 304, representadas na Figura 5.34 (c). Estes componentes têm a função de impedir que a rotação imposta pelo motor faça girar a plataforma de impressão, possibilitando que o movimento desta seja ascendente ou descendente, e também têm a função de garantir a horizontalidade da plataforma de impressão, sendo estes os componentes que oferecem reação a forças normais a estes. No entanto, para permitir que o componente execute as funções para o qual foi projetado é necessário utilizar chumaceiras de rolamento lineares, que não têm grande influência no movimento vertical da plataforma, mas que, devidamente fixas, impedem movimentos em qualquer outro sentido.

As chumaceiras de rolamento lineares utilizadas são semelhantes às chumaceiras de rolamento que tem a função de impedir que o módulo de deposição tenha um movimento pendular, cujas informações estão disponíveis na Figura 5.21 e na Tabela 5.5. Para cada guia linear são utilizadas duas chumaceiras de rolamento, com uma separação de 44 mm entre estas, permitindo que a plataforma se movimente ao longo dos 250 mm definidos e também que seja possível remover ou colocar o módulo de plataforma na posição correta. A utilização de duas chumaceiras de rolamentos em cada guia é justificada pela diminuição dos movimentos transversais ao eixo “z” da plataforma de deposição pois, para além das guias sofrerem deflexão devido à sua rigidez, as próprias chumaceiras de rolamento têm uma margem de movimentos nestas direções.

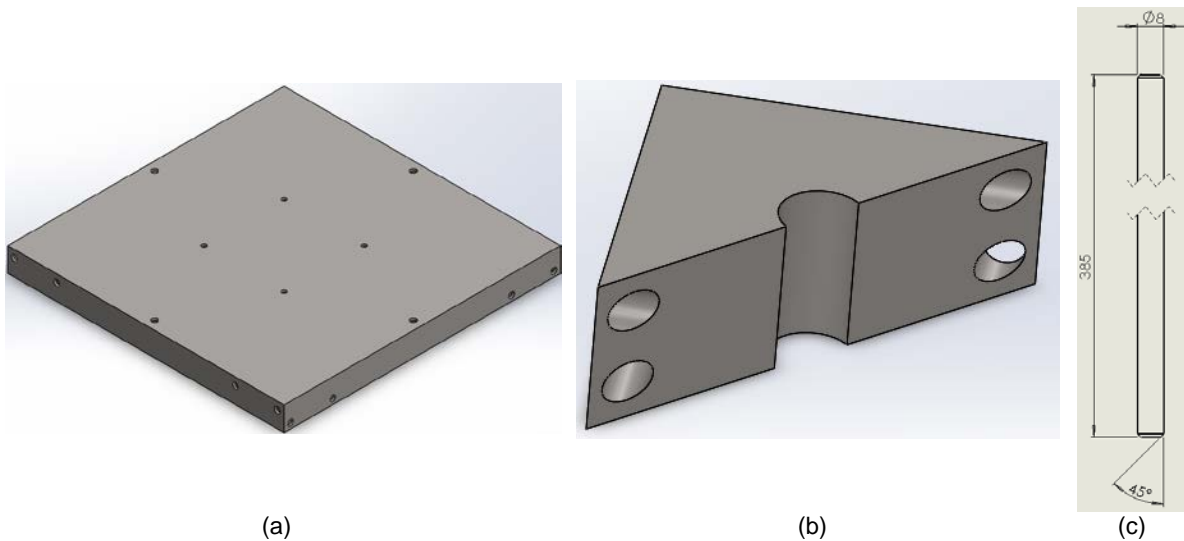


Figura 5.34 – (a) Modelo da base de aço inoxidável do módulo de plataforma. (b) Modelo do componente que forma o bloco de fixação da guia linear. (c) Guia linear.

Para fixar estes elementos à estrutura criou-se um componente, representado na Figura 5.35 (a), que consiste numa chapa de alumínio quinada em forma de “L” com 3 mm de espessura com quatro furos M4 num dos lados, para permitir a fixação à chumaceira de rolamentos, tal como exemplificado na Figura 5.35 (b), e no outro lado dois furos M4 para permitir a fixação à estrutura através das porcas referenciadas em Bosch Rexroth AG (2016).

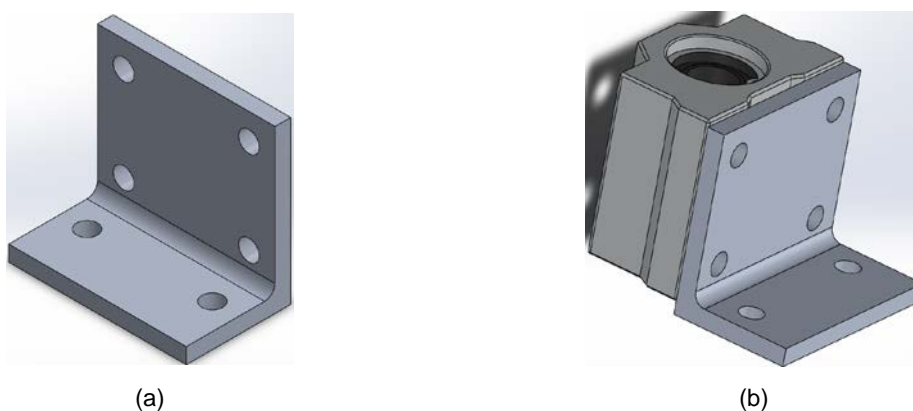


Figura 5.35 – (a) Modelo do componente em “L” de ligação da chumaceira de rolamento linear. (b) Modelo da montagem do componente em “L” e da chumaceira de rolamento.

O movimento linear da plataforma será realizado através de um fuso com um motor de passo unido à plataforma de impressão e uma porca para o fuso que está unida à estrutura.

À semelhança do sistema de atuação linear na direção do eixo “x”, o fuso tem uma rosca de quadrupla entrada, um passo de 2 mm e um diâmetro de 8 mm. Este componente é fabricado em aço inoxidável 304. A sua massa é de 0,4 kg por cada metro de comprimento enquanto que a porca é fabricada em cobre. O coeficiente de atrito estático entre estes dois materiais é de $\mu_e^{A-C} = 0,23$.

O motor utilizado será o motor LDO-35STH26-0284, tal como utilizado para a movimentação segundo o eixo “y” do módulo de deposição, estando as informações sobre este presentes na Figura 5.19 e na Tabela 5.4. No entanto, para fixar este à plataforma de impressão foi necessário desenvolver um componente em ABS, representado na Figura 5.36 (a), cujo interior permite o encaixe com pouca folga do motor e com uma ranhura para permitir a ligação dos componentes eletrónicos deste. Para que o motor fique unido a este componente foi desenhada a chapa de aço inoxidável 304, representada na Figura 5.36 (b), com 2 mm de espessura e com furos que permitem o aparafusamento tanto ao motor como ao seu suporte.

O último elemento incorporado no módulo de plataforma é a união de veios comercializada pela *Openbuilds* (<http://goo.gl/EyODss>) e representada na Figura 5.13 (b), que permite unir o veio de diâmetro igual a 5 mm do motor de passo ao fuso com 8 mm de diâmetro.

A montagem dos componentes que unem o motor ao fuso e também à plataforma de impressão está representada na Figura 5.36 (c).

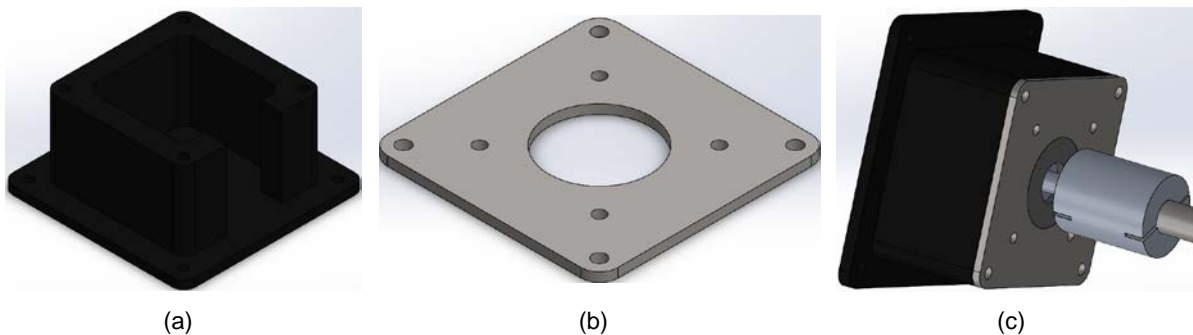


Figura 5.36 – Modelo de componentes que permitem a união do motor ao fuso à plataforma de impressão.

(a) Suporte do motor. (b) Chapa de fixação. (c) Montagem.

Deste modo cada módulo de plataforma é constituído por um vidro, uma película de aquecimento, uma base de aço inoxidável, quatro blocos de fixação a guias lineares, quatro guias lineares, um motor de passo com os respetivos elementos de suporte, um fuso de 8 mm de diâmetro e 333,5 mm de comprimento e uma união de veios. A massa combinada destes componentes é de 2,429 kg, resultando numa força do peso, $P_{mp} \cong 23,83 N$.

A deposição de material é iniciada com a plataforma na sua posição mais alta, em $z = 252,7$ mm, e terá a sua progressão no sentido descendente durante toda a deposição até se atingir $z = 0$ mm, mesmo que se tenha terminado o fabrico da peça num instante de tempo anterior. Foi definido que a altura máxima da peça a fabricar seria de 250 mm, pelo que os 2,7 mm adicionados a este valor permitem que a peça seja retirada sem haja colisões entre esta e o módulo de deposição.

Apesar do movimento descendente ser feito com material depositado em cima da plataforma, o movimento ascendente não deve ser realizado da mesma maneira, pelo que a força exercida na direção e sentido positivo do eixo “z” é igual a P_{mp} . Utilizando a equação (5.2) é possível calcular a força tangencial que o fuso tem de fornecer para elevar o módulo de plataforma sem qualquer material depositado nesta:

$$P_R = F \times \frac{\mu_e \cos \lambda + \sin \lambda}{\cos \lambda - \mu_e \sin \lambda} = 14,1 \text{ N}$$

Multiplicando este valor pelo raio do fuso obtém-se o binário que o motor tem de exercer, B_r , que é de 56 N.mm. Este valor é atingido pelo motor pois este tem, por exemplo, um ponto de funcionamento de 60 N.mm a 2,75 rot.s⁻¹.

Por outro lado, o movimento descendente inclui a força do peso do material depositado que, no limite, corresponde a $P_{ABS} = 102 \text{ N}$, perfazendo um total de $F_R = P_{md} + P_{ABS} = 126 \text{ N}$. Quando a rotação do fuso se dá no sentido de movimentar um objeto na direção e sentido da força do peso deste Budynas e Nisbett (2011) sugere a utilização da seguinte equação para calcular a força tangencial necessária para o fazer:

$$P_L = F \times \frac{\mu_e \cos \lambda - \sin \lambda}{\cos \lambda + \mu_e \sin \lambda} = -10,4 \text{ N} \quad (5.12)$$

Onde P_L representa a força tangencial aplicada no fuso num movimento ascendente em N, F é a força aplicada neste, na direção axial, em N, μ_e corresponde ao coeficiente de atrito estático entre o fuso e a porca e λ representa o ângulo de avanço.

O que, multiplicando pelo raio do fuso, resulta num binário, B_L , de -41,5 N.mm. O sinal negativo deve-se ao fato do fuso não ser autoblocante e, portanto, a força do peso imposta sobre este faz com que o fuso gire e o módulo desça sem ser exercida uma força externa. Para manter o módulo na posição desejada, o motor tem de exercer um binário de 41,5 N.mm no sentido contrário ao que faria os componentes terem um movimento descendente. Como o binário a que o motor pode estar sujeito sem que haja rotação é de, aproximadamente, 98 N.mm (<https://goo.gl/DvbeZC>), o movimento do módulo de plataforma é totalmente controlado.

Na Figura 5.37 está representado o módulo de plataforma utilizado neste sistema.



Figura 5.37 – Modelo do módulo de plataforma.

5.8. Estrutura de suporte da mesa de impressão

A porca responsável por transformar o movimento angular do fuso em movimento linear do conjunto tem de estar fixa a um componente da estrutura para que tal aconteça. Utilizou-se um perfil de alumínio 20x20 com ranhura de 6 mm (Figura 5.38 (a)) (Bosch Rexroth AG, 2016). O comprimento deste é de 90 mm e a ligação deste ao resto da estrutura é feita através do elemento de ligação apresentado na Figura 5.30.

O diâmetro exterior da porca tem 10,2 mm de diâmetro e os seus furos para aparafusamento permitem a utilização de parafusos M3.5. Por estas razões tem de se criar um furo de diâmetro igual a 10,2 mm no centro do perfil de alumínio e quatro furos de diâmetro igual a 4 mm, tal como exemplificado na Figura 6.39 (a), de modo a permitir a fixação dos dois elementos (Figura 5.38 (b)).

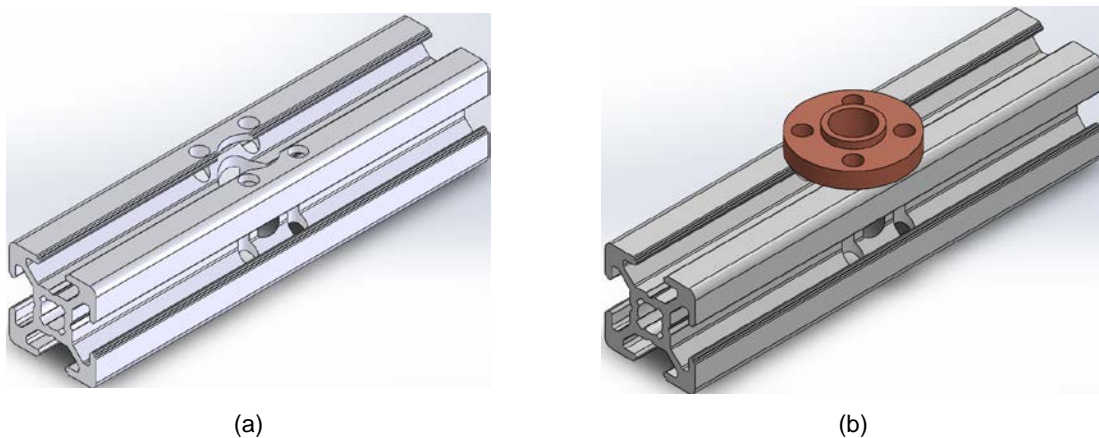


Figura 5.38 - Perfil de alumínio no qual está fixa a porca. (a) Modelo. (b) Montagem.

Este perfil de alumínio está identificado com o número 1 na Figura 5.39 e está disposto segundo o eixo “y” da máquina. Este é fixo, com os mesmos elementos de ligação atrás referidos, a dois outros perfis de alumínio, um em cada extremo, que estão dispostos segundo o eixo “x” e atravessam a máquina. Os perfis, de dimensões 20x40 com ranhura de 6 mm (Figura 5.26 (b)) têm um comprimento de 500 mm. Na Figura 5.39 estes elementos estão identificados com o número 2. Cada par de perfis, para além de suportar cada módulo de deposição, tendo em conta o material depositado e a estrutura que o suporta na direção do eixo “y”, suporta também as chumaceiras de rolamento lineares onde trabalharam as guias lineares dos módulos.

O suporte destes perfis de alumínio é feito através da ligação a outros perfis de alumínio, disposto segundo o eixo “y”, com 500 mm de comprimento (identificados com o número 3 na Figura 5.39). Estes correspondem a perfis 20x60 com ranhura de 6 mm (Figura 5.26 (c)). O seu posicionamento é coincidente com os extremos dos perfis de alumínio de suporte dos módulos de plataforma, estando no mesmo plano yz que os perfis de suporte das cremalheiras posicionados nos extremos.

Os dois perfis de alumínio 20 x 60 (número 3) são fixos a perfis 20 x 20 dispostos segundo o eixo “x” (identificados com o número 4 na Figura 5.39), que estão posicionados sob os perfis verticais (identificados com o número 5 na Figura 5.39) de suporte aos módulos de cabeça de impressão e sobre

perfis de iguais dimensões também verticais. Os componentes horizontais, por estarem sujeitos a esforços muito reduzidos, não necessitam de ser estudados.

Deste modo, e adicionando quatro perfis de alumínio na base do sistema, para garantir a sua estabilidade, obtém-se a estrutura final do sistema, representada na Figura 5.2. Os perfis são 20 x 20 com uma ranhura de 6 mm e dois têm um comprimento de 540 mm e os outros dois têm um comprimento de 500 mm.

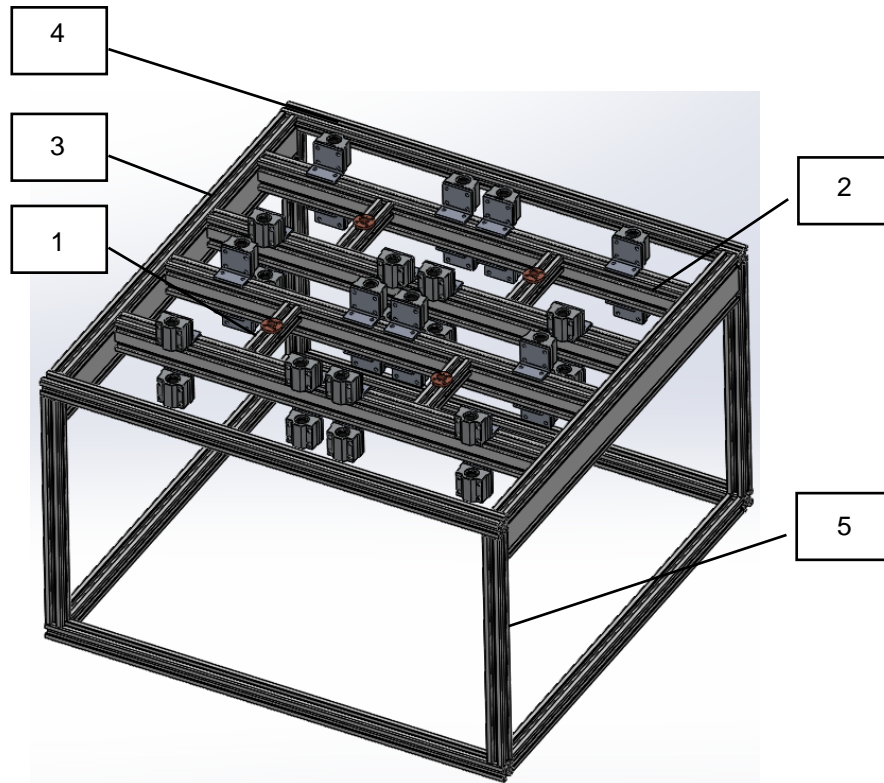


Figura 5.39 - Estrutura de suporte da mesa de impressão.

5.9. Resultados

Analisando os resultados obtidos é possível observar que, somando os valores das deflexões do módulo de deposição aos valores das deflexões do vidro do módulo de plataforma em vários pontos, a deflexão máxima se dá no centro da plataforma de impressão e tem o valor de 0,094 mm, que é aproximado, mas inferior, ao máximo especificado de 0,1 mm. Todas as restantes especificações foram validadas ao longo do documento, em especial as especificações de aceleração e velocidade das cabeças de impressão que, em conjunto com um programa de controlo que otimize as trajetórias, permite que o tempo de fabrico das peças seja aproximado a peças de menor escala nos sistemas de deposição mais comuns.

Por o sistema, representado na Figura 5.1, ser constituído por vários módulos de plataforma (Figura 5.3 (a)) e vários módulos de deposição (Figura 5.3 (b) e (c)), cujas fixações ao sistema são as mínimas para garantir uma precisão adequada, e por haver várias posições para cada módulo, conclui-se que o sistema de fabrico aditivo é reconfigurável. O valor da massa deste é, aproximadamente, 43,16 kg e, considerando todos os componentes do sistema, tem dimensões gerais de 654 mm x 570 mm x 944 mm.

6. Conclusões e desenvolvimentos futuros

Este documento resulta da conceção, projeto e desenvolvimento de todos os componentes mecânicos que compõem um sistema de fabrico aditivo inovador com múltiplas cabeças de impressão e múltiplas mesas de impressão.

Este sistema caracteriza-se por melhorar, de forma significativa, o tempo de fabrico de uma ou várias peças e da dimensão destas, mantendo a sua qualidade superficial e as suas características mecânicas. Este, por ser reconfigurável e modular, tanto ao nível dos módulos de deposição como ao nível de módulos de plataforma, tem como vantagem poder adaptar-se às necessidades de fabrico.

Para além de permitir o fabrico de uma peça de elevadas dimensões, através da utilização de múltiplas cabeças de impressão simultaneamente para esta tarefa, o sistema proposto possibilita o fabrico de múltiplas peças de dimensões mais reduzidas, iguais ou diferentes, simultaneamente.

O sistema de módulos de plataforma proposto introduz vantagens económicas visto reduzir a necessidade de material de suporte, para certas geometrias de peça a ser fabricada, e também por permitir que a máquina maximize a sua eficiência, não tendo de haver tempos de espera para o fabrico de peças em certas situações onde já se encontra a decorrer deposição. O sistema de módulos de deposição proposto permite que seja feita uma alocação destes módulos de modo a minimizar o tempo total de fabrico de uma peça, tendo em conta as dimensões desta.

Devido à sua versatilidade e a ter uma estrutura escalável, o sistema concebido é aplicável em várias indústrias, tanto a nível de prototipagem rápida como a nível de fabrico rápido de ferramentas. Por se poder fabricar simultaneamente várias peças que poderiam ser fabricadas por um sistema mais comum, o tempo de ciclo do fabrico de cada uma resulta, no limite, do quociente entre o tempo de fabrico unitário e o número de módulos de deposição utilizados no fabrico, o que aumenta a utilização de certas tecnologias de AM numa indústria de produção em massa.

Apesar deste sistema ter sido projetado para a tecnologia de FDM, a sua configuração permite que, com as devidas alterações, qualquer tecnologia de fabrico aditivo que seja realizada por deposição de material tenha a possibilidade de ser incorporada no mesmo, de maneira concorrente ou não com outras tecnologias.

Tendo em conta o trabalho realizado, é perceptível que um sistema semelhante a este e com estes mecanismos não existe atualmente em registo de propriedade intelectual nem a ser comercializado. Por ser uma solução inovadora, em conjunto com um programa de controlo, o sistema proposto encontra-se em fase de proteção industrial.

A nível conceptual, a máquina foi decomposta em sub-sistemas: uma estrutura rígida, um conjunto de módulos de deposição e um outro conjunto de módulos de plataforma. Para cada elemento da divisão procedeu-se ao desenho e projeto dos vários componentes mecânicos que os constituem, respeitando os requisitos e especificações iniciais.

Fabricando o protótipo sugerido neste documento, tem interesse verificar qual o efeito na peça final criado pelas deflexões dos componentes, de modo a validar o cumprimento das especificações. Por fim, deve ser feita uma otimização do sistema, reduzindo as dimensões dos módulos de deposição para que seja possível utilizar mais módulos simultaneamente, aumentando a velocidade de fabrico, e também um aumento da espessura do vidro.

7. Bibliografia

3D Printing for Beginners (2014). A Comprehensive Introduction to 3D Printing Technology. Consultado 9 de agosto de 2016, em <http://3dprintingforbeginners.com/>.

Adafruits. Linear Bearing Platform (Small) - 8mm Diameter - SC8UU. Consultado a 21 de setembro de 2016, em <https://www.adafruit.com/>.

AK Steel (2007). 304/304L Stainless Steel, *Product Data Sheet*. Retirado de http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/stainless/austenitic/304_304l_data_sheet.pdf.

ASTM Standard F2792 – 12a, "Additive Manufacturing Technologies," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012. Retirado de www.astm.org. DOI: 10.1520/F2792-12A

BigRep (2016). BigRep One. Consultado a 17 de agosto de 2016, em <https://bigrep.com/>

Bosch Rexroth AG (2016). Aluminum Structural Framing System. Retirado de <https://goo.gl/A05f5h>.

Brooks, H., Lupeanu, M. E. & Piorkowski, B. (2013). Research towards high speed extrusion freeforming. *International Journal of Rapid Manufacturing*, 3(2-3), 154-171. doi:10.1504/IJRAPIDM.2013.053686.

Budynas, R. G. & Nisbett, J. K (2011). Shigley's Mechanical Engineering Design. New York: McGraw-Hill.

Choi, S. H., & Zhu, W. K. (2010). A dynamic priority-based approach to concurrent toolpath planning for multi-material layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, 42(12), 1095-1107. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2010.07.004>.

Chua, C. K., Leong, K. F., & Lim, C. S. (2003). Rapid Prototyping: Principles and Applications (2nd ed.): *World Scientific*.

CNN Money (2013). Stratasys buys Makerbot 3-D printing company for \$400 million. Consultado a 7 de agosto de 2016, em <http://money.cnn.com/>.

Cultivate 3D. The Beast – Large Format 3D Printer. Consultado a 18 de agosto de 2016, em <http://www.cultivate3d.com/>.

Cunico, M. W. M. (2013). Study and optimisation of FDM process parameters for support-material-free deposition of filaments and increased layer adherence. *Virtual and Physical Prototyping*, 8(2), 127-134. DOI:10.1080/17452759.2013.790599.

E3D. v6 HotEnd Full Kit - 1.75mm Universal (with Bowden add-on) (12v). Consultado a 27 de agosto de 2016, em <http://e3d-online.com/>.

Economist (2012). A third industrial revolution. Consultado a 4 de outubro de 2016, <http://www.economist.com/>.

Engineering (2016). Wohlers Report 2016 and the Billion Dollar 3D Printing Industry. Consultado a 4 de outubro de 2016, <http://www.engineering.com/>.

Espalin, D., Alberto Ramirez, J., Medina, F. & Wicker, R. (2014) 'Multi-material, multi-technology FDM: Exploring build process variations', *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), pp. 236–244. doi: 10.1108/rpj-12-2012-0112.

Frutuoso, N. (2016). *Tool-path Generation for a Multiple Independent Print Head System for Fused Deposition Modelling* (Dissertação de mestrado não publicada). Técnico Lisboa, Universidade de Lisboa, Lisboa.

FYH (2015). Mounted Bearing Units. Retirado de <http://www.fyhbearings.com/html/catalog/fyhcat.pdf> em 21 de setembro de 2016.

Gebhardt, A. (2011). Layer Manufacturing Processes: *Understanding Additive Manufacturing*. Munique, Alemanha. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2009). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing* (2nd ed.). Vitória, Austrália. Springer Publishing Company, Incorporated.

Hopkinson, N, Hague, R. & Dickens, P. (2006). *Rapid Manufacturing An Industrial Revolution for the Digital Age*. West Sussex, England. John Wiley & Sons LTD.

Igus. igubal® clip-type spherical bearing ECLM. Consultado a 5 de setembro de 2016, em <http://www.igus.eu/>.

Iyibilgin, O., Leu, M. C., Taylor, G., Li, H., & Chandrashekhara, K. (2014). Investigation of Sparse-Build Rapid Tooling by Fused Deposition Modeling. In *Proceedings of the 25th International Solid Freedom Fabrication Symposium on Additive Manufacturing* (pp. 4-6).

Jin, Y.-a., He, Y., Fu, J.-z., Gan, W.-f., & Lin, Z.-w. (2014). Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology. *Additive Manufacturing*, 1–4, 32-47. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.004>.

Kruth, J., Leu, M. & Nakagawa, T. (1998). Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Elsevier, 47-2, 525-540. DOI:10.1016/S0007-8506(07)63240-5.

LDO Motors. 28mm Hybrid Stepper Series. Consultado a 5 de setembro de 2016, em <http://ldomotors.com/>.

Leapfrog. XCEL. Consultado a 17 de agosto de 2016, em <http://www.lpfrg.com/>.

Massivit 3D. Technology and Products. Consultado a 17 de agosto de 2016, em <http://www.massivit3d.com/>.

Rolisa (2007). Catálogo Técnico Transmissões. Maia: Rolisa Lda. Retirado de <http://www.rolisa.pt/informacoes-tecnicas/>, acessado a 16 de setembro de 2016.

Morgan. MORGAN GALLERY: Our machines. Consultado a 12 de agosto de 2016, em <http://www.morgan3dp.com/>.

Motion & Control™ NSK (2008). NSK Linear Guide™, Ball Screws, Monocarrier™, *Precision Machine Components*. Retirado de <http://www.jp.nsk.com/app01/en/ctrig/index.cgi?rm=pdfView&pno=e3162e>.

Motion & Control™ NSK (2014). NH Series, NS Series, *NSK Linear Guide™*. Retirado de <http://www.jp.nsk.com/app01/en/ctrig/index.cgi?rm=pdfView&pno=e3332a>.

Omega. Kapton® (Polyimide Film) Insulated Flexible Heaters. Consultado a 29 de setembro de em <http://www.omega.com/>.

Ooznest. BULLDOG XL EXTRUDER. Consultado a 27 de agosto de 2016, em <http://ooznest.co.uk/>.

Openbuilds Partstore. 5mm * 8mm Flexible Coupling. Consultado a 10 de setembro de 2016, em <http://openbuildspartstore.com/>.

Panda, B. N., Bahubalendruni, R., Biswal, B. B. & Leite, M. (2016). A CAD-based approach for measuring volumetric error in layered manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*.

Phidgets. 3300_0 - NEMA-11 Bipolar 32mm Mini Stepper – Discontinued. Consultado a 5 de setembro de 2016, em <http://www.phidgets.com/>

Phidgets. 3323_0 - 35STH40 NEMA 14 Bipolar Gearless Stepper. Consultado a 19 de setembro de 2016, em <http://www.phidgets.com/>.

Polar 3D. Polar 3D Printer. Consultado a 12 de agosto de 2016, em <https://polar3d.com/>.

Polulu. Stepper Motor: Bipolar, 200 Steps/Rev, 28x32mm, 3.8V, 0.67 A/Phase. Consultado a 17 de setembro de 2016, em <https://www.pololu.com/>.

Polulu. Stepper Motor: Bipolar, 200 Steps/Rev, 35x28mm, 10V, 0.5 A/Phase. Consultado a 19 de setembro de 2016, em <https://www.pololu.com/>.

Rayna, T., & Striukova, L. (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 214-224. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023>.

RepRap. ALL METAL BULLDOG LITE EXTRUDER 1.75MM. Consultado a 27 de agosto de 2016, em <http://reprap.me/>.

RepRap. Diamond Hotend. Consultado a 12 de agosto de 2016, em <http://reprap.me/>.

RepRapDiscount. Bulldog XL extruder. Consultado a 27 de agosto de 2016, em <http://www.reprapdiscount.com/>.

Sabourin, E., Houser, S.A. & Helge Bøhn, J. (1997) 'Accurate exterior, fast interior layered manufacturing', *Rapid Prototyping Journal*, 3(2), pp. 44–52. doi: 10.1108/13552549710176662.

Silva, A., Ribeiro, C. T., Dias, J. & Sousa, L., (2004). *Desenho Técnico Moderno*. Lisboa: Lidel.

SpiderBot, SpiderBot v2.2 Standard Kit. Consultado a 12 de agosto de 2016, em <http://www.spiderbot.eu/>.

Stacker. Stacker 500S Desktop 3D Printer. Consultado a 18 de agosto de 2016, em <http://stacker3d.com/>.

Stansbury, J. W., & Idacavage, M. J. (2016). 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, 32(1), 54-64. doi:10.1016/j.dental.2015.09.018.

Stratasys (2013). The Speed of Light. Retirado de <http://www.stratasys.com/resources/case-studies/automotive>, a 24 de setembro de 2016.

Stratasys. Fortus 900mc. Consultado a 17 de agosto de 2016 em <http://www.stratasys.com/>.

Sun, Q., Rizvi, G.M., Bellehumeur, C.T. & Gu, P. (2008) 'Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments', *Rapid Prototyping Journal*, 14(2), pp. 72–80. doi: 10.1108/13552540810862028.

Test Standard. ABS Material Data Sheet. Consultado a 30 de setembro de 2016, em <https://teststandard.com/>.

Thomson (2016). RoundRail Linear Guides and Components: Linear Ball Bushing Bearings ®, 60 Case Shafting ® and RoundRail Linear Guides. Retirado de http://www.thomsonlinear.com/downloads/bearings_guides/RoundRail_LinearGuides_Components_cten.pdf em 21 de setembro de 2016.

Turner, B. N., Strong, R., & Gold, S. A. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 192-204. doi:doi:10.1108/RPJ-01-2013-0012.

UGE Eletronics. END Support Pillow Block Bearing 10mm KFL000. Consultado a 21 de setembro de 2016, em <https://uge-one.com/>.

Ultimaker. Cura Software. Retirado de <https://ultimaker.com/>, a 25 de setembro de 2016.

Uzan, M., & Yakubov, I. (2015). Additive manufacturing device. Estados Unidos da América.

Wachsmuth, J. P. (2008). Multiple Independent Extrusion Heads for Fused Deposition Modeling, Tese de Mestrado, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

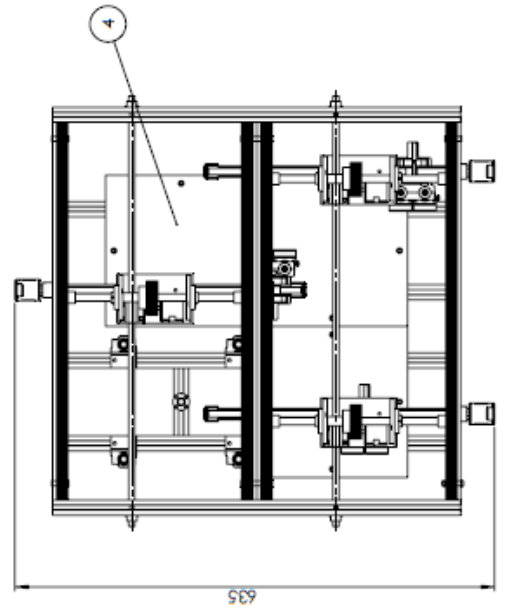
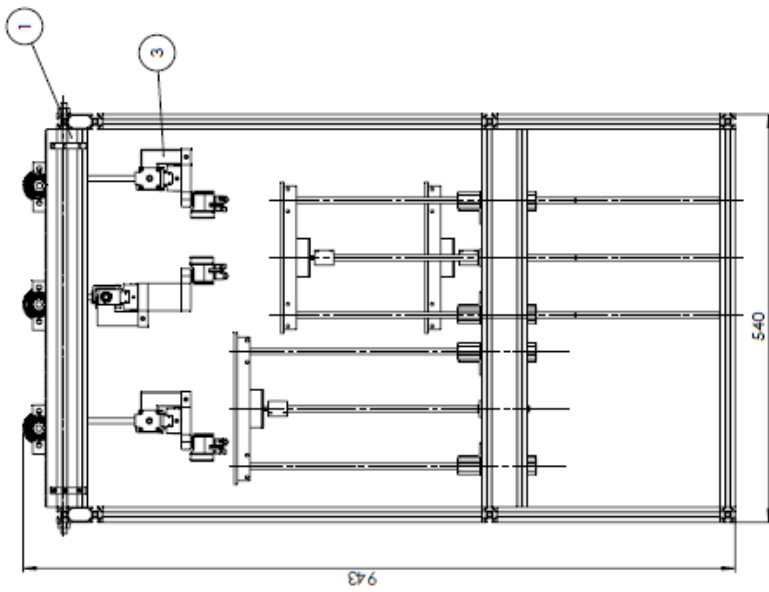
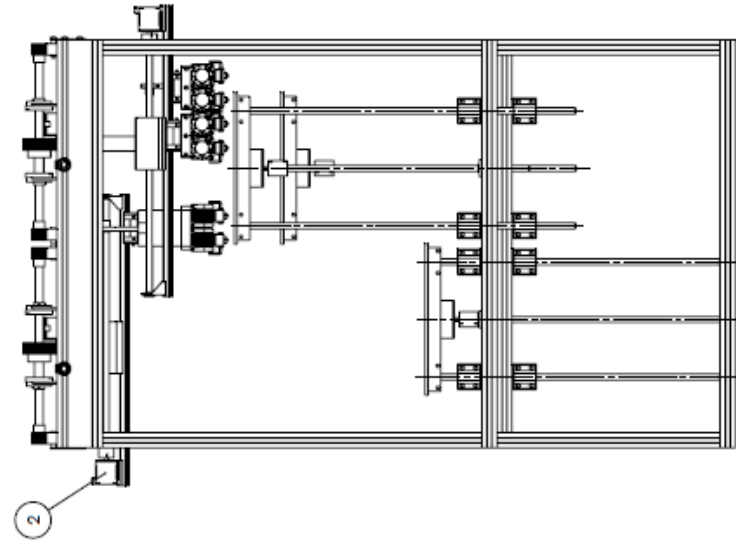
Wah, P. K., Murty, K. G., Joneja, A., & Chiu, L. C. (2002). Tool path optimization in layered manufacturing. *IIE Transactions*, 34(4), 335-347. doi:10.1080/07408170208928874.

Wang, Y. (2015). Control method and printing method of 3D printer provided with at least two printing heads. China.

Zhang, J. (2015). 3D printer with multiple rotary disc type independent spray heads. China.

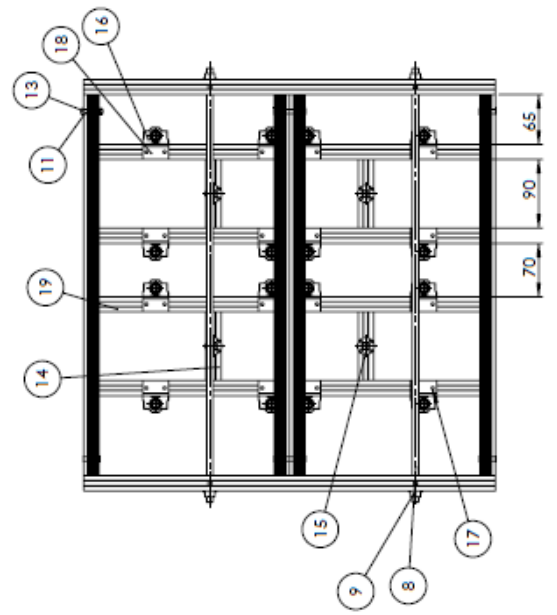
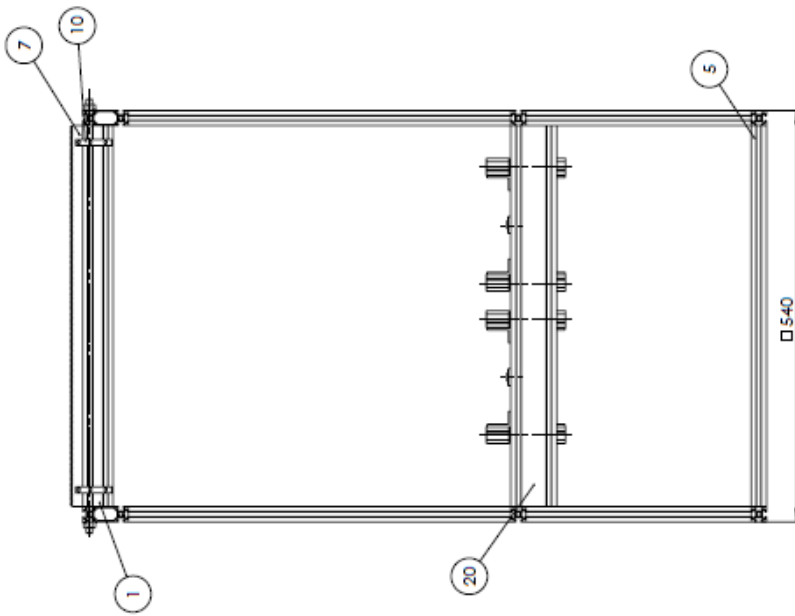
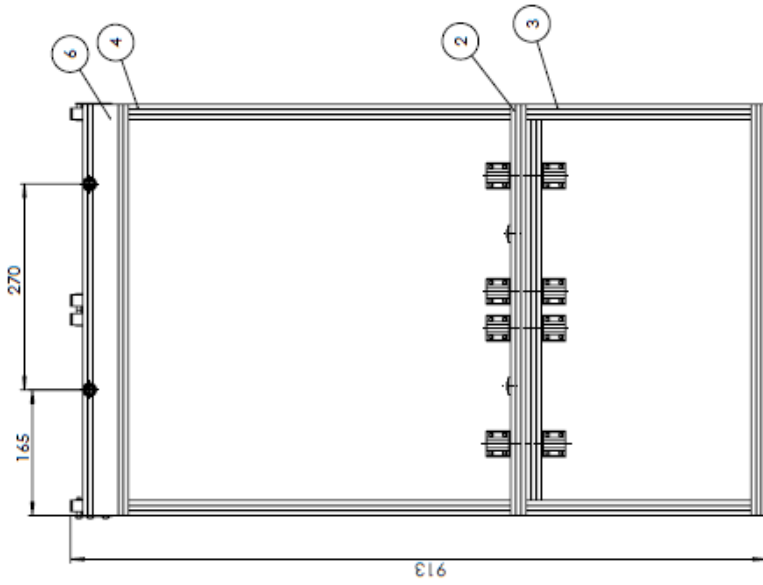
Zhu, W. M., & Yu, K. M. (2002). Tool path generation of multi-material assembly for rapid manufacture. *Rapid Prototyping Journal*, 8(5), 277-283. doi:doi:10.1108/13552540210451741.

Anexo A. **Desenhos de conjunto**



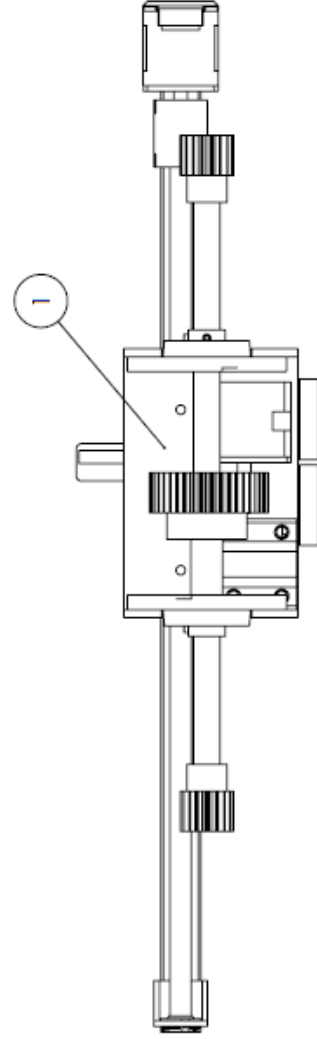
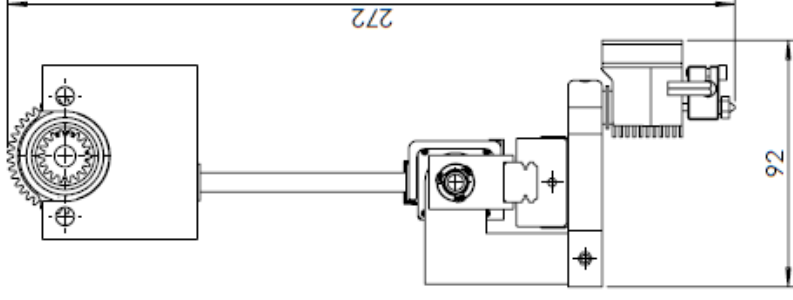
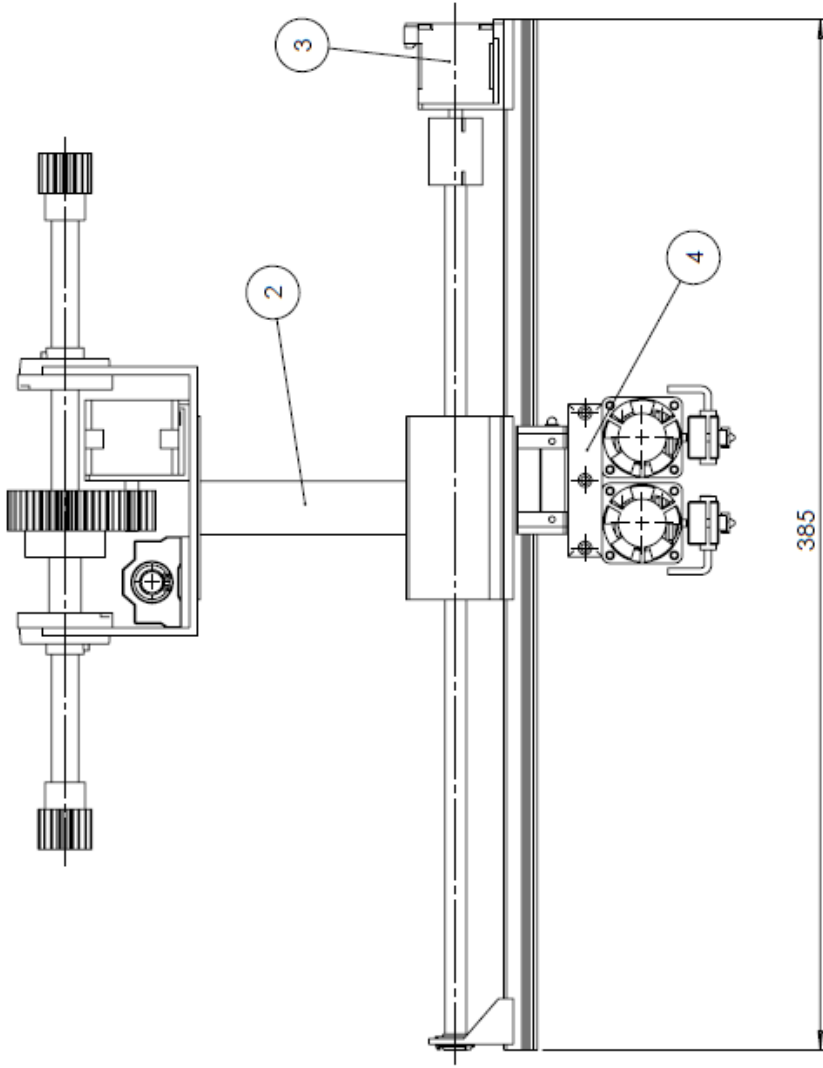
Nº	Nome	Nº Desenho	Qtd.
1	Estrutura	M01L01-002	1
2	Módulo superior de deposição	M01L01-003b	1
3	Módulo inferior de deposição	M01L01-003a	2
4	Módulo de plataforma	M01L01-004	3

Escala: 1:5 Desenho em: 1:5		Desenho e Montagem Geométrica Nome: João Bello Curso: MEMEC n.º 72842	
Autor: João Bello Revisor: João Bello Aprovado: João Bello Data: 20/12/2014		Sistema de AM modular Folha: 1 Total: 1	



Nº	Nome	Nº Desenho	Qtd.	Material	Desenhado por:
1	Perfil 20x40 sup. cremalheira		4		Bosch-Rexroth
2	Perfil 20x20 540 mm		4		Bosch-Rexroth
3	Perfil 20x20 vert. int.		4		Bosch-Rexroth
4	Perfil 20x20 vert. sup.		4		Bosch-Rexroth
5	Perfil 20x40 500 mm		2		Bosch-Rexroth
6	Perfil 20x40 sup. cremalheira		2		Bosch-Rexroth
7	ISO - Rack-spur - rectangular - 1M 20PA 1.5FW 1.5PH 500L---5AII		4		
8	Guia anti-penallulo	M11.011-025	2	AlSi 304	João Boto
9	Hexagon Flange NUT ISO - 41.61 - M8 - N		4		
10	Chapa de fixação cremalheira	M11.011-015	12	AlSi 304	João Boto
11	Anilha cremalheira	M11.011-011	8	ABS	João Boto
12	ISO 7045 - M4 x 5 - Z --- SN		4		
13	ISO 7045 - M4 x 25 - Z --- 25N		1		
14	Perfil de suporte do mod. dep. alinhado com Y		4		Bosch-Rexroth
15	Porca do fuso		4	Cobre	
16	SC8UU Block bearing		32		Adafruit
17	Porca das perfis		64		Bosch-Rexroth
18	Supporte das chumacelhas de 'z'	M11.011-028	32	AlSi 304	João Boto
19	Perfil de suporte do mod. dep. alinhado com X		4		Bosch-Rexroth
20	Perfil 20x40 sup. mod. dep.		2		Bosch-Rexroth

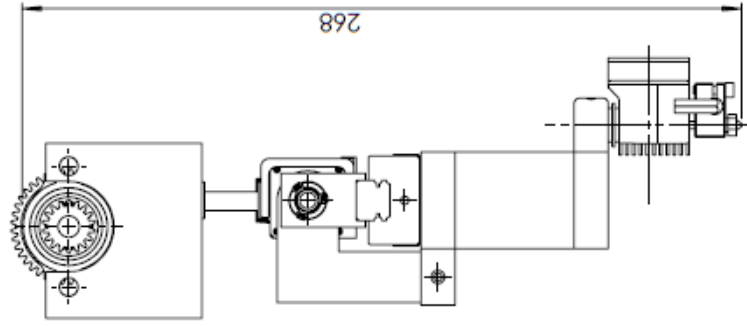
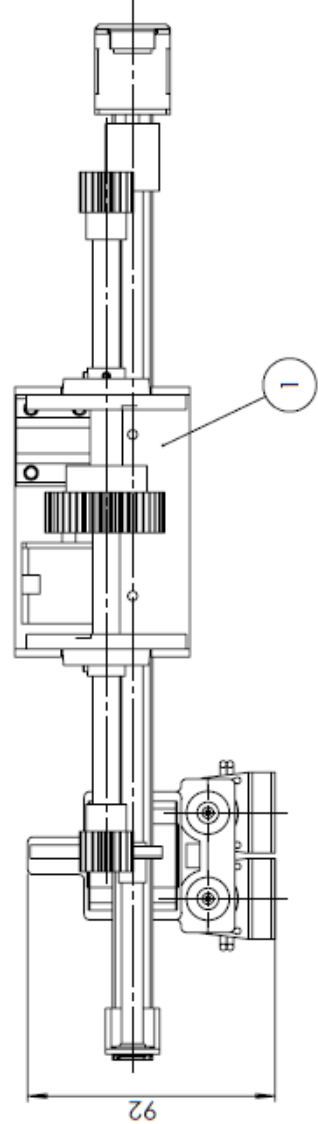
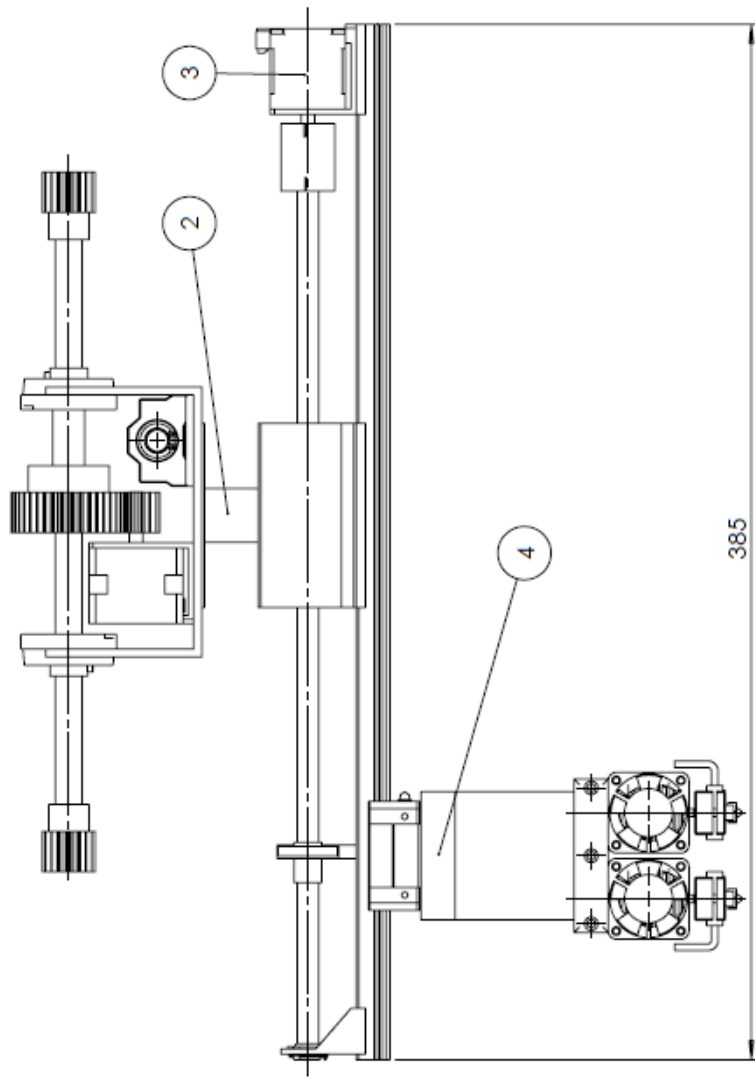
Desenho e Modelação Geométrica
 Nome: João Boto
 Curso: MEMec
 n.º 72862
 Estrutura
 Desenho de conjunto
 Folha: 1
 Total: 1




Nº	Nome	Nº Desenho	Qtd.
1	Elemento hor. do por.	M01L011-005	1
2	Elemento vert. do port. inf. c/ união	M01L011-007	1
3	Mecanismo de atuação do eixo "X"	M01L011-008	1
4	Cabeça de impressão inferior	M01L011-009	1

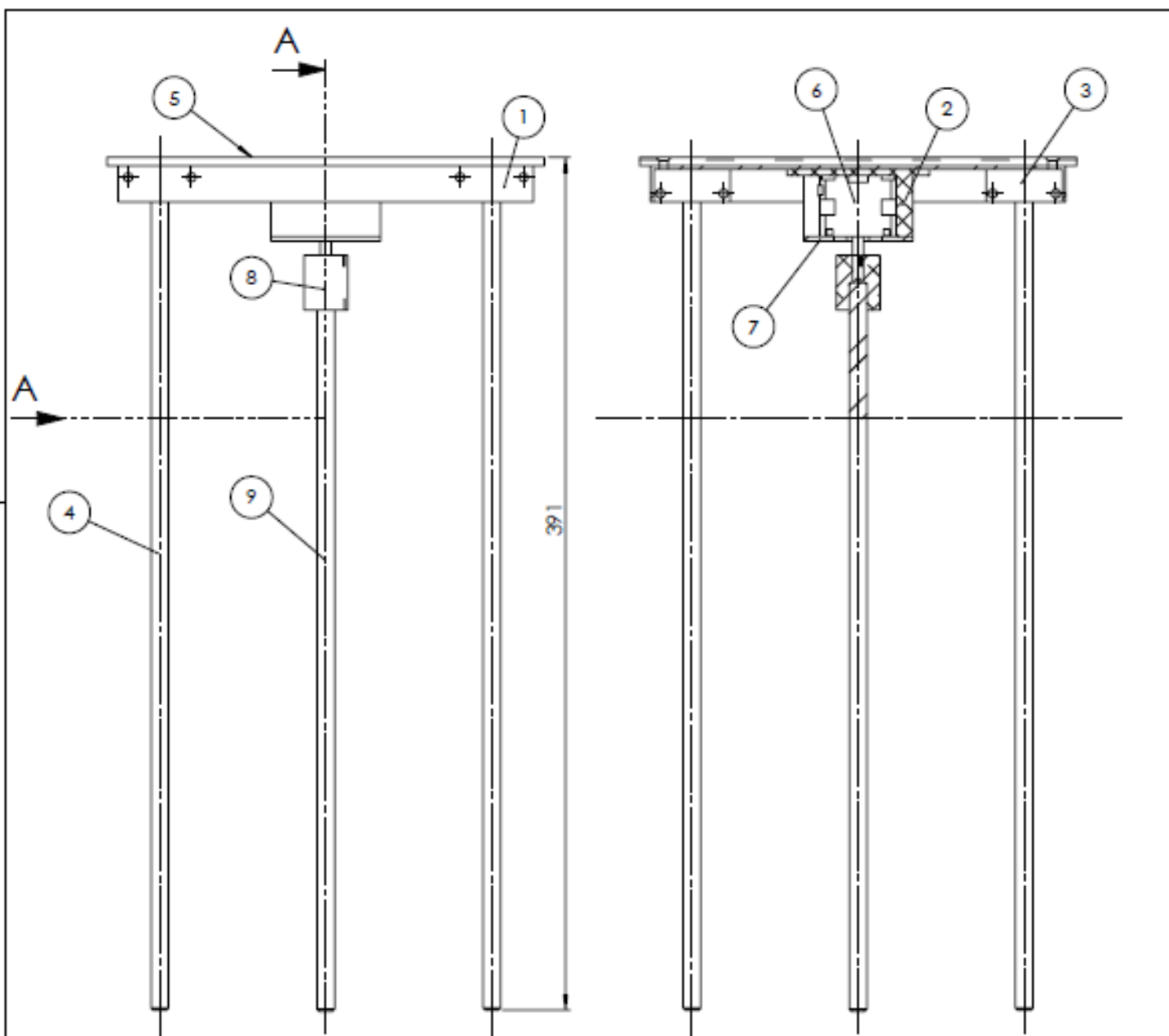
	Escala	1:2
	Proj.:	1:2
Desenho:	03/12/2016	
Verifica:		
Projeto:		
AutoCAD:		
Notas:		
Tolerância Geral:		
Acabamentos:		

Desenho e Modelação Geométrica		
Nome: João Bolo		
Curso: MEMec		n.º 72882
Módulo inferior de deposição		
Folha: A3	Desenho n.º: M01L011-003a	Folha: 1
		Total: 1

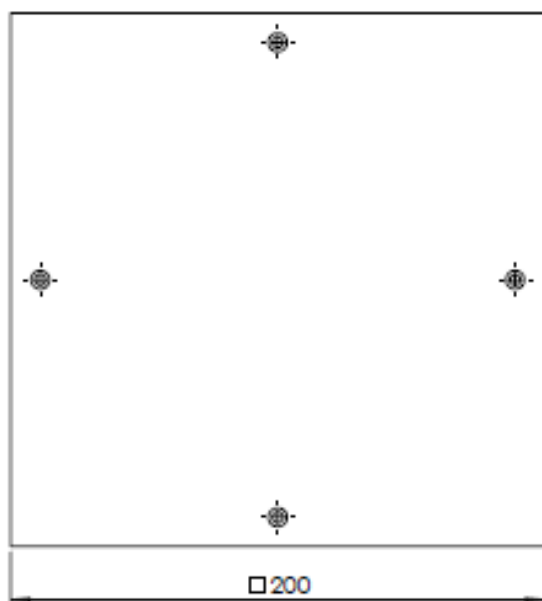


N°	Nome	N° Desenho	Qtd.
1	Elemento hor. do por.	M01L011-005	1
2	Elemento vert. do port. sup. c/ união	M01L011-006	1
3	Mecanismo de atuação do eixo "X"	M01L011-008	1
4	Cabeça de impressão superior	M01L011-010	1

	Escala: 1:2 Mod. 001	Data: 03/12/2012	Desenho e Modelação Geométrica (1057.2)
	Autor: MEMEC	Revisão:	Nome: João Boto Curso: MEMEC
Verificação:	Projeto:	Fabricação:	n.º 72882
Nome:	Título:	Folha: 1	Total: 1
Fabricação:	Material:	Módulo superior de deposição	Folha: 1 Total: 1
A3	M01L011-003b	1	1

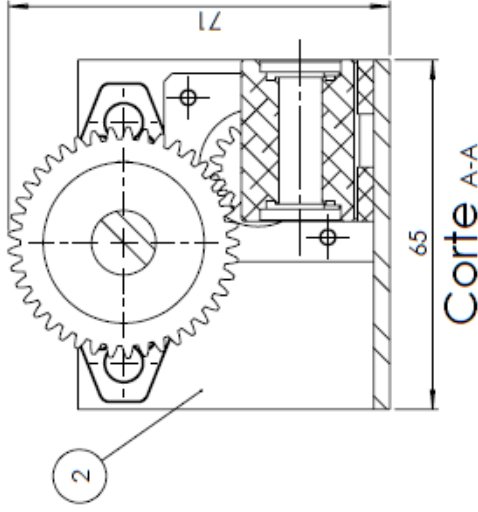
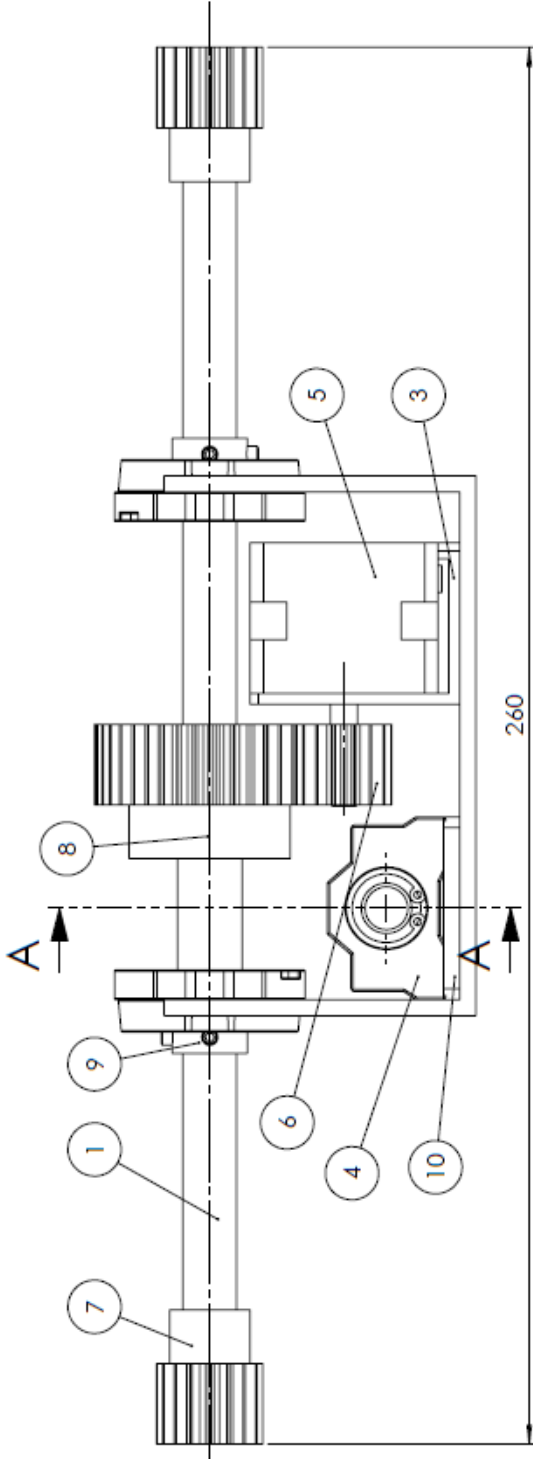


Corte A-A



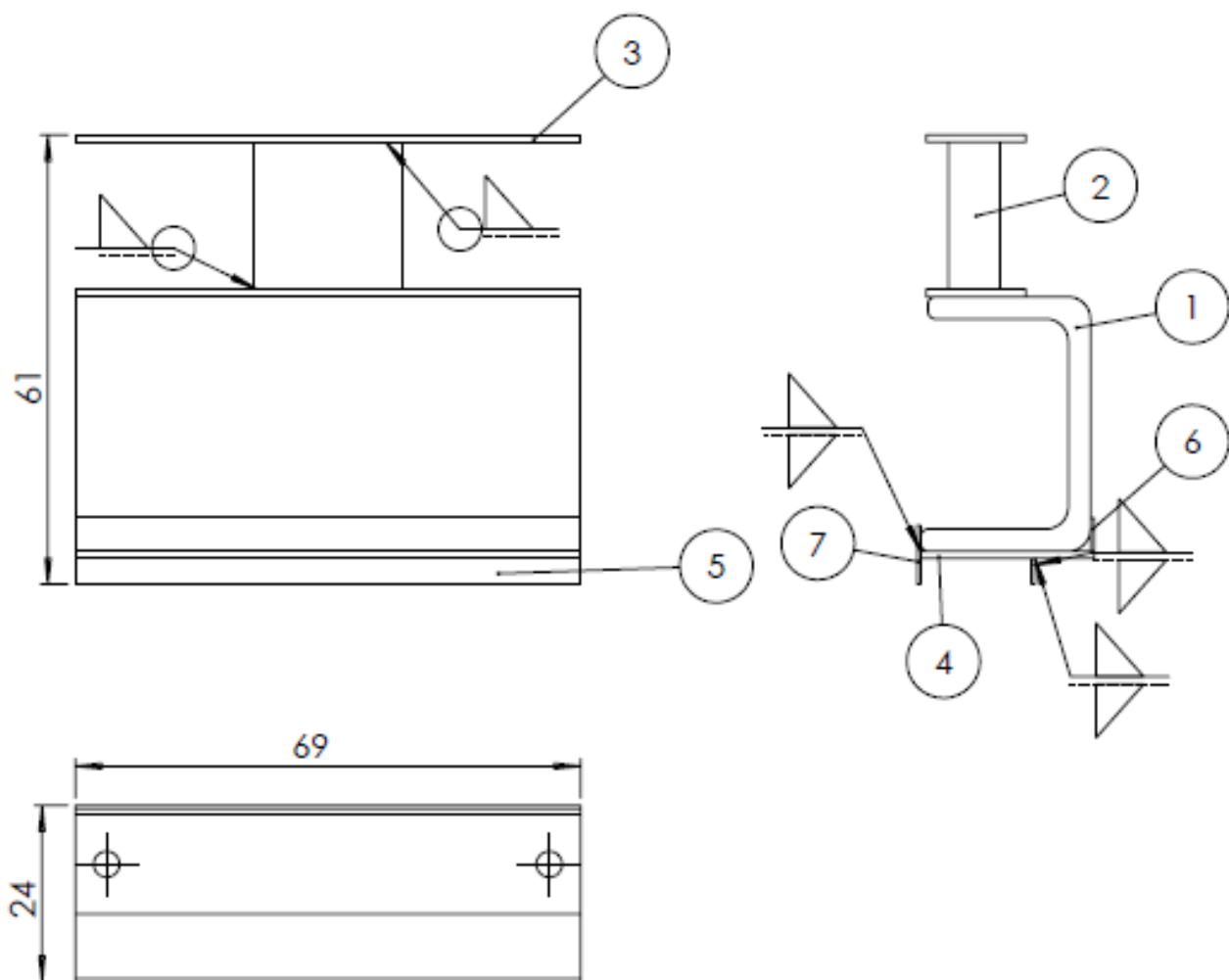
Nº	Nome	Nº Desenho	Qtz.	Material	Desenhado por:
1	Mesa de impressão	M01L011-027	1	AISI 304	João Boto
2	Base do atuador da mesa de deposição	M01L011-012	1	ABS	João Boto
3	Bloco de fixação	M01L011-014	8	AISI 304	João Boto
4	Guia linear do eixo "z"	M01L011-028	4	AISI 304	João Boto
5	Vidro de deposição	M01L011-038	1	Vidro	João Boto
6	Nema 14		1		Phidgets
7	Tampa do atuador da mesa de deposição	M01L011-034	1	AISI 304	João Boto
8	5mm * 8mm Flexível Coupling		1		Adafruits
9	Fuso 8 mm		1	AISI 304	

	Escala: 1:2	Edição:	Data: 03/12/2014	Desenho e Modelação Geométrica
	Autor:	Projeto:	Revisão:	
Tolerância Geral:	Notas:	Módulo de plataforma		
Assinaturas:	Folha: A3	Desenho nº: M01L011-004	Folha: 1	Total:



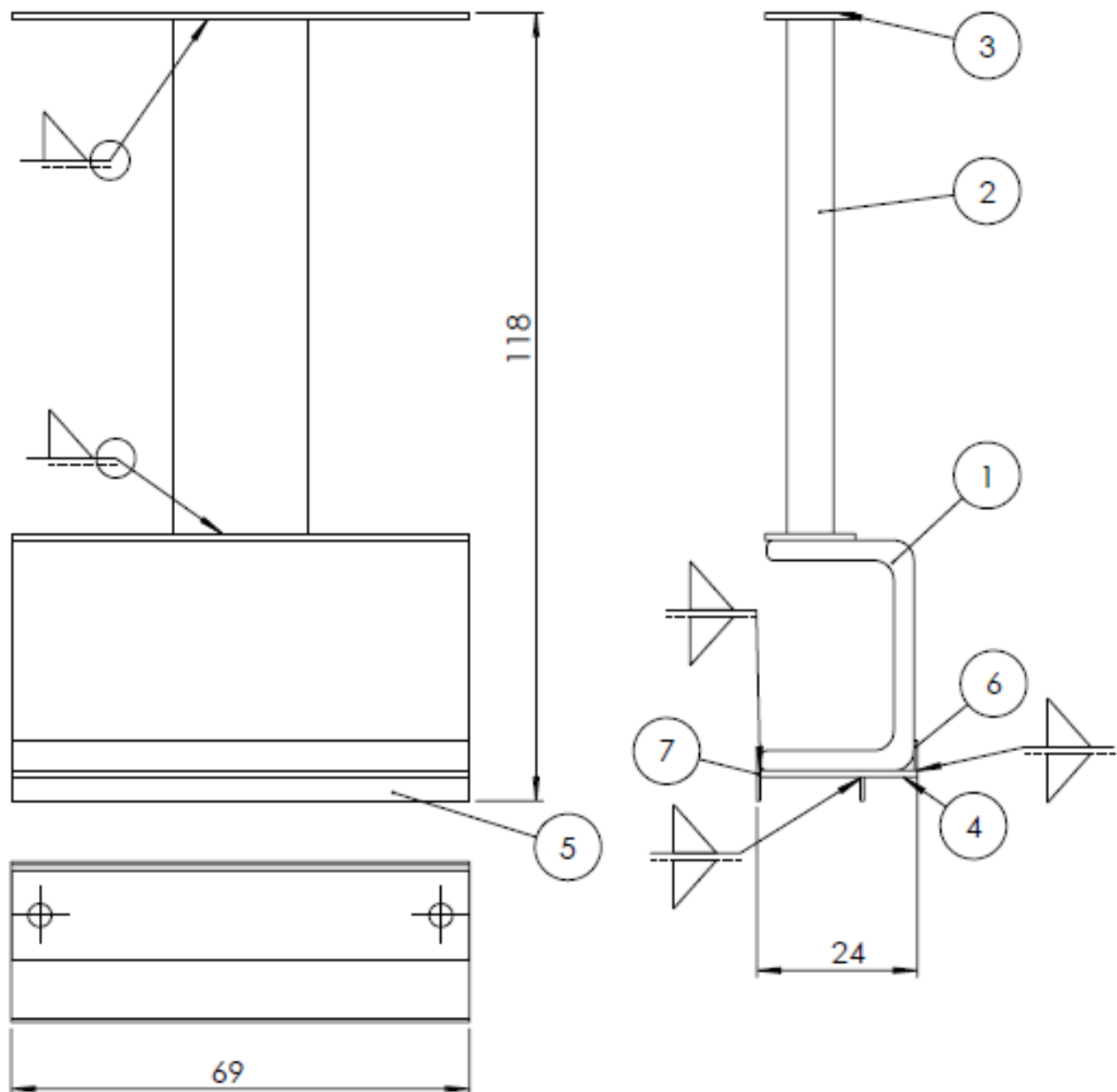
N°	Nome	N° Desenho	Qtd.	Material	Desenhado por:
1	Veio	M01L011-037	1	AISI 304	João Boto
2	Base do atuador do eixo Y	M01L011-013	1	AISI 304	João Boto
3	14 Suporte Nema	M01L011-032	1	ABS	João Boto
4	SC8UU Block bearing		1		Adafruits
5	Nema 14		1		Phidgets
6	ISO - Spur gear 1M 18T 20PA 15PW -- S18A75H50L5.0N		1		
7	ISO - Spur gear 1M 18T 20PA 15PW -- S18B15H25L8.0N		2		
8	ISO - Spur gear 1M 41T 20PA 15PW -- S41B30H25L10.0N		1		
9	KF000 bearing unit 10mm		2		UGE Electronics
10	10 Suporte rolamento guia anti-pendulo	M01L011-033	1	ABS	João Boto

Escala		Data		Desenho e Modelação Geométrica	
Desenho	1:1	08/12/2014		15:52	
Verificação					
Projecção					
Fabricao					
Nome:				Nome: João Boto	
Nota:				Curso: MEMEC	
				n.º 72882	
				Elemento hor. do port.	
Folha		Desenho n.º		Folha	
A3		M01L011-005		1	
				Revisão	





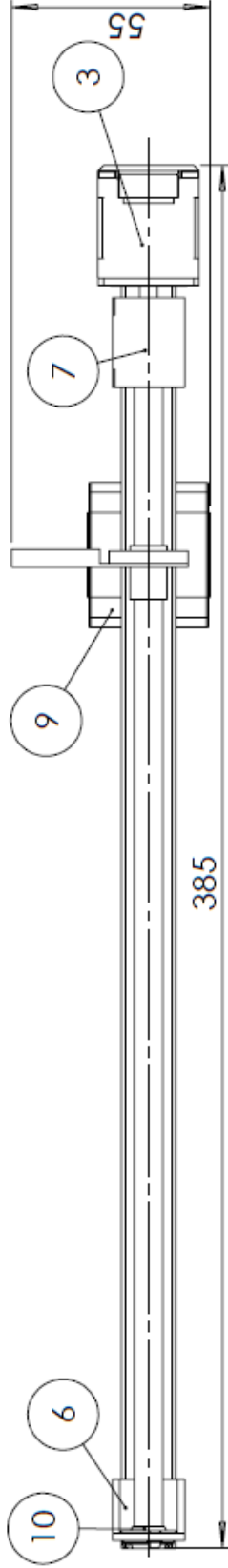
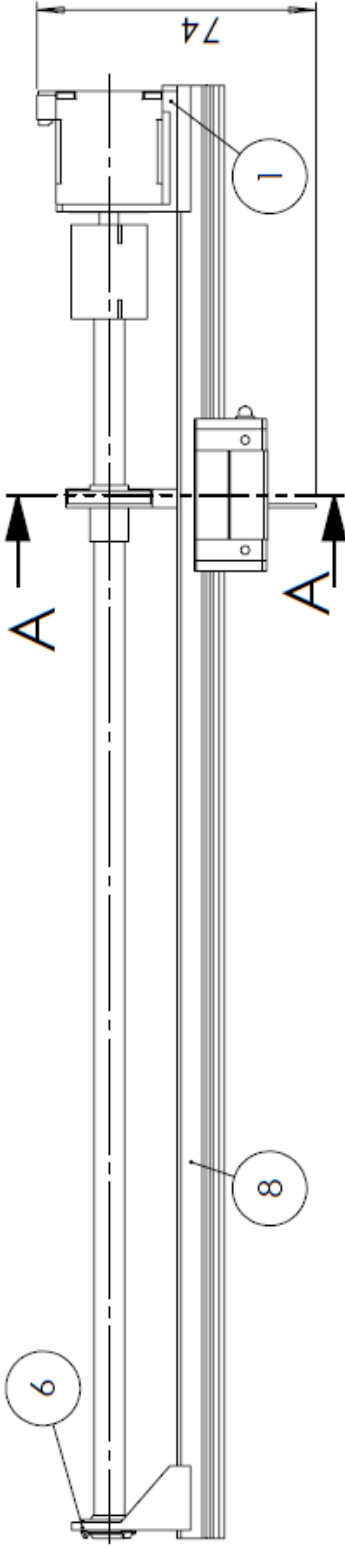
Nº	Nome	Nº Desenho	Qtd.	Material
1	Elemento hor. do por.	M01L011-019	1	AISI 304
2	Tubo retangular do pórtico menor	M01L011-036	1	AISI 304
3	Chapa el. vertical do pórtico	M01L011-016	2	AISI 304
4	Chapa horizontal	M01L011-017	1	AISI 304
5	Chapa inferior	M01L011-039	1	AISI 304
6	Chapa superior	M01L011-018	1	AISI 304
7	Chapa sup. e inf.	M01L011-040	1	AISI 304

	Escala 1:1	Desenhou Verificou Projectou Fabricou	Rótulo Data 03/12/2016	Desenho e Modelação Geométrica
	Material: Tolerância Geral: Acabamentos:	Nota:	Nome: João Boto nº 72882 Curso: MEMec	
Elemento vert. do port. sup. c/ união				Folha: A4 Desenho n.º: M01L011-008 Folha: 1 Peso: Revisão:

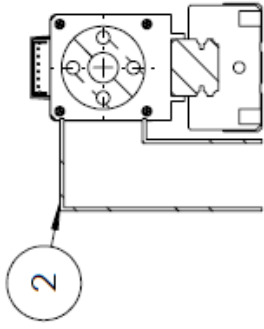


Nº	Nome	Nº Desenho	Qtd.	Material
1	Elemento hor. do por.	M01L011-019	1	AISI 304
2	Tubo retangular do pórtico maior	M01L011-035	1	AISI 304
3	Chapa el. vertical do pórtico	M01L011-016	2	AISI 304
4	Chapa horizontal	M01L011-017	1	AISI 304
5	Chapa inferior	M01L011-039	1	AISI 304
6	Chapa superior	M01L011-018	1	AISI 304
7	Chapa sup. e inf.	M01L011-040	1	AISI 304

	Escala 1:1	Desenhou Verificou	Data 03/12/2014	Desenho e Modelação Geométrica 
		Projectou Fabricou		
Material:		Notas:		Elemento vert. do port. inf. c/ união
Tolerância Geral:				

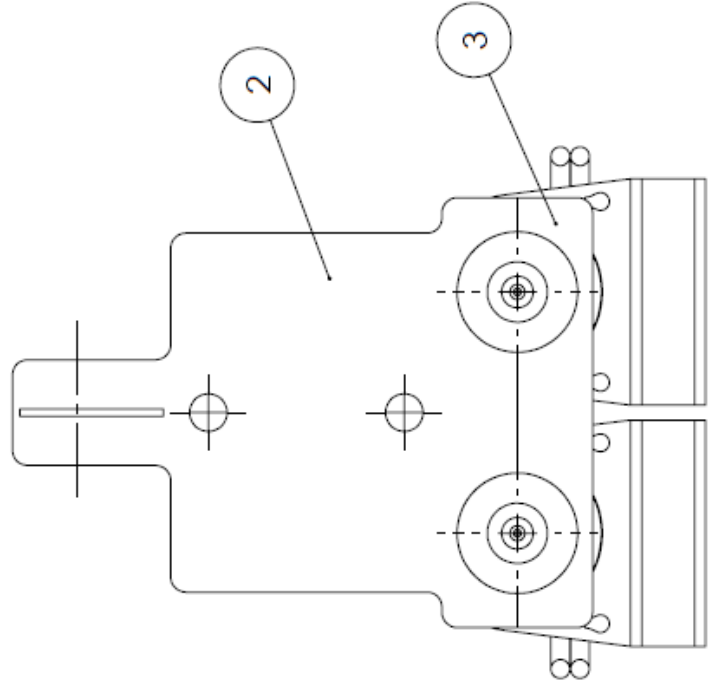
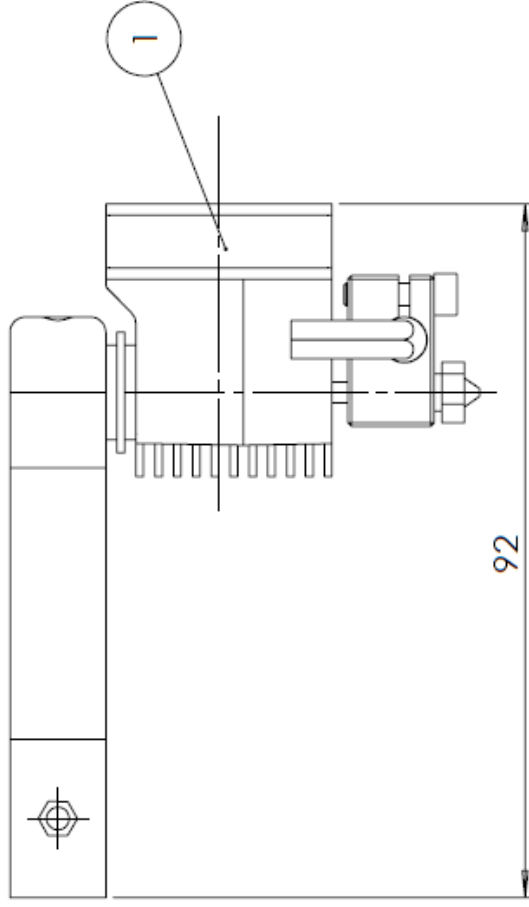
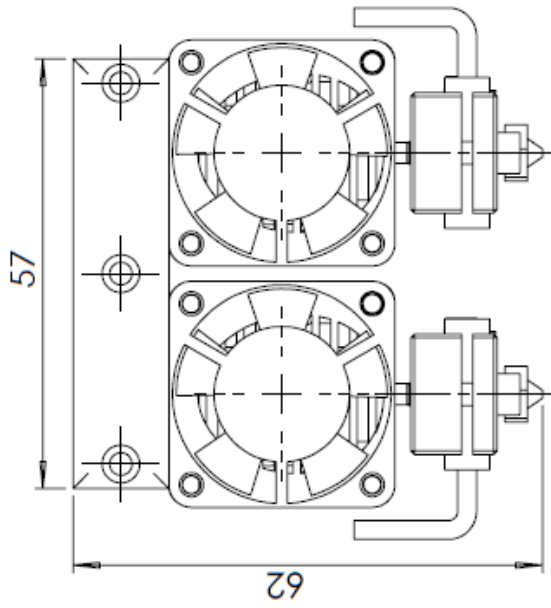


Corte A-A



Nº	Nome	Nº Desenho	Qt'd.	Material	Desenhado por:
1	Suporte NEMA 11	M01L011-031	1	ABS	João Boto
2	Elemento em "L" da CI	M01L011-020	1	AISI 304	João Boto
3	NEMA 11		1		Phidgets
4	Fuso 8 mm		1	AISI 304	
5	Porca do fuso		1	Cobre	
6	Suporte rolamento fuso x	M01L011-030	1	ABS	João Boto
7	5mm*8mm Flexible Coupling		1		Openbuilds
8	Cabeça de impressão inferior		1		NSK
9	Carro		1		NSK
10	ECLM-08-02		1		Igus

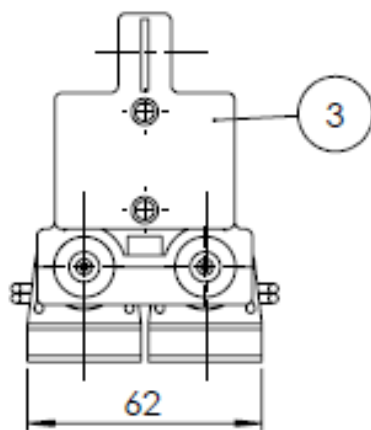
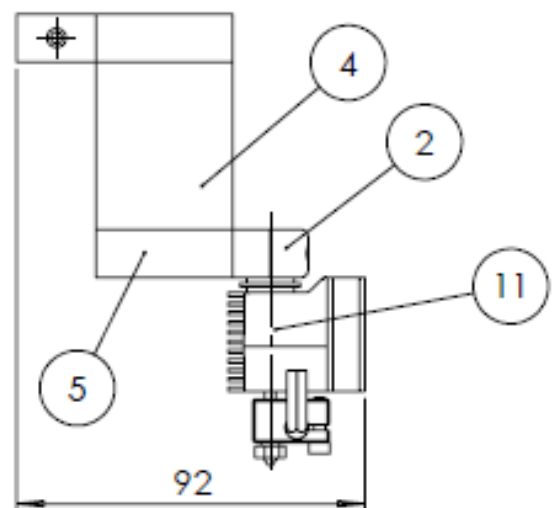
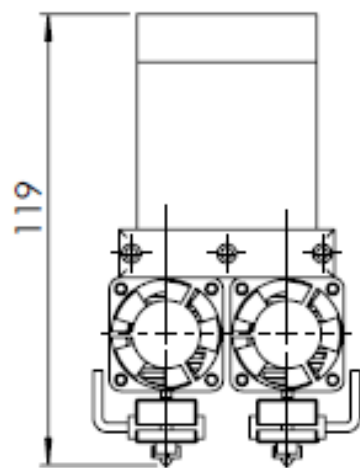
		Desenho e Modelação Geométrica <small>TECNICO L.P.A.L.L.A.</small>
Escala 1:2	Rubrica Data 03/12/2014 03/12/2018	Nome: João Boto Curso: MEMec n.º 72882
Material:	Desenhou Verificou Projectou Fabricou	Mecanismo de atuação do eixo x
Tolerância Geral:	Notas:	Folha 1
Acabamentos:	Peso:	Revisão:
Folha A4		Desenho n.º M01L011-008



Nº	Designação	Nº Desenho	Qtd.	Material	Desenhado por:
1	Hot end		2		E3D
2	Fixação exterior do hot end	M01L011-028	1	ABS	João Boto
3	Fixação exterior do hot end	M01L011-023	1	ABS	João Boto

	Desenho	Rúbrica	Data	UF TÉCNICO L.P.A.L.A.
	Verificou		03/12/2014	
	Projectou		03/12/2014	
	Fabricou			
Material:	Notas:			
Tolerância Geral:				
Acabamentos:				

Desenho e Modelação Geométrica		n.º 72882	
Nome: João Boto		Curso: MEMec	
Cabeça de impressão inferior			
Folha	Desenho n.º	Folha	Revisão:
A4	M01L011-009	1	



Nº	Nome	Nº Desenho	Qtd.	Material	Desenhado por:
1	Estrutura		2		E3D
2	Fixação exterior do hot end	M01L011-023	1	ABS	João Boto
3	Fixação ao carro	M01L011-022	1	ABS	João Boto
4	Elemento que garante a complan.	M01L011-021	1	ABS	João Boto
5	Fixação interior do hot end	M01L011-024	1	ABS	João Boto

	Escala 1:2	Revisão Data 03/12/2016	Desenho e Modelação Geométrica
	Material:	Desenhado por: Verificou: Projectou: Fabricou:	
Tolerância Geral:	Nota:		Cabeça de impressão superior
Acabamentos:	Folha A4	Desenho n.º M01L011-010	