



Mestrado em Engenharia Mecânica

Big Printer 3D Delta

Trabalho Projeto
apresentado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica
Especialização em Equipamentos e Sistemas Mecânicos

Autor

Carlos Daniel Ervedeira Rodrigues

Orientador

Doutora Cândida Maria dos Santos Pereira Malça

Professor do Departamento de Engenharia Mecânica
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, Maio, 2019

Agradecimentos

Quero agradecer a todos os que contribuíram e tornaram possível a realização do presente trabalho de projeto. Em especial,

À minha orientadora, a Professora Doutora Cândida Malça e ao Engenheiro Miguel Reis (CDRSP), pelo desafio lançado, pelo conhecimento transmitido e por toda disponibilidade oferecida.

À minha família, pelo constante apoio e compreensão, principalmente, ao longo desta etapa académica onde além de frequentar o mestrado estava a trabalhar.

À Raquel, por todo apoio, carinho, incentivo e compreensão, nomeadamente, nos últimos três anos em que nem sempre consegui estar presente em diversos momentos.

Por fim, não poderia deixar de agradecer aos meus amigos por toda amizade por todo o incentivo ao longo desta etapa.

Resumo

A impressão 3D é uma das técnicas mais disseminada na indústria nos últimos tempos, devido à sua facilidade de operação, rapidez na obtenção de resultados e ainda o baixo custo associado. No entanto, apresenta ainda lacunas quando se pretende extrapolar para a grande escala devido às limitações dos exemplares que se encontram no mercado ou até mesmo nos componentes que existem e permitem a sua construção.

Na sua maioria, a impressão 3D resulta de processos de manufatura aditiva que são aplicados a impressoras 3D Cartesianas. Este tipo de impressão apresenta limitação no que diz respeito à liberdade de movimentação dos eixos e também do seu volume e velocidade de impressão. Além deste tipo de impressoras, existe as impressoras 3D Delta que permitem responder a estas lacunas, no entanto, a sua estrutura e conceção é mais complexa.

Por forma a responder a uma lacuna na indústria, o presente trabalho de projeto desenvolveu-se sobre a extrapolação de escala de uma impressora 3D Delta comum para uma que permitisse um maior volume útil de impressão (de pelo menos, 1 m³).

Desta forma, procedeu-se ao desenho detalhado dos componentes, sendo que alguns já existiam no mercado cuja adaptação à máquina foi necessária, permitindo a sua modelação 3D em *SolidWorks*. Por forma, a validar a modelação, realizou-se ainda a sua simulação, permitindo que o modelo virtual estivesse finalizado para o passo seguinte – a construção. Cumprindo o objetivo proposto, a impressora 3D Delta projetada apresenta um volume de impressão de, aproximadamente, 4 m³.

Palavras-chave: impressão 3D, Delta, processo FDM, manufatura aditiva, elemento central, slide

Abstract

In recent times, 3D printing is one of the most widespread techniques in the industry, due to its easy of operation, speed in obtaining results still the low cost associated. However, there are still gaps when necessary to extrapolate to the large scale due to the limitations of the examples that are on the market or even the components that exist and allow their construction.

For the most part, 3D printing results from additive manufacturing processes that are applied to 3D Cartesian printers. This type of printing have limitations with regard to the freedom of movement of the axes and also their volume and speed of printing. In addition to this type of printers, there are 3D Delta printers that allow you to respond to these gaps, however, its structure and design is more complex.

In order to respond to a gap in the industry, this project work was developed on the scale extrapolation of a common 3D Delta printer to one that would allow a higher print volume (at least 1 m³).

In this way, we proceeded to the detailed design of the components, and some already existed in the market whose adaptation to the machine was necessary, allowing its 3D modeling in *SolidWorks*. In order to validate the modeling, it was still simulated, allowing the virtual model to be finalized for the next step – the construction. Fulfilling the proposed goal, the 3D Delta printer projects a print volume of approximately 4 m³.

Keywords: 3D printing, Delta, FDM process, additive manufacture, effector, slide

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Índice de figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Índice de Equações	xvii
Abreviaturas	xix
Simbologia	xxi
Capítulo 1 Conceitos Introdutórios	1
1. Enquadramento do tema	1
2. Objetivos e metodologia	1
3. Estrutura da dissertação	1
Capítulo 2 Revisão Bibliográfica	3
1. Fabricação Digital	3
1.1. Tipos de Máquinas.....	3
2. Impressão 3D	5
2.1. O Processo FDM	6
2.2. <i>Softwares</i> de CAM e de controlo de impressão.....	8
2.3. Custo de operação.....	8
2.4. Vantagens e desvantagens do Processo FDM	9
3. Geometria do Equipamento	9
3.1. Robótica	10
3.2. A configuração Delta	11
3.3. Impressora 3D Delta	11
4. Estudo de Mercado	13
4.1. Impressoras 3D Cartesianas VS Impressora 3D Delta	15
Capítulo 3 Dimensionamento	19
1. Dimensionamento preliminar.....	19
1.1. Relações geométricas.....	20
2. Desenho detalhado	26
2.1. Elemento central.....	26
2.2. Articulações.....	27
2.3. Braços	28
2.4. Slides.....	28
2.5. Torres	29

2.6. Chassis	30
2.7. Cantos	30
2.8. Painéis	32
3. Solicitações Mecânicas	33
4. Sistema de transmissão	35
4.1. Motores	36
5. Eletrônica	37
6. Montagem	37
7. Simulação	42
Capítulo 4 Conclusão	45
4.1. Trabalhos futuros	46
Bibliografia.....	47
ANEXOS	51
Anexo A – <i>Softwares</i> e Robôs	53
Anexo B – Componentes do desenho	54

Índice de figuras

Figura 1. A) Processo subtrativo; B) Processo aditivo (Ambrosi e Pumera, 2016).	4
Figura 2. Movimento de eixos adaptado de (Designoteca, 2012).	4
Figura 3. Exemplo da construção de um objeto por camadas (Medium, 2016).	5
Figura 4. Processo de impressão 3D.	5
Figura 5. Aumento das vendas de impressoras 3D do tipo FDM desde 2009 adaptado de (Wohlers, T et al, 2016).	6
Figura 6. Processo FDM, adaptado de (SD3D, 2013).	7
Figura 7. Unidade de alimentação, adaptado de (SD3D, 2013).	7
Figura 8. Exemplo do funcionamento do software CAM – Repetier-Host.....	8
Figura 9. Robô com configuração em série.....	10
Figura 10. Robô com configuração em paralelo.....	10
Figura 11. Configuração Delta.	11
Figura 12. A) Componentes de uma impressora 3D Delta; B) Área útil de impressão, adaptado de (Schmitt et al, 2008)	12
Figura 13. Delta Wasp 2040 (3dhubs, 2018).....	14
Figura 14. A) Impressora 3D SpiderBot V2.2; B) Extrusor Simples e C) Extrusor Duplo (Spiderbot, 2018).	14
Figura 15. A) Impressora 3D Poleen Pam Série P e B) Pellets de termoplástico (PollenPAM, 2018).	15
Figura 16. Impressora 3D Cartesiana VS Impressora 3D Delta, adaptado de (Schmitt et al, 2008).	16
Figura 17. Opção A e Opção B para escolha do chassi.	19

Figura 18. Principais dimensões da máquina onde, D_i – diâmetro de impressão, D_m – diâmetro da máquina, l – comprimento dos braços, O_c – offset do slide e O_E – offset do elemento central (Abreu, 2017).....	20
Figura 19. Ângulo α quando o elemento central se encontra ao centro da área de impressão (Abreu, 2017).....	21
Figura 20. Ângulo α quando o elemento central se encontra na periferia da área de impressão (Abreu, 2017).....	21
Figura 21. Ângulo β quando o elemento central se encontra na periferia da área de impressão (Abreu, 2017).....	22
Figura 22. Cálculo entre as torres em função da altura desejada (Abreu, 2017).....	23
Figura 23. Relação entre a velocidade vertical dos slides e a velocidade horizontal do elemento central – fator de multiplicação (Abreu, 2017).....	24
Figura 24. Variação do fator de multiplicação com o ângulo α	24
Figura 25. Placa base do elemento central	26
Figura 26. Elemento central completo.	27
Figura 27. Rótula KARM-12 CL MH.....	27
Figura 28. Extremidade do braço.....	28
Figura 29. Slide.....	29
Figura 30. Torre.	29
Figura 31. Cantos superiores.	30
Figura 32. Canto inferior.....	31
Figura 33. Pormenor do entalhe.	31
Figura 34. Painel de união das vigas.....	32
Figura 35. Painéis utilizados na divisão da torre.	32

Figura 36. Força resultante no elemento central.....	34
Figura 37. Força resultante no slide.....	35
Figura 38. Motor Nema 34HS31-55045.	36
Figura 39. Sistema de fixação aparafusada.	38
Figura 40. Acoplamento do slide aos braços e à torre.	38
Figura 41. Pormenor da divisão das torres para ajuda à movimentação da máquina.	39
Figura 42. Vista geral da zona superior da máquina.....	39
Figura 43. Zona inferior da máquina com a acoplação dos motores.	39
Figura 44. Pormenor do canto inferior.....	40
Figura 45. Localização das polias.....	40
Figura 46. Pormenor do canto superior.....	40
Figura 47. Pormenor do entalhe nas vigas transversais.	41
Figura 48. Vista geral da máquina – impressora 3D.....	41
Figura 49. Simulação da estrutura simplificada (tensões).	43
Figura 50. Simulação da estrutura simplificada (deslocamento).....	43
Figura 51. Simulação da estrutura completa – análise de braços (tensões).	44
Figura 52. Simulação da estrutura completa – análise de braços (deslocamento).	44
Figura 53. Desenho da placa base do elemento central.	54
Figura 54. Desenho dos componentes do elemento central.	55
Figura 55. Datasheet da rótula.....	55
Figura 56. Desenho dos elementos que constituem o braço.	57

Figura 57. Datasheet do slide.	58
Figura 58. Desenho dos elementos que constituem o slide.	59
Figura 59. Datasheet do perfil utilizados nas torres e nas vigas transversais.	60
Figura 60. Datasheet do suporte do guia.	61
Figura 61. Datasheet do guia.	61
Figura 62. Datasheet do terminal da guia.	62
Figura 63. Desenho do entalhe a ser feito nas vigas transversais superiores.	63
Figura 64. Desenho dos cantos superiores.	64
Figura 65. Desenho dos elementos que constituem o canto inferior.	65
Figura 66. Desenho do painel de união das vigas.	66
Figura 67. Desenho dos elementos do encaixe das torres.	55
Figura 68. Datasheet do motor.	68
Figura 69. Datasheet da polia.	69
Figura 70. Data sheet da correia 32AT0.	70
Figura 71. Datasheet da correia.	70

Índice de Tabelas

Tabela 1. Temperatura de extrusão de diferentes termoplásticos adaptado de (González, S.G., 2016).	7
Tabela 2. Vantagens impressora 3D Cartesiana VS impressora 3D Delta.....	16
Tabela 3. Vantagens impressora 3D Cartesiana VS impressora 3D Delta.....	16
Tabela 4. Caraterísticas de impressão associadas à impressora 3D cartesiana e à impressora 3D Delta.	17
Tabela 5. Variação do fator de multiplicação com o ângulo α	25
Tabela 6. Massas dos componentes do elemento central.	33
Tabela 7. Massas dos componentes do slide.	33
Tabela 8. Massas associadas a todos os componentes.	34
Tabela 9. Cargas associadas ao elemento central.	34
Tabela 10. Cargas associadas ao slide.....	35
Tabela 11. Caraterísticas gerais do sistema para determinação do binário.	36
Tabela 12. Síntese dos componentes da máquina – impressora 3D.	42
Tabela 13. Principais caraterísticas da máquina.	45
Tabela 14. Comparação entre os diferentes softwares.	53
Tabela 15. Comparação entre os robôs em serie e em paralelo, adapto de ((Pandilov , Z. e Dukovsky, V., 2014).	53

Índice de Equações

Equação (1)	21
Equação (2)	21
Equação (3)	22
Equação (4)	22
Equação (5)	23
Equação (6)	24

Abreviaturas

3D – Três Dimensões

3DP – *Inkjet 3D Printing*

ABS – Acrilonitrilo butadieno estireno

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAD – *Computer-Aided Design*

CAM – *Computer-Aided Manufacturing*

CNC – *Computer Numeric Control* (Comando Numérico Computorizado)

FDM – *Fused Deposition Modelling*

HIPS – Poliestireno de alto impacto

ISO – *International Organization of Standardization*

MA – Manufatura aditiva

PLA – Ácido poliático

PVA – Acetato de polivinila

PETG – Politeraftalato de etileno-glicol

PC – Policarbonato

SLA – *Stereolithography*

SLS – *Selective Laser Sintering*

Simbologia

α – Ângulo formado entre os braços e o elemento central

β – Ângulo formado entre os braços e o slide

\emptyset – Diâmetro

d – Distância entre os braços

D_i – Diâmetro impressão

D_M – Diâmetro máquina

H – Comprimento das torres

H – Altura de impressão

O_E – *Offset* do elemento central

O_c – *Offset* do slide

Capítulo 1 | Conceitos Introdutórios

1. Enquadramento do tema

A realização do presente trabalho de projeto insere-se no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica com Especialização em Equipamentos e Sistemas Mecânicos do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

O tema central deste trabalho retrata o projeto de uma impressora 3D do tipo Delta com dimensões superiores às que se encontram neste momento disponíveis no mercado, salvo exceções com aplicações específicas.

As impressoras 3D têm vindo a receber um grande interesse dos fabricantes e usuários, sendo que as do tipo cartesianas as mais comumente utilizadas, verificando-se um aumento do seu interesse devido às suas características de operação.

A motivação pessoal para este projeto proveio do interesse por máquinas industriais em conjunto com as tecnologias de maquinação de CNC e os processos de fabricos que lhe estão associados. O que permitiu que o presente projeto se inclui na perfeição com os aspetos supra mencionados.

O projeto aliou o processo criativo com a vertente de seleção dos componentes já existentes no mercado e a escolhas dos que melhor satisfaziam as necessidades que o projeto colocava.

2. Objetivos e metodologia

O trabalho desenvolvido neste projeto teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma impressora 3D do tipo Delta permitindo o preenchimento de uma lacuna existente na indústria.

Inicialmente, o seu processo base será a manufatura aditiva pelo Processo FDM, podendo ser extrapolada para outros processos que se inserem nos processos aditivos por utilização de equipamentos diferentes de extrusores.

Desta forma, realizou-se um desenho preliminar da máquina e posteriormente simulou-se em *SolidWorks*, permitindo a validação dos dados do trabalho de projeto para a sua conceção final.

3. Estrutura da dissertação

O presente trabalho de projeto encontra-se dividido em quatro capítulos. Neste primeiro capítulo encontra-se um breve enquadramento do âmbito e motivação, e os objetivos para a realização deste trabalho. Em seguida, no segundo capítulos, encontra-se o estado da arte no que diz respeito aos processos de maquinação, aos processos de manufatura aditiva e subtrativa, com especial relevância ao processo FDM, assim como, a impressão 3D e quais as ofertas

disponíveis no mercado. No terceiro capítulo encontram-se todos os desenhos preliminares realizados, o desenho detalhado de todos os componentes que constituem a impressora 3D, as solicitações mecânicas, a montagem final da máquina e ainda a simulação para validação dos dados. No quarto e último capítulo encontram-se sintetizadas as principais conclusões deste trabalho de projeto e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 | Revisão Bibliográfica

1. Fabricação Digital

A fabricação digital trata-se da produção de objetos físicos a partir de modelos digitais. De grosso modo, podemos equiparar a fabricação digital com a impressão de um PDF, com a grande diferença, que hoje em dia existem uma grande variedade de máquinas capazes de converter ficheiros informáticos em objetos reais. Muitas das vezes, a fabricação digital é também designada de *prototipagem rápida*, por permitir testar uma ideia de um produto num curto espaço de tempo.

Quando a fabricação digital é abordada é comumente utilizado como exemplo as impressoras 3D ou máquinas CNC devido à sua elevada importância e utilização. Ainda assim, existem outras tecnologias que permitem a fabricação digital que irão ser abordadas no presente trabalho (Designoteca, 2012).

A primeira utilização industrial de fabricação digital, remonta a 1952 na produção de peças complexas de aviões pela Força Aérea Americana, atualmente, este processo está mais acessível que nunca dada a existência de equipamentos de baixo custo, possibilitando o acesso a um número cada vez maior de pessoas, permitindo o uso destas máquinas para reproduzir as suas ideias (Machinist, 2015).

A fabricação digital é um processo bastante atrativo devido às vantagens que apresenta, nomeadamente (Designoteca, 2012):

- As instruções de fabricação, que estão guardadas num ficheiro virtual, podem ser infinitamente copiadas e distribuídas sem perder qualidade;
- O produto só existe como ficheiro virtual até que seja necessário o seu fabrico;
- Devido à inexistência de moldes ou formas dispendiosas é extremamente fácil testar alterações a um design sem que para isso surjam custos elevados associados como por exemplo acontece na indústria de injeção de plástico, onde a cada alteração do design corresponde uma alteração na máquina de produção, o que se revela muito dispendioso e limita o número de iterações.

1.1. Tipos de Máquinas

Para que a fabricação digital se concretize são necessárias máquinas para materializar os projetos existindo, para isso, dois métodos básicos (Designoteca, 2012):

- **Processo aditivo** – tal como o próprio nome indica, é um processo onde a fabricação de uma peça é feita pela adição progressiva de material. São exemplos de processos aditivos o *Fused Deposition Modeling* (FDM), o *Selective Laser Sintering* (SLS), o *Stereolithography* (SLA) e o *Inkjet 3D Printing* (3DP). O processo FDM será seguidamente abordado no presente trabalho de projeto.
- **Processo subtrativo** – ao contrário do anterior, é um processo onde a matéria-prima é colocada em bruto e onde se vai removendo o material progressivamente até se obter a

peça final. São exemplos de processos subtrativos o Corte a Laser, o Corte a Jato de Água e Maquinação CNC.

Na Figura 1 encontra-se ilustrado o processo aditivo e o processo subtrativo.

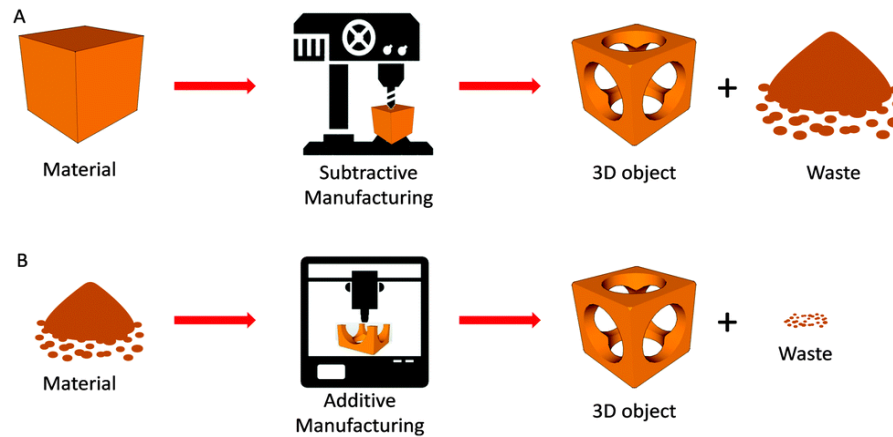


Figura 1. A) Processo subtrativo; B) Processo aditivo (Ambrosi e Pumera, 2016).

A maioria das máquinas de fabrico digital têm um volume de trabalho limitado, o que vai determinar o tamanho máximo de uma peça que seja fabricada.

Outra característica relevante são os eixos de trabalho, normalmente, as máquinas associadas a estes processos têm um componente móvel que se desloca pela área de trabalho, seja a adicionar material ou a remover - processos aditivo ou subtrativo, respetivamente. O componente móvel move-se ao longo de um ou mais eixos, podendo as máquinas terem entre 3 a 5 eixos, o que determina e possibilita a complexidade das peças a serem fabricadas (Designoteca, 2012).

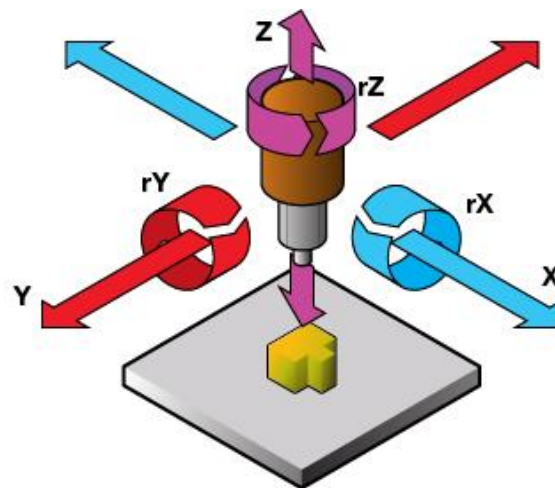


Figura 2. Movimento de eixos adaptado de (Designoteca, 2012).

2. Impressão 3D

A Impressão 3D é o termo usado correntemente para descrever processos de manufatura aditiva. Segundo a designação ISO/ASTM 52900, os processos de manufatura aditiva podem ser descritos como qualquer processo de fabrico de junção de materiais para fabrico de peças a partir de modelos 3D, mais frequentemente camada a camada, em oposição aos processos de manufatura subtrativa (Wohlers, T *et al*, 2016).

A característica comum do processo de fabrico aditivo reside no modo como os modelos são construídos por adição sucessivas de camadas. Estas são construídas umas em cima das outras, de modo a formar um objeto. Na Figura 3 é demonstrada a construção de um objeto por sucessivas camadas.



Figura 3. Exemplo da construção de um objeto por camadas (Medium, 2016).

A impressão 3D é antecedida por duas fases, a criação do desenho 3D e a obtenção do *g-code* como é possível observar no esquema na Figura 4.

A criação do desenho 3D é realizada através de *softwares CAD*, tais como o *SolidWorks* e *AutoCad*. Posteriormente, o ficheiro é exportado no formato *STL* que consiste na definição do objeto 3D através de planos triangulares e respetivos vértices.

Em seguida, através do uso de *softwares CAM* (e.g. *Cura*, *Repetier*, *Slic3r*), é obtido o *g-code*, que contem a informação para a impressora 3D realizar a impressão. As inúmeras variáveis da impressão 3D estão representadas no *g-code*, tais como, a velocidade de impressão, o formato da peça, o nível de enchimento e a altura de camada.

Por fim, realiza-se a impressão, onde as instruções do *g-code* são enviadas através de um cabo, cartão de memória ou até mesmo por *wi-fi*. As instruções enviadas correspondem à impressão completa, no entanto pode-se controlar a impressão através do *firmware* da impressora, ou do *software CAM* caso esteja conectada à impressora em funcionamento (González, S.G., 2016).

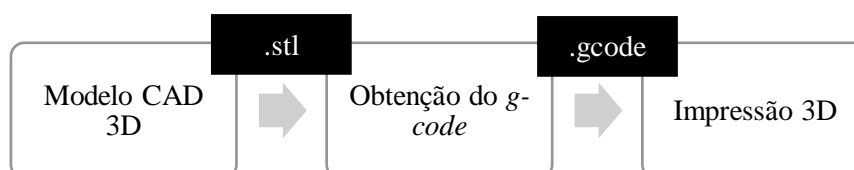


Figura 4. Processo de impressão 3D.

2.1. O Processo FDM

O Processo FDM - *Fused Deposition Modeling* foi desenvolvido e patenteado no final dos anos 80 pela Stratasys. No ano de 2009 a patente expirou e foi então que se verificou um aumento exponencial de vendas devido à diminuição do custo das impressoras 3D que utilizam este processo (González, S.G., 2016). Este comportamento pode ser verificado na Figura 5 segundo o estudo realizado pela Wohlers.

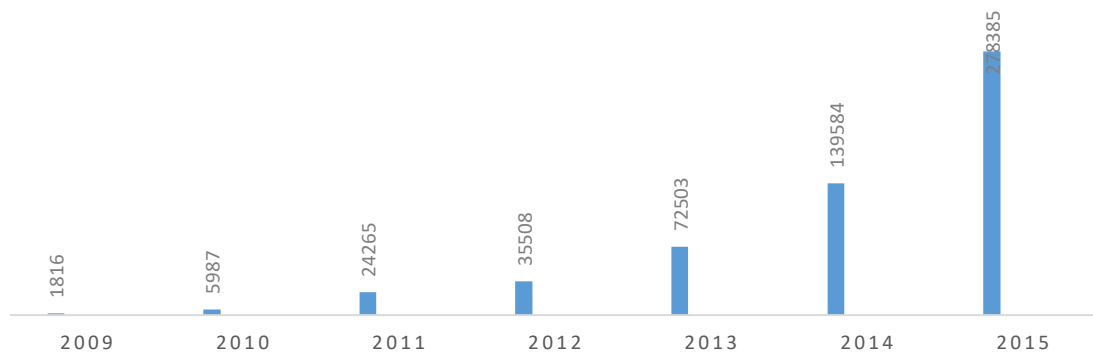


Figura 5. Aumento das vendas de impressoras 3D do tipo FDM desde 2009 adaptado de (Wohlers, T et al, 2016).

Segundo a norma ASTM F2792, esta tecnologia inclui-se no grupo de processos de manufatura aditiva (MA) por extrusão de material. Este grupo abrange qualquer processo em que o material é dispensado seletivamente por um bocal ou orifício.

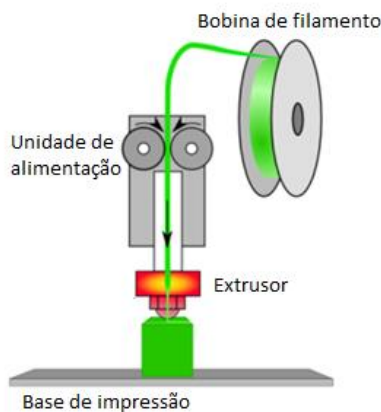
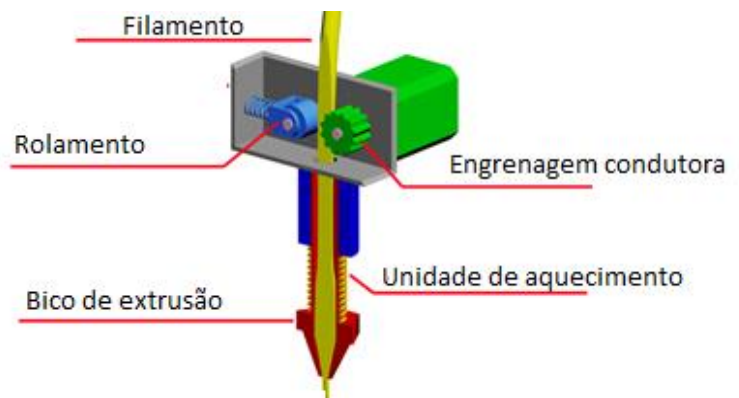
O processo FDM tem como princípio a modelação por extrusão de plástico onde, filamentos de material termoplástico são extrudidos a partir de um bico de extrusão com a finalidade de garantir uma rápida solidificação e endurecimento. Este processo é um dos com mais baixo custo e mais utilizado em impressão 3D (González, S.G., 2016).

Os materiais termoplásticos mais utilizados são o ácido poliático (PLA), o acrílico-butadieno-estireno (ABS), o policarbonato (PC), o acetato de polivinila (PVA), o politeraftalato de etileno-glicol (PETG) e o poliestireno de alto impacto (HIPS). Sendo que, o PVA é o que apresenta maior facilidade processual pois não é tão sensível a variações de temperatura como, por exemplo, o ABS (RepRap, 2017). Este termoplástico é solúvel em água, o que o torna ideal para a produção dos suportes das peças. Na Tabela 1 encontram-se discriminadas as temperaturas de extrusão dos diferentes termoplásticos que podem ser utilizados no processo FDM.

Tabela 1. Temperatura de extrusão de diferentes termoplásticos adaptado de (González, S.G., 2016).

TERMOPLÁSTICO	TEMPERATURA DE EXTRUSÃO (°C)
PLA	180-210
ABS	185-200
PVA	180-200
PETG	220
HIPS	235
PC	280-305

O material polimérico fundido é depositado camada a camada criando assim o objeto tridimensional com a geometria pretendida. O bico extrusor contém uma fonte de calor com controlo de temperatura sendo este responsável por aquecer e alterar o estado físico do material. O material consumível encontra-se em forma de bobina de filamento – Figura 6. Durante o processo o material já depositado e solidificado, por arrefecimento, servirá de base à camada sucessora e assim sucessivamente. A primeira camada é de extrema importância para a qualidade do produto final pois, é a única em que o material não adere a uma camada de material já impressa. A facilidade de adesão entre camadas é um dos fatores que faz com que a solidificação das camadas subsequentes ocorra de uma forma controlada (ManufacturingGuide, 2016 e SD3D, 2013).

**Figura 6.** Processo FDM, adaptado de (SD3D, 2013).**Figura 7.** Unidade de alimentação, adaptado de (SD3D, 2013).

A alimentação do material e conseqüente extrusão têm de estar em equilíbrio para que ocorra uma impressão 3D controlada, para isso a unidade de alimentação é de elevada importância. Esta unidade é composta por um alimentador com uma engrenagem condutora do material, que se encontra associada a um motor de passo – Figura 7. A velocidade da referida engrenagem define a velocidade com que o filamento é introduzido no extrusor, de modo a ser fundido e impresso (ManufacturingGuide, 2016 e SD3D, 2013).

2.2. Softwares de CAM e de controlo de impressão

Os parâmetros de impressão são controláveis através do *software* CAM ou de controlo de impressão. Atualmente verifica-se uma elevada diversidade destes *softwares*, sendo que os mais atrativos acabam por ser os distribuídos gratuitamente.

Os *softwares* usados para o processo FDM são vulgarmente denominados por *slicers*, pelo facto de realizarem a divisão do sólido em “fatias” para posterior impressão camada a camada. Estes *softwares* criam o ficheiro em *g-code* que contém todos os parâmetros e instruções de impressão, de modo a ser interpretado pela impressora. A linguagem utilizada assemelha-se em muito aos equipamentos CNC, sendo que está adaptado em vários aspetos especialmente para impressoras 3D. É possível a conexão de dados, daí a possibilidade de controlo da impressão no computador ao contrário do controlo direto através do *firmware* da impressora. Na Tabela 14 do Anexo A encontra-se uma breve comparação entre os *softwares* que podem ser utilizados.

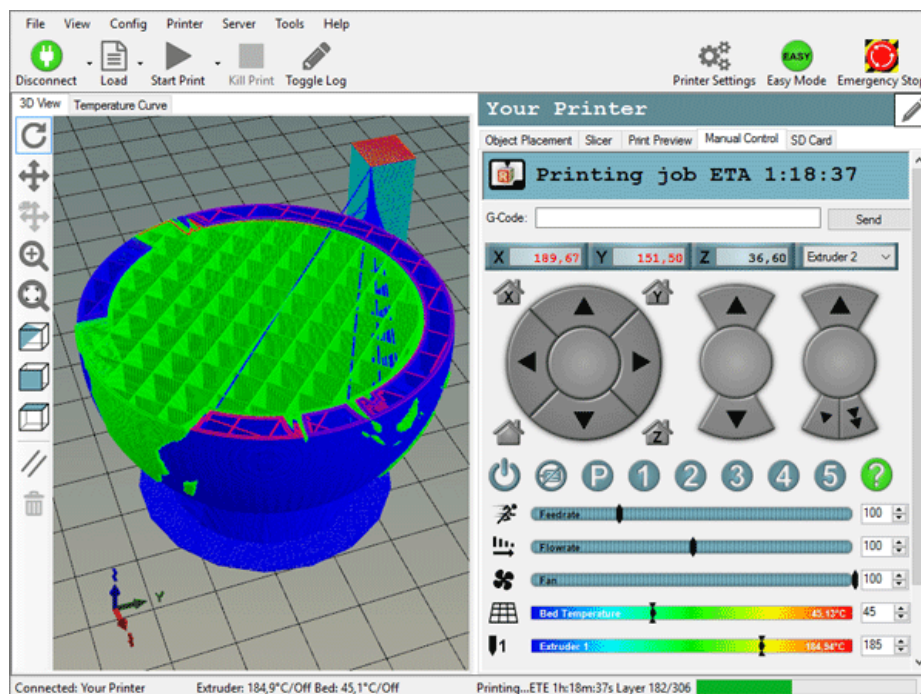


Figura 8. Exemplo do funcionamento do *software* CAM – *Repetier-Host*.

2.3. Custo de operação

Os custos de operação para este processo podem variar consideravelmente. Os fatores que mais contribuem para o custo final de uma peça impressa são a preparação do modelo, o tipo e quantidade de material usado, o tempo total de impressão e os possíveis acabamentos.

A preparação consiste em fazer alguma possível alteração da geometria ou segmentação do modelo e preparar para imprimir a partir de um *software* de CAM.

No tempo de impressão podem estar implícitos, por exemplo, os custos de aluguer do equipamento ou custos energéticos.

Entre os processos de acabamento podem ser incluídas operações de lixagem, desbaste, pintura ou outros tratamentos superficiais como tratamentos com vapor de acetona.

Os custos de material podem variar consideravelmente, dependendo do tipo, qualidade ou fornecedor do mesmo. De forma geral, os materiais para este tipo de impressoras podem ser adquiridos a partir de 20 €/Kg (Horvath, 2014).

2.4. Vantagens e desvantagens do Processo FDM

Como qualquer outro processo também o processo FDM apresenta vantagens e desvantagens associadas, este pode-se tornar vantajoso a três níveis:

- **Custo de investimento e operação** – São máquinas que não requerem um investimento muito avultado, tendo assim uma elevada aplicabilidade em ambientes académicos ou pequenas empresas. O preço destas impressoras pode ir dos 500 aos 5000€ para modelos de baixo custo (Wohlers, T *et al*, 2016).
- **Disponibilidade de mercado** – Existe já uma vasta variedade no mercado, desde impressoras para utilizadores casuais ou profissionais, havendo uma disponibilidade cada vez maior quer de materiais quer de equipamentos em lojas de cariz tecnológico (ManufacturingGuide, 2016).
- **Comunidades** – Existe uma grande comunidade ativa de entusiastas de impressoras FDM (Thingiverse, 2016). Havendo assim uma plataforma de discussão e troca de conhecimento, atualizada e com bastantes conteúdos, permitindo dar assim algum suporte à utilização de equipamentos de impressão FDM.

No entanto, é possível que se torne desvantajoso, nomeadamente, no que diz respeito a:

- **Qualidade de impressão** – Em relação a outros tipos de MA, a qualidade de impressão das peças deixa algo a desejar. A rugosidade é elevada e apresenta limitações quanto à complexidade e tamanho mínimo das geometrias impressas (Choudhari, 2016).
- **Materiais** – A maior parte dos materiais que imprimem são termoplásticos. Apesar de muito polivalentes, as aplicações das peças impressas estão limitadas pelas suas características mecânicas e propriedades físicas.

3. Geometria do Equipamento

Existem diferentes tipos de impressoras FDM, no que diz respeito ao seu modo de translação do extrusor no espaço. Os sistemas de movimentação são comparáveis com outro tipo de máquinas, como por exemplo máquinas CNC ou até mesmo robôs industriais. A maioria das impressoras 3D FDM têm três graus de liberdade que é suficiente para o tipo de processo em questão.

3.1. Robótica

As impressoras FDM são na realidade máquinas-ferramentas em que a ferramenta é o extrusor. Podem ser classificadas também como um robô industrial por serem usados em processos de manufatura. Por vezes, estes tipos de robôs são referidos como manipuladores. O seu controlo parte do princípio de automação programável, permitindo reprogramar o robô para executar uma determinada sequência de operações. O controlo CNC é um exemplo deste tipo de automação.

A ferramenta move-se no espaço conforme a cadeia cinemática da máquina. As características de funcionamento são ditadas pelas diferentes cinemáticas. Em robótica existem duas classes de robôs, os robôs série e paralelos. No Anexo A encontra-se a Tabela 15 com uma análise comparativa entre estes dois tipos de robôs. Os robôs série possuem uma cadeia cinemática aberta, os movimentos para cada um dos seus graus de liberdade são feitos de forma independente. Os robôs paralelos têm uma cadeia cinemática fechada, composta por vários componentes mecânicos, ligados entre si e acionados de forma sincronizada.

O tipo de impressoras FDM mais comum são as chamadas impressoras cartesianas – Figura 9. Estas impressoras são manipuladores em série e possuem três graus de liberdade acionados de forma independente.

Na classe de manipuladores paralelos, a configuração mais adotada em impressoras é a configuração delta linear - Figura 10. Devido às suas características, este tipo de impressoras têm vindo a receber mais atenção (Carraca, 2009; Groover, 2002 e Koren, 1985).



Figura 9. Robô com configuração em série.



Figura 10. Robô com configuração em paralelo.

3.2. A configuração Delta

A invenção do robô delta está atribuída ao suíço Reymond Clavel que desenvolveu um robô do tipo paralelo com três graus de liberdade de translação – Figura 11. O mecanismo consiste numa plataforma fixa ligada por um conjunto de braços a um órgão terminal designado de elemento central. A esta peça são acopladas três pares de braços que formam três paralelogramos independentes que restringem a rotação do elemento central. As ligações entre os braços são feitas por rotulas ou juntas universais que possibilitam o movimento. O acionamento é feito por três motores montados no topo, ligados a uns braços rotativos.

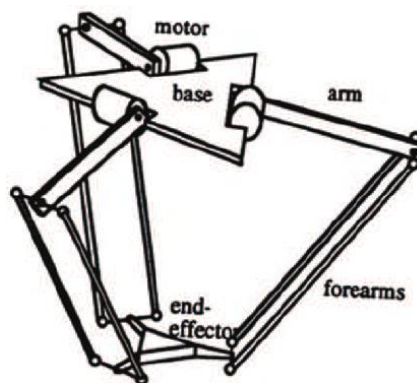


Figura 11. Configuração Delta.

Este tipo de cinemática apresenta características comuns aos robôs paralelos. Para além dos variados benefícios associados a estes tipos de cinemática, o facto de serem indicados para sistemas de movimentação em que as solicitações na ferramenta são muito baixas, tornando-se ideais para serem adaptados em impressoras 3D.

Tendo como inspiração o robô delta, foram desenvolvidas diferentes variantes do modelo. Nestes incluem-se os robôs delta lineares que, ao contrário do modelo desenvolvido por Clavel, o acionamento é feito através de juntas prismáticas (Translação linear). Para impressoras 3D, em específico, esta translação é feita verticalmente. Este modo de funcionamento permite o aumento de altura de trabalho através do aumento de curso linear destas juntas. O volume de trabalho para estas impressoras apresenta uma forma aproximadamente cilíndrica (Bell, C. 2015).

3.3. Impressora 3D Delta

As impressoras 3D do tipo Delta apresentam três atuadores lineares dispostos na vertical formando um círculo, contrariamente às impressoras 3D com configuração cartesiana, em que os atuadores lineares estão em paralelo a cada um dos três planos ortogonais.

Tendo em conta as características deste tipo de impressoras, nomeadamente as suas velocidades de operação e precisão de movimento, o interesse dos fabricantes de impressoras 3D de baixo

custo tem vindo a aumentar. Na Figura 12A encontra-se esquematizado os principais componentes que permitem o funcionamento de uma impressora delta. Neste tipo de impressoras a translação é feita verticalmente por três slides, onde são fixados os braços no elemento deslizante.

Este tipo de configuração – Delta – tem a possibilidade de permitir o aumento da altura de trabalho, possibilitado pelo aumento do curso ao longo das torres. Tendo estas torres uma disposição triangular e para que o elemento central se mova no plano XY, é necessária a sincronização dos movimentos dos braços sobre os slides para assim o possibilitar. Para um movimento na vertical, o movimento ascendente ou descendente tem de ser igual entre os braços. De salientar que o extrusor, nas impressoras FDM, é colocado no centro do elemento central. Estas têm como particularidade a sua complexa cinemática, apesar disso usa um sistema de eixos cartesianos. Posto isto, o sistema de controlo tem que ser capaz de fazer a conversão da posição desejada do extrusor em posições equivalentes dos três slides verticais.

Quanto à questão do volume de trabalho desta tipologia de impressora pode-se aproximar a uma forma cilíndrica. Na Figura 12B encontra-se um exemplo ilustrativo da área útil de impressão neste tipo de impressoras (Lipson e Kurman, 2013).

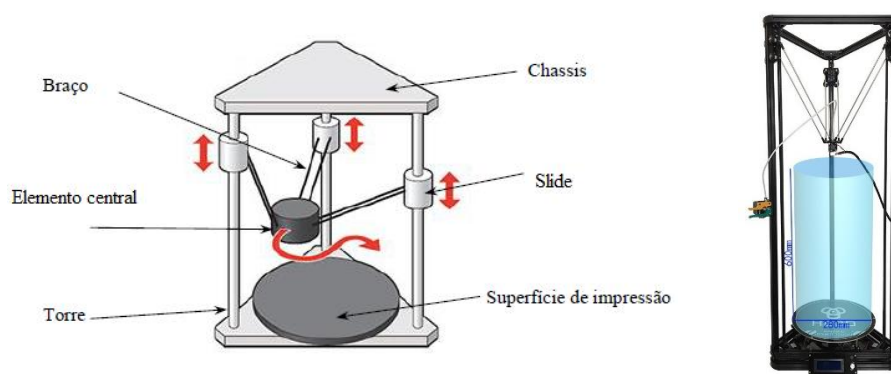


Figura 12. A) Componentes de uma impressora 3D Delta; B) Área útil de impressão, adaptado de (Schmitt et al, 2008)

Quanto à composição de uma impressora Delta, os seus principais componentes são o **elemento central**, os **braços** e os **slides**. Estes componentes devem ter como principais características o seu peso e rigidez, de modo a possuírem uma inércia reduzida para tirar proveito das características de funcionamento destas impressoras. Nas extremidades dos braços são aplicadas rotulas, ligando uma extremidade do braço ao slide e a outra extremidade ao elemento central.

Em termos de **sistema de transmissão** destas impressoras, o mais comum consiste num conjunto de polias e correias acionadas por motores de passo. Nas impressoras cartesianas é comumente aplicado um sistema de transmissão por meio de fusos, convertendo o movimento angular dos motores em movimento linear dos slides. Esta solução de transmissão de movimento não é adotada nas impressoras delta pois, o seu fator de redução elevado iria limitar as velocidades.

O **chassis** assemelha-se a um prisma triangular conferindo-lhes assim uma elevada rigidez estrutural. Normalmente, são usados perfis extrudidos de alumínio para aplicação nas vigas das torres bem como nas vigas laterais.

O **controle eletrônico** destas impressoras é feito por CNC. Este tipo de programação é bastante versátil no que diz respeito ao controlo de qualquer máquina-ferramenta como é o presente caso das impressoras 3D por FDM. Os comandos são enviados em *g-code*, como já mencionado, possibilitando a alteração dos vários parâmetros de operação. Embora o seu modo de funcionamento seja diferente, os comandos CNC para estas impressoras são semelhantes aos de outros tipo de máquinas. No caso das impressoras Delta, podem apresentar comandos especializados para adicionar funcionalidades específicas para como, por exemplo, calibrar o sistema de movimentação.

O *software* da máquina, também chamado de *firmware*, é o programa que será corrido no sistema de controlo da máquina. Este programa tem a capacidade de interpretar as instruções em *g-code*, sendo capaz de controlar todos os periféricos da impressora, desde ventoinhas, sensores de temperatura à resistência de aquecimento. Os *firmwares* mais conhecidos são o *Marlin* ou o *Repetier-Firmware*, que foram adaptados para o funcionamento com este tipo de impressora.

O componente eletrônico capaz de fazer estas operações consiste num microcontrolador. Estes circuitos integrados são os responsáveis pela interface de comunicação com os periféricos e que terá de ser compatível com o tipo de impressora. Para as impressoras Delta, os microcontroladores são responsáveis por fazer o cálculo de conversão da posição dos slides em função da posição desejada do elemento central. Não existe nenhum microcontrolador adaptado especificamente para este tipo de impressoras, sendo portanto o *firmware* programado que terá de ser compatível com o tipo de impressora a operar. O tipo de microcontroladores mais comuns em impressoras 3D são baseados em *Arduino* (RepRap, 2017).

4. Estudo de Mercado

Em termos de impressoras 3D, fez-se um levantamento de alguns exemplos existentes no mercado salientando características dos diferentes fabricantes, sendo elas a Delta Wasp, a SpiderBot e a Pallen PAM.

A **Delta Wasp** trata-se de uma empresa italiana que desenvolve e comercializa impressoras 3D majoritariamente com configuração Delta. Um dos objetivos da empresa é o de angariar fundos para financiar o investimento para impressão de habitações com materiais sustentáveis.

As impressoras Delta Wasp têm particularidades únicas, no caso da impressora Delta Wasp 2040 – Figura 13, tem o seu alimentador de filamento flutuante, em que este é suspenso por três elásticos ligados aos slides, permitindo assim que a alimentação do filamento fique mais próximo do extrusor. A Delta Wasp disponibiliza um kit de extrusão de argila que pode substituir os extrusores de termoplásticos conhecido por LDM Wasp. Esta unidade permite a impressão de outros materiais tais como o barro, porcelana, alumina, zirconia entre outros cerâmicos (3dhubs, 2018).



Figura 13. Delta Wasp 2040 (3dhubs, 2018).

A **SpiderBot** comercializa um produto base e disponibiliza a adição de extras tais como um extrusor duplo, um aquecedor da câmara de impressão, ou ainda uma câmara para monitorizar remotamente o processo de impressão – Figura 14 (Spiderbot, 2018).

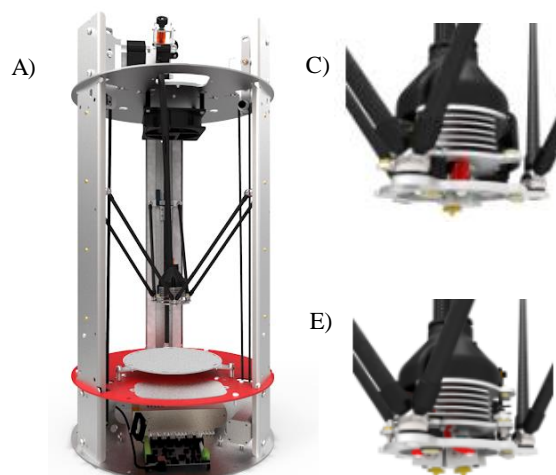


Figura 14. A) Impressora 3D SpiderBot V2.2; B) Extrusor Simples e C) Extrusor Duplo (Spiderbot, 2018).

A **Pallen PAM** diferencia-se das empresas anteriormente mencionadas pois apresenta um conceito diferente tanto a nível de design como de funcionamento. Em termos de funcionamento, tem como diferença a sua base ser móvel e o módulo de alimentação e de extrusão de material estar fixo assim sendo, a peça a imprimir acompanha o movimento da base – Figura 15A. Posto isto, e sendo a unidade de extrusão fixa, é possível que esta seja mais complexa e robusta influenciando a dinâmica da máquina.

Esta impressora conta com quatro injetores independentes, alimentados por *pellets* de termoplástico – Figura 15B. Este sistema é semelhante aos injetores de alta pressão de termoplástico que utilizam uma fonte quente e um fuso para fluidificar e comprimir os grânulos de material. Estes injetores convergem num bico o que permite a extrusão de multimaterial (PollenPAM, 2018).

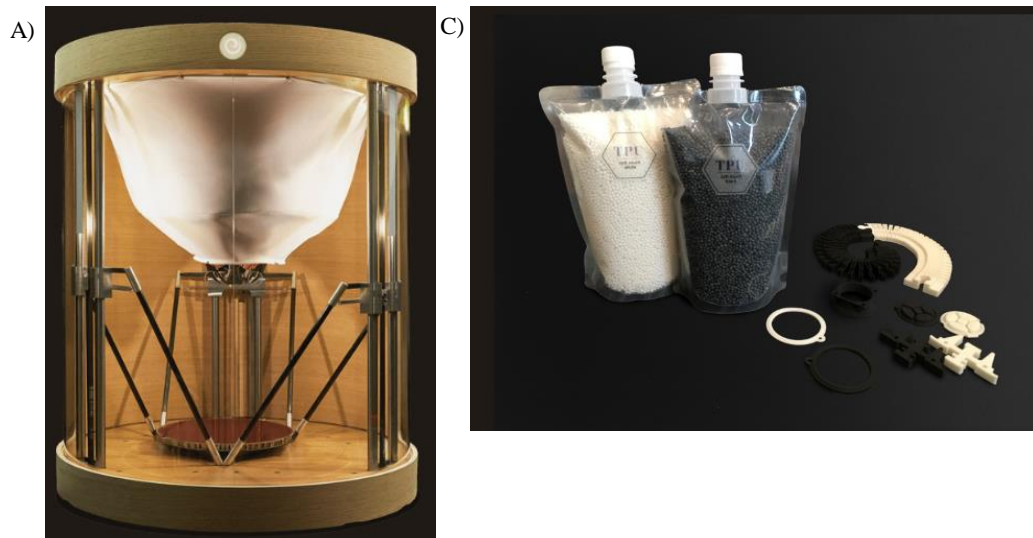


Figura 15. A) Impressora 3D Poleen Pam Série P e B) Pellets de termoplástico (PollenPAM, 2018).

4.1. Impressoras 3D Cartesianas VS Impressora 3D Delta

Atualmente, as impressoras 3D Cartesianas juntamente com as impressoras 3D Delta são os tipos de impressora 3D mais utilizados. As impressoras 3D cartesianas são o tipo mais conhecido e usado, mas nos últimos tempos as impressoras Delta têm tido um crescimento de utilização.

As impressoras 3D Cartesianas recebem este nome devido ao sistema de coordenadas que utilizam para o movimento. O movimento traduz-se em três eixos ortogonais, que podem variar segundo a máquina. O extrusor move-se segundo estas coordenadas para realizar a impressão.

As impressoras 3D Delta são baseadas no robot Delta e, usualmente, têm uma base de impressão circular, o extrusor está posicionado no elemento central que se move consoante o movimento dos braços que, por sua vez, têm movimento ascendente e descendente ao longo das torres, por meio de slides. Dependendo da altura a que se encontra cada um dos braços, o extrusor irá movimentar-se ao longo da área de impressão. Devido a esta forma de posicionamento, os limites de impressão destas impressoras são definidos pelo diâmetro da base e pela altura dos braços.

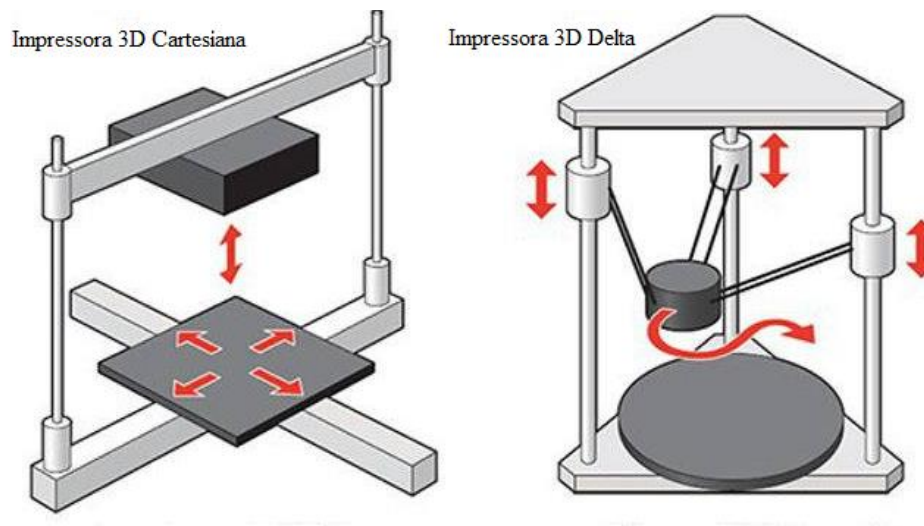
Uma vez analisadas as principais características de ambos os tipos de impressora, seguidamente, é apresentada uma sucinta comparação entre as duas tipologias. Na Tabela 2 encontram-se as vantagens associadas a cada tipo destas impressoras e, por conseguinte, na Tabela 3 encontram-se discriminadas as desvantagens. Na Figura 16 é possível observar a fluidez dos movimentos que caracterizam as duas impressoras.

Tabela 2. Vantagens impressora 3D Cartesiana VS impressora 3D Delta.

IMPRESSORA 3D CARTESIANA	IMPRESSORA 3D DELTA
Fácil de calibrar	Alta velocidade
Fácil análise e correção de erros	Alta definição
Mais fácil de ajustar e evitar erros	Fiável e precisa
	Ampla capacidade de movimento

Tabela 3. Desvantagens impressora 3D Cartesiana VS impressora 3D Delta.

IMPRESSORA 3D CARTESIANA	IMPRESSORA 3D DELTA
Menor velocidade de impressão	Primeira calibração difícil
Tem inércia em cada eixo de movimento e pode afetar a aceleração	Maior volume de equipamento
	Construção deficientes prejudicam a calibração
	Menos informação disponível

**Figura 16.** Impressora 3D Cartesiana VS Impressora 3D Delta, adaptado de (Schmitt et al, 2008).

Na Tabela 4 encontram-se sumariadas as características destas impressoras associadas à área de impressão.

Tabela 4. Características de impressão associadas à impressora 3D cartesiana e à impressora 3D Delta.

	IMPRESSORA 3D CARTESIANA	IMPRESSORA 3D DELTA
ÁREA DE IMPRESSÃO	Retangular	Circular
MOVIMENTO DOS EIXOS	Movimentação dos eixos independentes não afetando a resolução dos outros eixos	Movimentação dos 3 eixos simultânea para definir uma posição
RAPIDEZ DE IMPRESSÃO	A impressora 3D Delta apresenta uma maior rapidez de impressão devido à harmonia existente entre os 3 eixos, ao contrário dos movimentos independentes de uma impressora 3D Cartesiana	
ALTURA DE IMPRESSÃO	A impressora 3D Delta apresenta uma altura de impressão mais elevada devido à orientação vertical de todos os eixos, permitindo uma maior precisão durante a impressão.	

Em suma, é possível dizer que as impressoras 3D do tipo Delta se caracterizam pela sua maior velocidade de operação em comparação com as cartesianas. Esta característica é amplamente influenciada pela sua estabilidade.

As impressoras Delta também têm a particularidade de poder aumentar a sua altura de impressão sem reduzir a sua qualidade, no entanto, é necessária uma boa calibração inicial.

Por outro lado, as impressoras do tipo cartesiano são as impressoras mais comuns, o que as torna mais acessíveis tanto na questão de aquisição bem como de concessão. São também mais fáceis de calibrar e, normalmente, a proporção entre o volume da máquina e o volume de impressão é geralmente melhor que relativamente às impressoras Delta (Sánchez, 2015, Schmitt, 2008, e Lipson e Kurman, 2013).

Capítulo 3 | Dimensionamento

1. Dimensionamento preliminar

Tal como anteriormente mencionado, o projeto partiu de uma lacuna existente na indústria, onde se verificou a necessidade de ampliar a capacidade de uma impressora 3D já existente na organização. Deste modo, algumas das variáveis necessárias no dimensionamento da máquina foram previamente delineadas, sendo estas as seguintes:

- Altura máxima da máquina de 5 m;
- Base da máquina de, pelo menos, 2 m de diâmetro;
- Área útil de impressão de, pelo menos, 1,4 m de diâmetro;
- No mínimo 1 m³ de volume útil de impressão;
- Base de impressão com dimensão suficiente para imprimir um objeto com uma área quadrada de 1 m de largura;
- Tendo em conta a altura da máquina, um requisito é que as torres da máquina sejam divididas, possibilitando o transporte da mesma num veículo ligeiro de mercadorias do tipo furgão.

Antes de iniciar a projeto da impressora 3D, foi necessário estabelecer um conjunto de dimensões. Dimensões essas referentes às peças que compõem o chassi, assim como as dimensões gerais dos componentes móveis, nomeadamente, os braços, o elemento central e os slides. No que diz respeito à configuração do chassi foi proposto duas opções – a Opção A e a Opção B conforme a Figura 17.

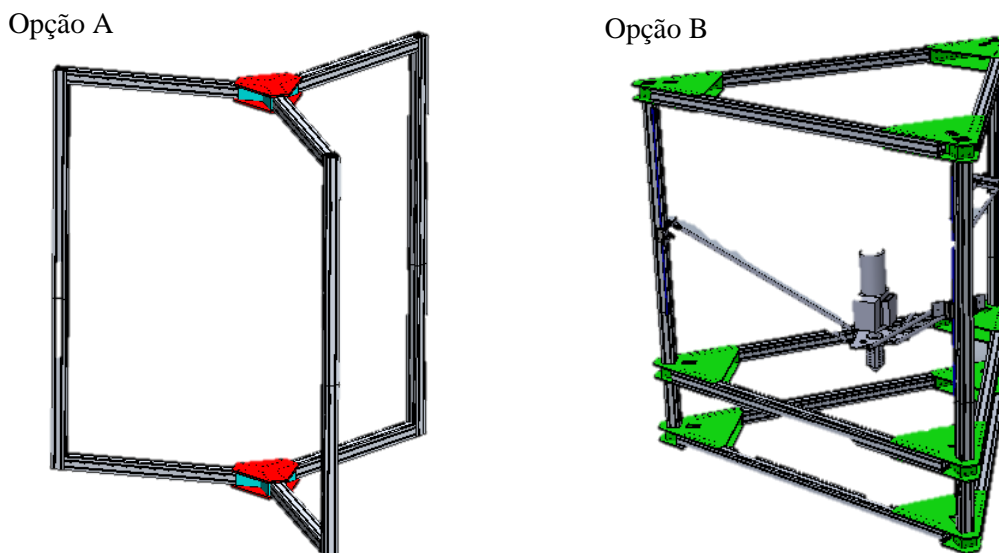


Figura 17. Opção A e Opção B para escolha do chassi.

Primeiramente, estabeleceram-se as variáveis para cada uma das dimensões da impressora, tendo em conta, em primeira instância, os diâmetros da máquina e o diâmetro de impressão, o comprimento dos braços e os *offsets* do elemento central e dos slides.

Após a análise das variáveis para o dimensionamento, realizou-se a modelação matemática das relações entre as diferentes variáveis com o objetivo de calcular os seus valores em função das características pretendidas. Na Figura 18 encontram-se mencionadas e especificadas as principais dimensões da máquina.

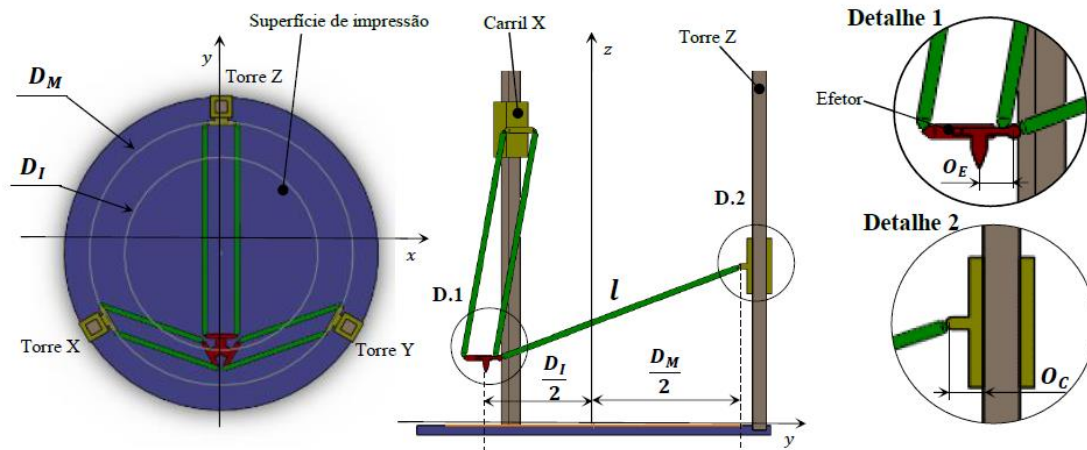


Figura 18. Principais dimensões da máquina onde, D_i – diâmetro de impressão, D_m – diâmetro da máquina, l – comprimento dos braços, O_c – *offset* do slide e O_E – *offset* do elemento central (Abreu, 2017).

1.1. Relações geométricas

1.1.1. Ângulos

É fundamental o dimensionamento ter por base os ângulos formados entre os vários componentes. Assim, a correlação das várias medidas num só parâmetro torna-se indispensável, bem como a limitação de alguns ângulos na cadeia cinemática da máquina permitindo assim uma garantia da estabilidade e o funcionamento correto da máquina.

Posto isto, e de acordo com a Figura 18, os ângulos com maior influência no dimensionamento são: o ângulo entre o elemento central e os braços (α) e o ângulo formado entre o slide e os braços (β).

Analisando o ângulo α , este pode ser definido em duas situações: quando o elemento central se encontra no centro do círculo de impressão – Figura 19 e quando o elemento central se encontra na periferia do círculo de impressão num ponto mais afastado de uma das três torres – Figura 20. Nesta posição o ângulo α assume o seu valor mínimo.

Quanto ao ângulo β , este é referente à situação em que o elemento central se encontra na periferia do círculo de impressão num ponto próximo de uma das torres. O conhecimento deste ângulo não tem a mesma importância comparativamente ao ângulo α no entanto, é um fator crucial para garantir que o elemento central não colide com uma das torres – Figura 21.

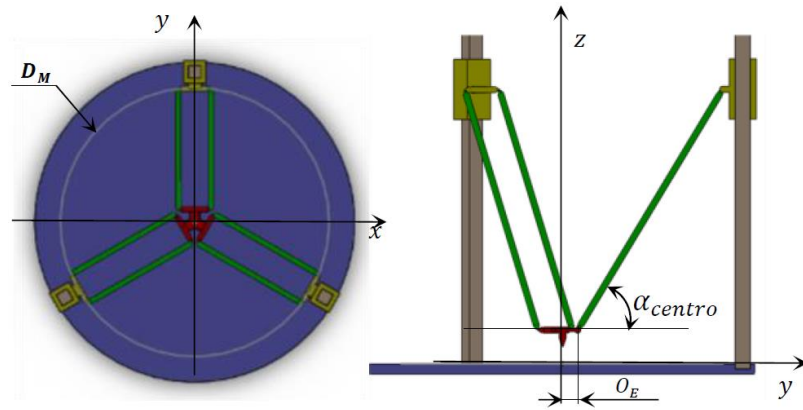


Figura 19. Ângulo α quando o elemento central se encontra ao centro da área de impressão (Abreu, 2017).

$$\frac{\frac{D_M}{2} - O_E}{l} = \cos \alpha_{centro} \quad (1)$$

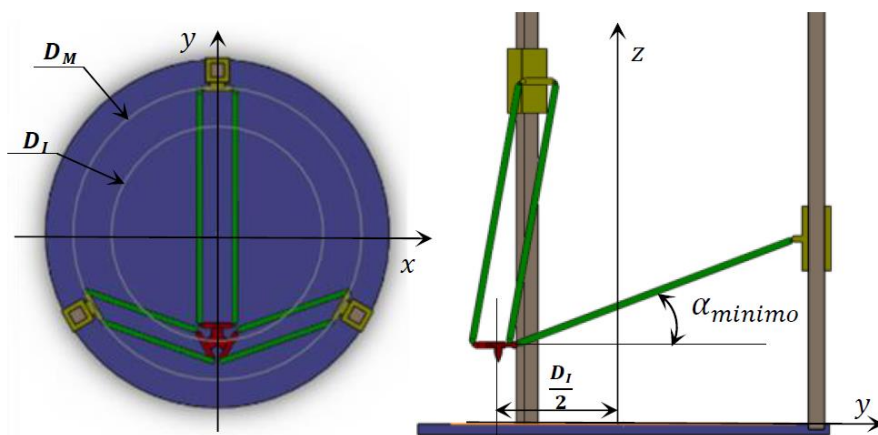


Figura 20. Ângulo α quando o elemento central se encontra na periferia da área de impressão (Abreu, 2017).

$$\frac{\frac{D_M + D_L}{2} - O_E}{l} = \cos \alpha_{minimo} \quad (2)$$

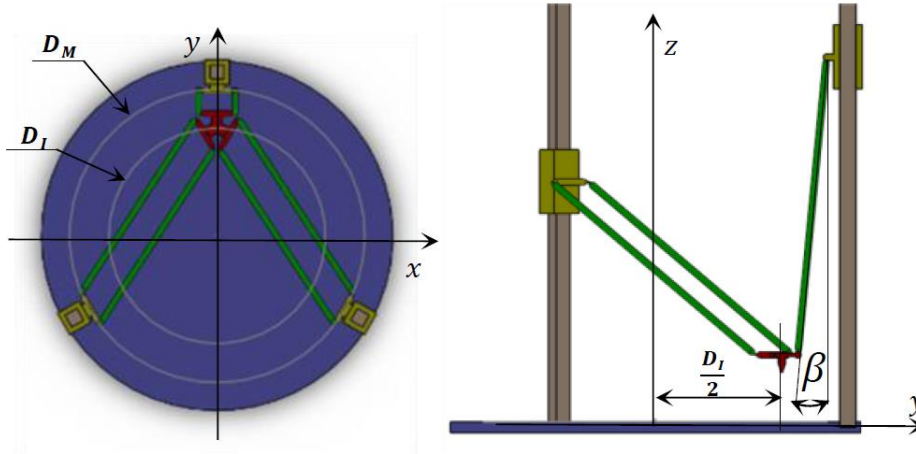


Figura 21. Ângulo β quando o elemento central se encontra na periferia da área de impressão (Abreu, 2017).

$$\frac{\frac{D_M + D_I}{2} - O_E}{l} = \sin \beta \quad (3)$$

As relações geométricas supracitadas vão implicar uma consideração a ter em conta – o rácio entre o volume de trabalho e o volume da máquina. Pois, quanto maior o *offset* do elemento central, maior o diâmetro máquina para um mesmo diâmetro de impressão. Esta conclusão vai ao encontro da igualdade entre as equações (1) e (2), dando origem à equação 4.

$$l = \frac{D_i}{2 \times (\cos \alpha_{\text{mínimo}} - \cos \alpha_{\text{centro}})} \quad (4)$$

Através da pesquisa realizada ao longo da elaboração do presente trabalho, várias fontes sugerem a limitação entre os ângulos formados entre os braços e o elemento central, é sugerido que o ângulo $\alpha_{\text{mínimo}}$ não seja inferior a 20° e que o ângulo α_{centro} ronde os 60° . Tendo como base as recomendações é possível obter uma proporção equilibrada entre o diâmetro da máquina e o diâmetro da impressão.

1.1.2. Afastamento entre os braços

O afastamento entre os braços representa uma variável que, em termos de cálculo dinâmico de impressão não tem uma influência significativa no entanto, é de grande relevância para a estabilidade do elemento central. Pois, quanto maior o afastamento entre os braços, maior será a absorção de esforços no elemento central.

Para um bom funcionamento, o afastamento entre os braços de cada par de braços tem de ser igual como seria espectável. Quanto maior o *offset* do elemento central, maior será o afastamento dos braços, conferindo uma maior estabilidade do elemento central. Mas este

aumento de estabilidade, vai traduzir-se num aumento do diâmetro máquina (D_M) para um mesmo diâmetro de impressão (D_i).

1.1.3. Altura de impressão

A altura de impressão não influencia diretamente a cinemática do sistema. Em termos de desenho da máquina, é necessário determinar a altura das torres de forma a ter disponível a altura de impressão desejada.

Este cálculo simplifica-se ao considerar-se que um qualquer par de braços se encontra na posição vertical. Assim, perante esta situação, consegue-se determinar o curso vertical necessário para quando o elemento central se encontra na altura máxima de impressão. O volume de impressão deste tipo de impressoras aproxima-se a uma forma cilíndrica, onde a dimensão (h), representa a altura da mesma. Assim sendo, o comprimento das torres (H) tem de ser superior à soma da altura de impressão desejada com o comprimento dos braços (l), tal como representado na Equação 5 e na Figura 22.

$$H \geq h + l \quad (5)$$

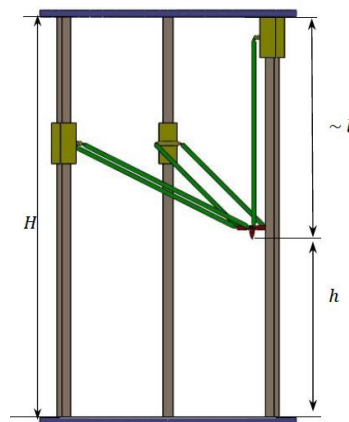


Figura 22. Cálculo entre as torres em função da altura desejada (Abreu, 2017).

1.1.4. Velocidade e Resolução

É necessário estudar a relação entre as velocidades vertical dos slides e a velocidade horizontal resultante no elemento central. Tendo em conta que estas translações ocorrem num plano perpendicular à base da impressora e, através das relações trigonométricas na cinemática do sistema, é possível calcular a relação entre estas duas velocidades. Ao quociente entre a velocidade do slide e a velocidade horizontal do elemento central dá-se o nome de fator de multiplicação.

A variação de fator de multiplicação está dependente da posição do elemento central, que por sua vez está dependente da posição do ângulo α .

O ângulo α deve ser limitado pelas situações em que os braços se encontram numa posição horizontal ($\alpha=0^\circ$) ou vertical ($\alpha=90^\circ$).

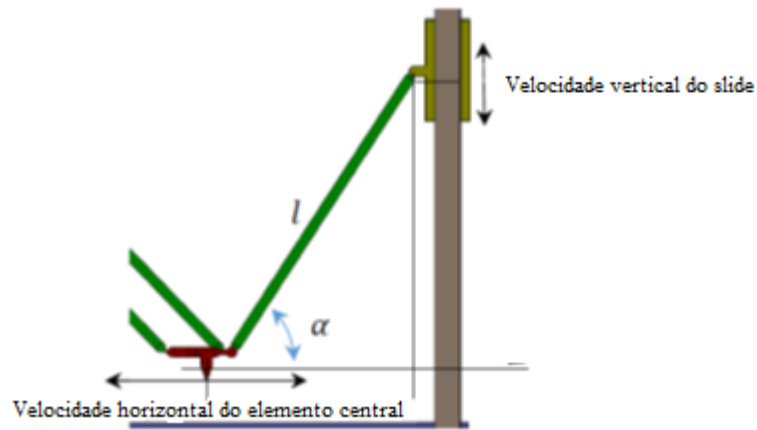


Figura 23. Relação entre a velocidade vertical dos slides e a velocidade horizontal do elemento central – fator de multiplicação (Abreu, 2017).

$$\text{fator de multiplicação} = \frac{\text{velocidade vertical do slide}}{\text{velocidade horizontal do ejetor}} = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - (\cos \alpha)^2}} \quad (6)$$

$$0^\circ < \alpha < 90^\circ$$

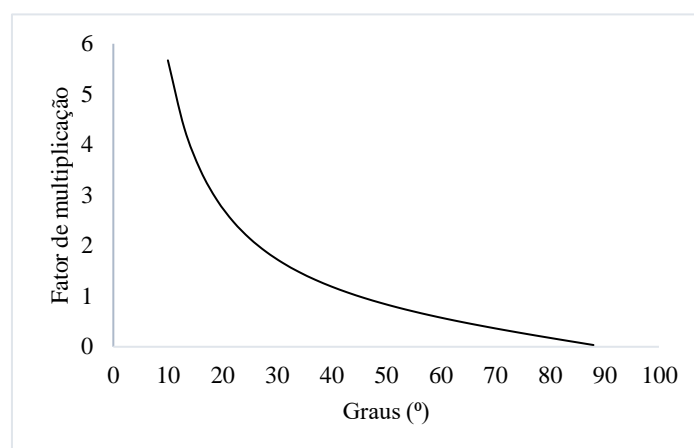


Figura 24. Variação do fator de multiplicação com o ângulo α .

Tabela 6. Variação do fator de multiplicação com o ângulo α .

GRAU (°)	FATOR DE MULTIPLICAÇÃO
10	5,67
20	2,75
30	1,73
40	1,19
50	0,84
60	0,58
70	0,36
80	0,18
90	0,00

Através da análise do gráfico da Figura 24 é possível concluir que a relação apresentada anteriormente não é linear. Verificando-se que para ângulos α baixos, situação em que o elemento central se encontra mais afastado em relação a uma das torres, o fator de multiplicação assume os valores mais elevados.

Tomando como exemplo quando o ângulo α assume o valor de 30° , esta situação significa que os slides verticais precisam de se movimentar 1,73 vezes mais rápido do que o elemento central para impor a este uma velocidade constante.

Exclui-se a hipótese de fazer um dimensionamento ótimo pois, este passaria por criar um algoritmo de resolução iterativo com o objetivo de satisfazer as características.

1.1.5. Elemento central

Temos de ter presente que o elemento central está sujeito a esforços, que podem induzir a uma inclinação indesejada, originando imprecisão.

Podem-se destacar dois aspetos importantes na estabilidade do elemento central:

- A geometria da máquina vai influenciar a carga que vai ser exercida durante a operação nas articulações. O ideal é a projeção de uma geometria que minimize as cargas exercidas na estrutura.
- O tipo de articulação usada.

Os esforços gerados na operação da máquina, nomeadamente, por inércia, atrito ou carga excessiva no extrusor (ou outra ferramenta de impressão) podem gerar uma inclinação desaconselhável durante a operação levando à imprecisão.

Todos os aspetos supra detalhados permitem chegar a uma geometria ideal devido ao seu inter-relacionamento tendo em conta as suas vantagens, as suas limitações e ainda os aspetos de concessão mecânica. Um exemplo prático é o aumento do espaço do braço com o intuito de melhorar a estabilidade, mas, as extensões laterais no slide para acompanharem este incremento podem reduzir a estabilidade real.

2. Desenho detalhado

Tendo as dimensões das variáveis definidas no subcapítulo anterior foi possível passar para a segunda fase – o desenho detalhado de todos os componentes. Estes foram desenhados em *SolidWorks* (*software* CAD).

O desenho prévio dos componentes permite virtualmente testar diferentes soluções referentes à montagem e funcionamento da máquina. Ter os desenhos em CAD é essencial para a modelação dos componentes desenvolvidos, tanto no caso de serem componentes que se encontram disponíveis no mercado ou para componentes que tenham de ser fabricados.

A modelação de todos os componentes e sua montagem em ambiente virtual, CAD, permite-nos fazer algumas previsões e verificações no que diz respeito à montagem e funcionamento da máquina.

Tendo em conta os pressupostos admitidos para a execução do projeto – D_M e D_i – e por manipulação matemática da equação 4 foi possível determinar o comprimento dos braços: $l = 1\ 700$ mm. Posteriormente, determinou-se o *offset* do elemento central – $O_E = 150$ mm – pela equação 1. Nesta fase, também foi possível verificar que se tem 3 300 mm de altura de impressão pela equação 5.

2.1. Elemento central

Decidiu-se fazer o elemento central a partir de chapa de alumínio, para ser fabricado por maquinação CNC ou por dois processos, corte a jato de água e maquinação CNC, este último só será necessário para as “caixas” para encaixe dos “pilares”. Estes pilares vão servir de apoio aos veios onde vão ser acopladas as rótulas dos braços. As figuras 25 e 26 demonstram o elemento central projetado.

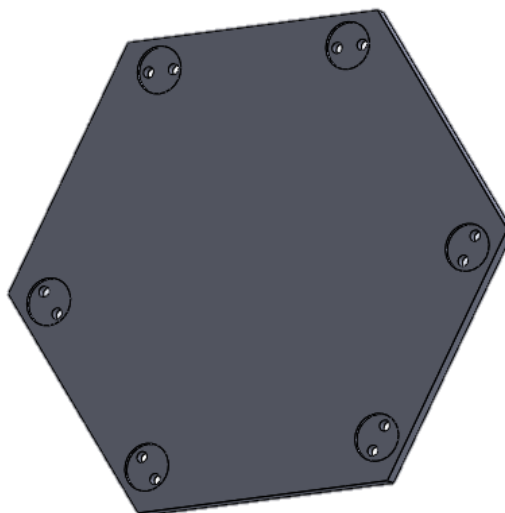


Figura 25. Placa base do elemento central

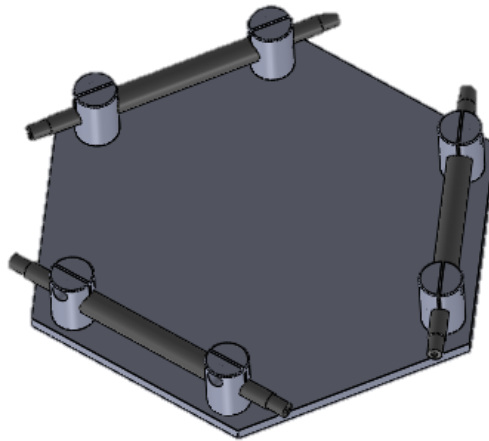


Figura 26. Elemento central completo.

2.2. Articulações

Para as articulações entre elemento central/braço e braço/slide, decidiu-se usar rótulas do tipo *uniball*, da marca *Igus*. Por este elemento ser fabricado em polímero permite a obtenção de características processuais interessantes tanto na problemática do peso, por não necessitarem de lubrificação e o seu custo também ser atrativo. Na Figura 27 encontra-se a rótula KARM-12 CL MH.

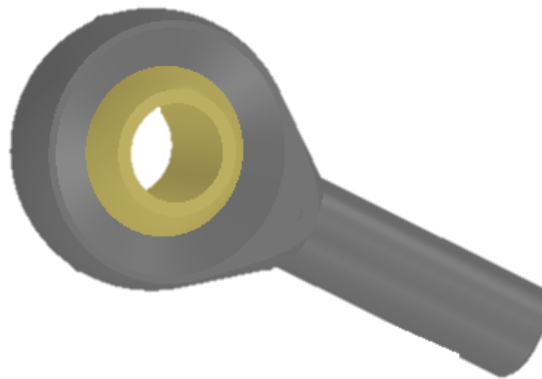


Figura 27. Rótula KARM-12 CL MH.

O afastamento entre a ponta do veio e o pilar tem de ser tal que possibilite a inclinação dos braços quando o elemento central está, por exemplo, na periferia da zona de impressão. Nesta fase já se definiu previamente o afastamento dos braços – 250 mm.

A solução apresentada de acoplamento das rotulas ao elemento central também foi aplicado aos slides, como irá ser apresentado em seguida.

2.3. Braços

Os braços são componentes com grande influência no funcionamento da máquina, pelo que deverão ser leves e rígidos.

O seu comprimento deve ser rigoroso pois, uma pequena variação na sua dimensão vai originar erros de posicionamento do elemento central. Os braços foram feitos em tubo de alumínio, $\varnothing = 38 \times 32$ mm. Tendo em conta estas dimensões e as refentes à rotula foi necessário desenvolver uns casquilhos para a extremidade do tubo. Estes casquilhos irão ser soldados e, posteriormente, a rótula irá enroscar neste último. Entre o casquilho e a rótula foi prevista a utilização de uma porca, permitindo fixar a sua posição e assim garantir o comprimento nominal do braço. Sabendo que o comprimento nominal dos braços é 1 700 mm (entre os centros das rótulas), o tubo (contabilizando casquilhos) medirá cerca de 1 640 mm. Assim sendo, o comprimento nominal será medido entre os centros da esfera das rótulas. A diferença entre o comprimento nominal e o comprimento do tubo, permitirá o uso da porca já referida e ainda espaço para afinação.

Na Figura 28 é possível observar a extremidade do conjunto de todos os componentes que constituem o braço.



Figura 28. Extremidade do braço.

2.4. Slides

Para o slide selecionou-se uma solução da empresa *Minitec*, pois esta apresenta soluções para movimentação linear. Selecionou-se uma solução de *slide* – designação da empresa – uma vez que, este se conjuga com o perfil selecionado para a construção da máquina. Para que não ocorra associação errada da designação dos componentes de ora avante este componente é designado de *componente deslizante*. Assim sendo, o slide é formado por perfis de alumínio onde estão alojados os roletes. Quando o slide se desloca ao longo da torre, os roletes vão-se fazer guiar por um guia.

Aproveitando que o componente deslizante é construído em perfil, aproveitaram-se os “rasgos” característicos destes perfis e os acessórios da *Minitec* para entre componentes o que irá permitir

a fixação da solução desenvolvida para acoplamento das rotulas, como na situação entre o elemento central e os braços. Na Figura 29 encontra-se representado o conjunto de componentes que formam o slide.

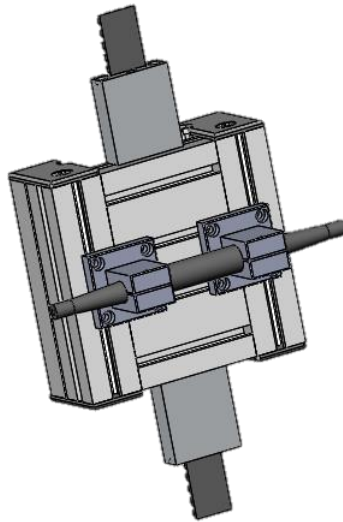


Figura 29. Slide.

2.5. Torres

O perfil escolhido para as torres foi o 90x90 L da *Minitec*. Tendo sido analisadas as suas características e realizada a análise estática em *SoliWorks* para se verificar os efeitos dos esforços na estrutura e assim tomar a melhor opção de perfil. O guia anteriormente mencionado está alojado ao longo do perfil num acessório adequado como representado na Figura 30.

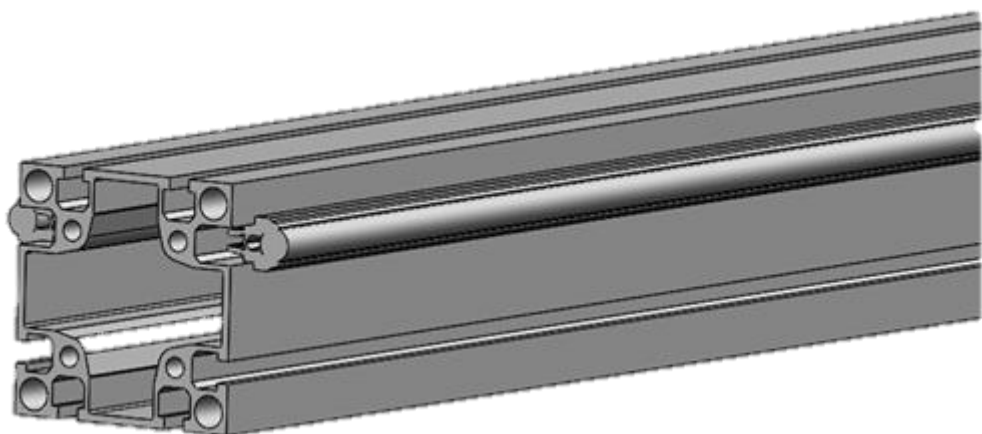


Figura 30. Torre.

2.6. Chassis

O chassis e toda a estrutura de suporte têm como principal função suportar todos os outros componentes e ser capaz de absorver cargas verticais provenientes dos componentes móveis em operação.

A estrutura da máquina tem uma configuração triangular, como já referido e justificado anteriormente. Assim sendo, a estrutura assemelha-se a um prisma triangular. Posto isto, a estrutura é formada por vigas tendo sido utilizado o perfil 90x90 L da *Minitec*. Além disso, foi necessário desenvolver os cantos para a ligação das várias vigas sendo possível ter a estrutura desejada. Uma vez que, a Opção A se tornou viável, não foi necessário realizar a construção através da Opção B que seria mais complexa.

Neste tipo de máquinas também seria possível desenvolver uma estrutura com configuração hexagonal. Esta solução iria tornar a estrutura mais complexa e menos robusta o que é um aspeto indesejável, e o maior numero de peças seria também um aspeto negativo em termos de fabrico e montagem.

2.7. Cantos

Os cantos como, já referido anteriormente, têm a função de fazer as ligações entre as várias vigas que compõem o chassis. Desenvolveu-se assim os cantos, que são formados por várias peças ligadas entre si por um sistema de fixação aparafusada. Estas peças que compõem os cantos serão feitas em chapa de alumínio de 10 mm de espessura.

Após serem desenhadas em CAD, serão fabricadas em maquinação CNC e maquinação convencional, dependendo da exigência e complexidade da peça.

De salientar que os cantos, no caso desta máquina, os cantos superiores – Figura 31 – apenas têm a função de componente estrutural. Os cantos inferiores – Figura 32, para além da função estrutural, também irão ter a função de alojamento dos motores, como irá ser demonstrado. Além disso, também irão ter um sistema para equilíbrio da máquina em relação ao piso em que esta será montada e estará em funcionamento. Em comum, os cantos superiores e inferiores têm o alojamento das polias que irão possibilitar o movimento da correia transmissora de movimento.

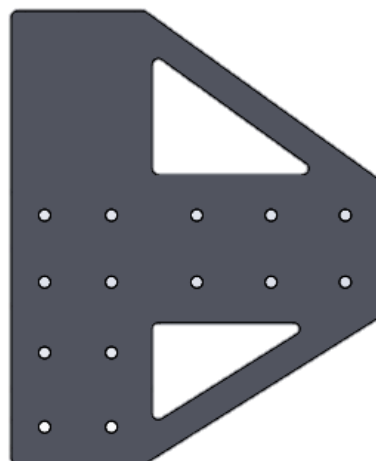


Figura 31. Cantos superiores.

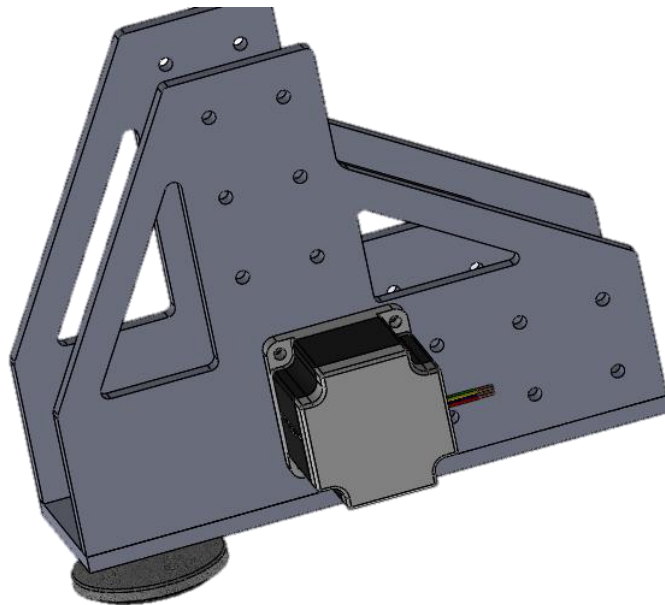


Figura 32. Canto inferior.

É importante salientar a necessidade de alterar a forma do perfil utilizado nas vigas transversais superiores para possibilitar a passagem da correia de acionamento dos slides. Para tal, foi necessário a maquinação de um entalhe no perfil para satisfazer esta necessidade como demonstra a Figura 33.

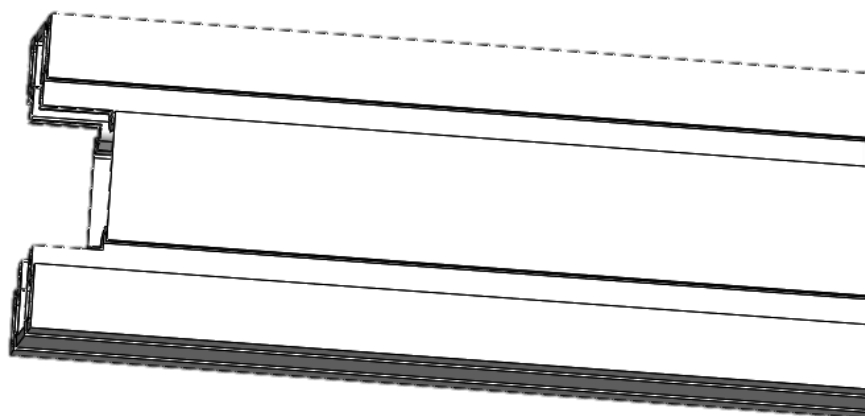


Figura 33. Pormenor do entalhe.

2.8. Painéis

Foi necessário desenvolver painéis para a união das vigas ao centro da máquina, também estes irão ser feitos em chapa de alumínio de 10 mm e, posteriormente fabricadas pelo processo de corte por jato de água, processo que satisfaz a exigência dimensional destas peças – Figura 34.

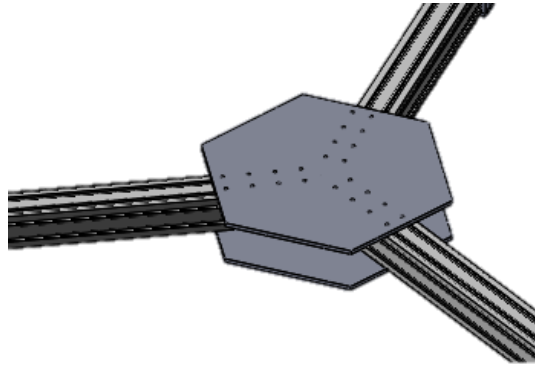


Figura 34. Painel de união das vigas.

Também se teve de desenvolver painéis para se fazer a união entre as vigas que formam as torres, aspeto solicitado para a concessão da máquina, para permitir um transporte da mesma mais facilitado, podendo então as torres ficarem divididas em duas peças a quando da condição de desmontagem da máquina – Figura 35.

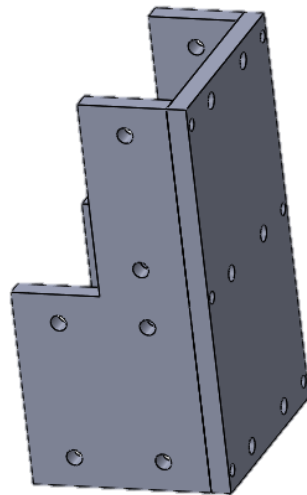


Figura 35. Painéis utilizados na divisão da torre.

3. Solicitações Mecânicas

Realizou-se um levantamento das massas de cada componente da parte móvel da máquina. Para tal, consultou-se o catálogo da *Minetec* e *Igus* para o dimensionamento dos slides e das rótulas, respetivamente. Por forma a agilizar o processo de determinação do peso das restantes peças modeladas em *SolidWorks* foi atribuído a cada desenho o material desejado, calculando a sua massa aproximada. Além disso, utilizou-se em simultâneo, a ferramenta *online* da empresa Ramada que com poucas iterações é possível saber o peso dos materiais. No entanto, este valor é apenas indicativo, pois a iteração é realizada em formato de matéria-prima, i.e. em bruto, fazendo com que o peso da peça final seja superior à realidade.

O **elemento central** é composto por um conjunto de peças constituído por três veios, seis pilares, uma placa base e um extrusor ou peça com uma massa até 10 Kg (esta massa permite-nos aumentar o grau de liberdade da escolha da ferramenta a incorporar na máquina). Na Tabela 6 encontram-se discriminadas todas as massas unitárias.

Tabela 8. Massas dos componentes do elemento central.

PEÇAS	MASSA UNITÁRIA (KG)	MASSA UNITÁRIA POR NÚMERO DE PEÇAS(KG)
Veio	0,531	1,593
Pilar	0,104	0,624
Placa base	2,849	2,849
Extrusor	10	10
TOTAL		15,066

O conjunto do **braco** é composto por um tubo, dois casquilhos, duas rótulas e duas porcas possui um peso total de 1,6 Kg.

Cada **slide** é composto por um conjunto de peças constituído por um componente deslizante, dois pilares, um veio e dois tensores. À semelhança do componente anterior, a Tabela 7 apresenta as massas unitárias dos componentes do slide.

Tabela 9. Massas dos componentes do slide.

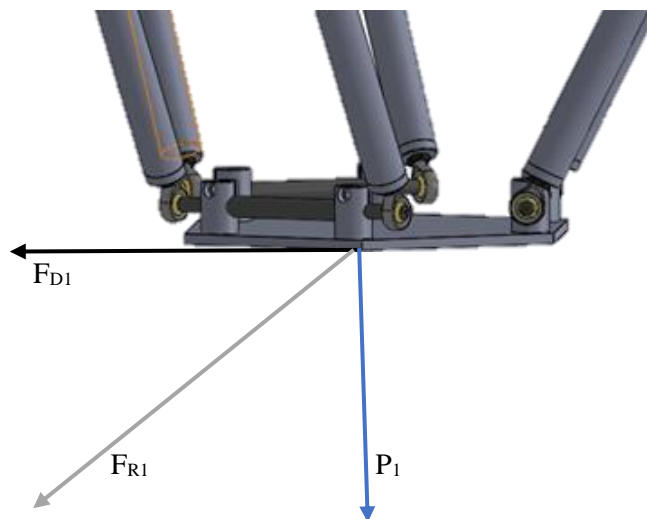
PEÇAS	MASSA UNITÁRIA (KG)	MASSA UNITÁRIA POR NÚMERO DE PEÇAS(KG)
Componente deslizante	2,7	2,7
Pilar	0,208	0,416
Veio	0,561	0,561
Tensor	0,236	0,472
TOTAL		4,149

Tabela 10. Massas associadas a todos os componentes.

CONJUNTO	MASSA UNITÁRIA (KG)	MASSA TOTAL (KG)
Elemento central e extrusor	15,066	15,066
Braços	1,600	9,6
Slides	4,149	12,447

Através dos valores da Tabela 8, i.e. das massas associadas a todos os componentes é possível o cálculo das cargas associadas quer ao elemento central – Tabela 9 – quer a cada slide – Tabela 10. Para o cálculo das cargas associadas foi necessário determinar as forças que estavam a ser exercidas nos elementos, na Figura 36 encontra-se exemplificado as forças que atuam no elemento central enquanto que na Figura 37 encontra-se as forças que atuam no slide.

Ao longo da pesquisa realizada verificou-se que o valor de aceleração máxima com que a maioria das máquinas vem configurada por defeito ronda os 2 m.s^{-2} . Este valor corresponde à aceleração do sistema em movimentação linear, i.e. os slides. Tomando o valor máximo admissível para o fator de multiplicação anteriormente calculado de 2,75, a aceleração máxima do elemento central de $5,5 \text{ m.s}^{-2}$.

**Figura 36.** Força resultante no elemento central.**Tabela 11.** Cargas associadas ao elemento central.

COMPONENTES	CÁLCULO	VALOR ADMITIDO
Massa concentrada	$15,066 \text{ Kg} + 9,6 \text{ Kg} = 24,666 \text{ Kg}$	24,7 Kg
Peso (P_1)	$24,7 \text{ Kg} \times 9,8 \text{ m.s}^{-2} = 242,06 \text{ N}$	242 N
Força dinâmica (F_{D1})	$24,7 \text{ Kg} \times 5,5 \text{ m.s}^{-2} = 135,85 \text{ N}$	136 N
Força resultante (F_{R1})	$\sqrt{242 \text{ N}^2 + 136 \text{ N}^2} = 278,5 \text{ N}$	279 N

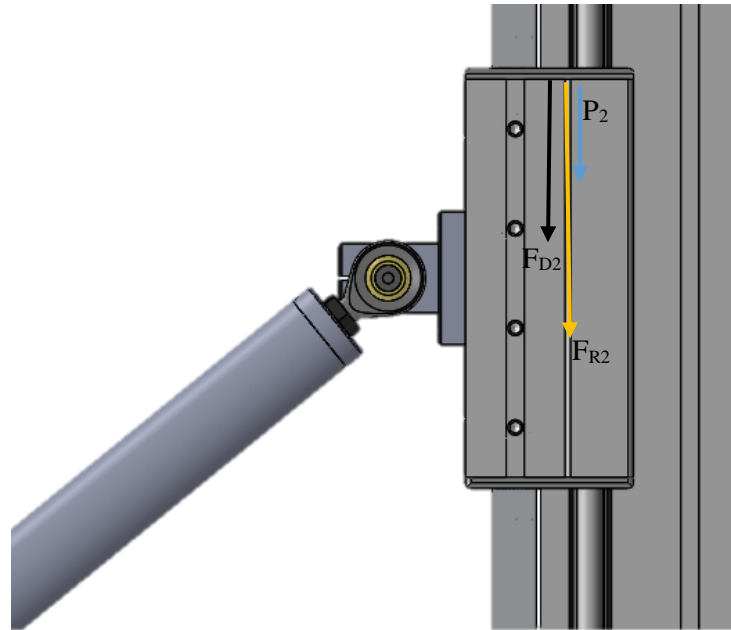


Figura 37. Força resultante no slide.

Tabela 12. Cargas associadas ao slide.

COMPONENTES	CÁLCULO	VALOR ADMITIDO
Massa concentrada	$15,066 \text{ Kg} + 9,6 \text{ Kg} + 12,447 = 37,113 \text{ Kg}$	37,2 Kg
Peso (P_2)	$37,2 \text{ Kg} \times 9,8 \text{ m.s}^{-2} = 364,56 \text{ N}$	365 N
Força dinâmica (F_{D2})	$37,2 \text{ Kg} \times 2 \text{ m.s}^{-2} = 74,4 \text{ N}$	74,4 N
Força resultante (F_{R2})	$(364,56 \text{ N} + 74,4 \text{ N})/3 = 146,467 \text{ N}$	146,5 N

Tendo em conta que o sistema de movimentação linear está diretamente ligado ao slide, esta carga calculada será útil para o dimensionamento do mesmo. É então necessário selecionar um sistema de conversão angular em linear. Desta forma, será possível a seleção de um motor compatível com o binário calculado.

Considerou-se que para um movimento descendente de todo o componente móvel esta carga seria distribuída de igual forma pelos três slides. Assim, considerou-se que a força resultante usada pelo sistema de transmissão será um terço da força total calculada conforme a Tabela 10.

4. Sistema de transmissão

O sistema de transmissão escolhido terá de ser capaz de satisfazer três condições importantes das quais: oferecer curso suficiente para a movimentação vertical dos slides, ter um fator de redução adequado em função de precisão necessário e possuir um binário compatível com as cargas atuantes do sistema.

Desta forma, o sistema de transmissão escolhido para converter o movimento angular do motor em movimento linear dos slides foi um sistema de duas polias ligadas por uma correia – sistema acionado por motores de passo. O número de passos por volta determina a resolução do mesmo sendo que, os valores mais comuns são de 200 a 400 passos por volta, permitindo que estes rodem através de $1,8^\circ$ ou $0,9^\circ$, respetivamente.

Este sistema de transmissão permite uma transmissão de movimento com poucas folgas, folgas essas que podiam introduzir erros de posicionamento. Além disso, esta solução de transmissão também é a mais prática do ponto de vista de montagem, que também é o mais ágil. Tendo em conta o tamanho da máquina, um sistema de fusos não seria viável nesta, tanto pelo seu tamanho bem como a resposta desse tipo de transmissão, o sistema de correia é mais viável para as velocidades de operação características das impressoras 3D Delta.

Outro aspeto importante é o fato do sistema por correia não terem autobloqueio, característica dos sistemas de fuso, o bloqueio de posição é assegurado apenas pelo binário resistente a quando este se encontrar ligado. Este aspeto possibilita o posicionamento manual do elemento central quando a máquina não está ligada.

A polia que incorpora este sistema de transmissão é a *Timing Belt Pulley T90* da empresa *Minitec*, apresentando as características necessárias tendo em conta a máquina desenvolvida. Para a sua implementação é necessário o uso de uma correia do tipo 32AT10 também da *Minitec* em cada uma das torres. Esta correia terá um comprimento de 10 200 mm, este calculo foi baseado na indicação da *datasheet* da correia que se encontra no Anexo B – Figura 68.

4.1. Motores

Tendo em conta todas as características supra apresentadas foi necessário escolher o motor que melhor se adequasse ao projeto. Na Tabela 11 encontram-se as características gerais do sistema que permitiram determinar o binário do mesmo e com este selecionar o motor que melhor se adequada. Desta forma, selecionou-se um motor Nema 34HS31-55045 da *Minitec* – Figura 38.

Tabela 13. Características gerais do sistema para determinação do binário.

COMPONENTE DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO	VALOR
Força no slide	146,5 N
Diâmetro da polia	58,6 mm
Binário	4,25 N.m



Figura 38. Motor Nema 34HS31-55045.

5. Eletrónica

O conjunto eletrónico é um dos elementos mais importantes em impressoras 3D onde o componente mais relevante para efetuar todas as operações de controlo é o microcontrolador. Neste componente encontram-se todos os elementos eletrónicos interligados.

O *Arduino Mega* é um controlador de 8 bits que satisfaz as necessidades para um controlo básico de impressoras, tornando-se numa solução económica. Esta solução para impressoras do tipo 3D Delta fica aquém das necessidades para este tipo de impressora. O microcontrolador terá de fazer diversas conversões geométricas devido à cinemática da máquina antes da instrução de movimento dos motores. Esta solução pode apresentar várias limitações como, por exemplo, as velocidades máximas e aceleração que a máquina pode atingir podem ficar comprometidas pelo tempo que o microcontrolador demora a realizar as operações matemáticas.

A maioria das impressoras Delta presentes no mercado usam microcontroladores de 8 bits. No caso de máquinas consideradas topo de gama usam já sistemas de controlo de 32 bits onde é possível atingir velocidades bastante superiores devido ao seu elevado poder de cálculo. Posto isto, deverá ser usar mais potente como por exemplo o *Arduino Due*.

Um outro componente importante são os controladores dos motores, estes terão de ser adequados às características dos mesmos, nomeadamente, amperagem e voltagem que estes necessitam.

A fonte de alimentação tem de ser selecionada por forma a satisfazer as necessidades já impostas no projeto. Além disso, deverá ser capaz de dar resposta aos futuros acessórios a serem utilizados conforme as possibilidades do tipo de impressão.

6. Montagem

No Anexo B encontram-se as fichas técnicas de cada um dos componentes já existentes no mercado e que foram englobados na projeção da máquina.

Tendo em conta a geometria da máquina, a forma de montagem, a geometria dos diversos componentes e o seu movimento foi necessário atualizar o valor da altura de impressão anteriormente calculada. Além destes fatores e para que a máquina opere com uma margem de segurança o valor da altura de impressão é de 2 500 mm, obtendo-se um volume de impressão de, aproximadamente, 4 m³, cumprindo desta forma um dos objetivos previamente propostos.

Todos os componentes à exceção dos slides apresentam um sistema de fixação aparafusada utilizando acessórios disponibilizados pela empresa *Minitec* introduzidos nos rasgos do perfil nos diversos componentes – Figura 39.

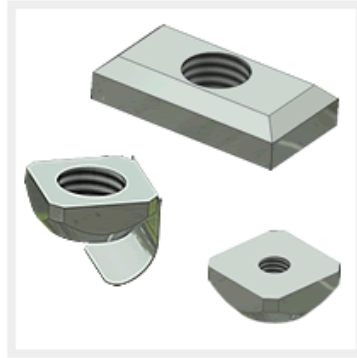


Figura 39. Sistema de fixação aparafusada.

Nas figuras 40 a 47 encontram-se o todo o sistema de montagem da impressora 3D construída bem como o todos os pormenores a ele associados, que culminam na Figura 48 com a vista geral da máquina.

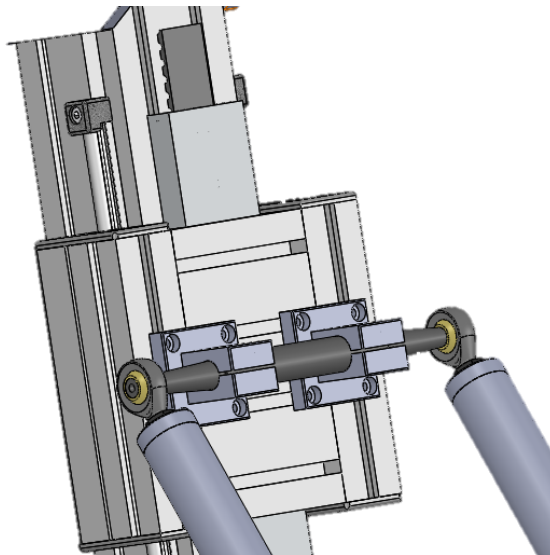


Figura 40. Acoplamento do slide aos braços e à torre.

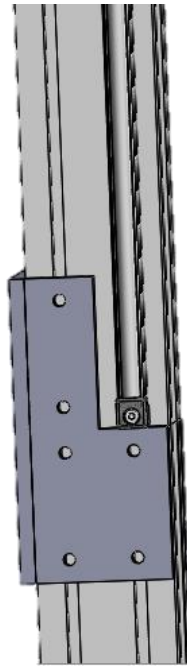


Figura 41. Pormenor da divisão das torres para ajuda à movimentação da máquina.

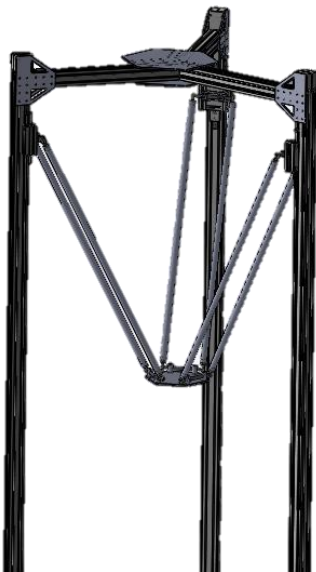


Figura 42. Vista geral da zona superior da máquina.

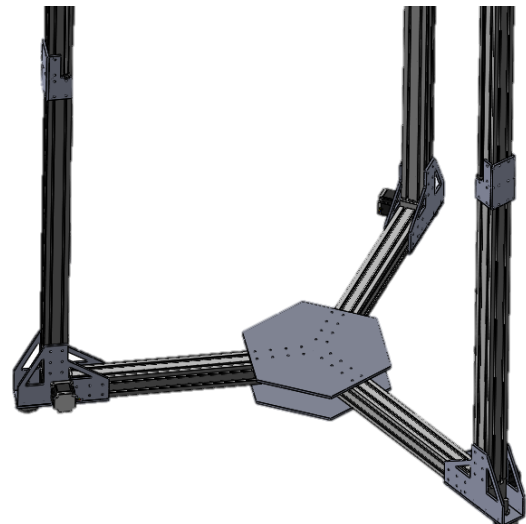


Figura 43. Zona inferior da máquina com a acoplação dos motores.

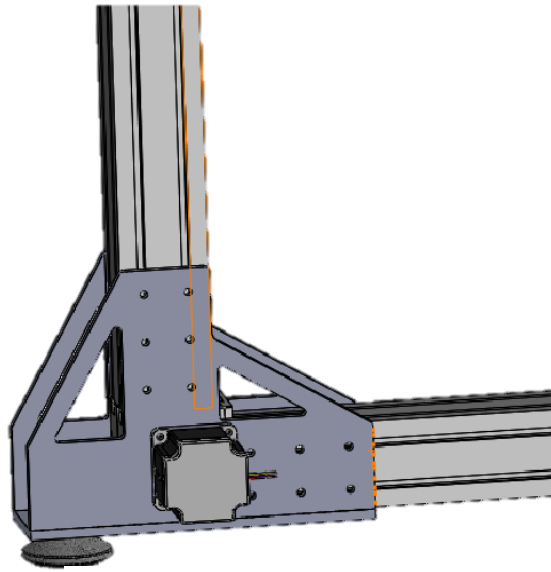


Figura 44. Pormenor do canto inferior.

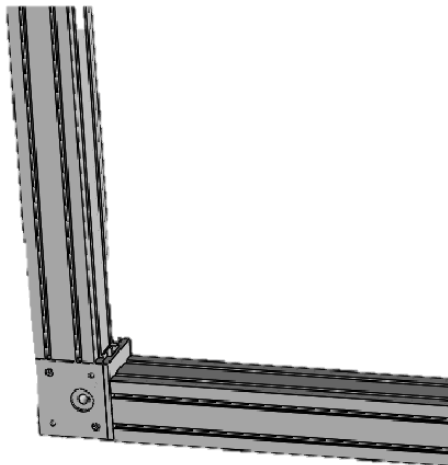


Figura 45. Localização das polias.

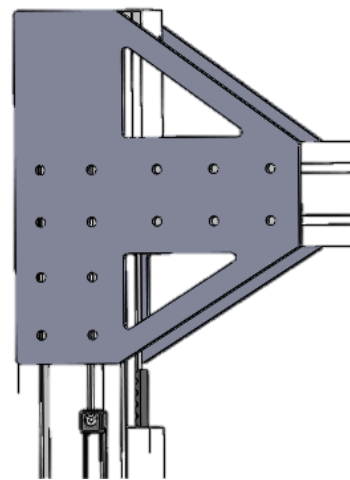


Figura 46. Pormenor do canto superior.

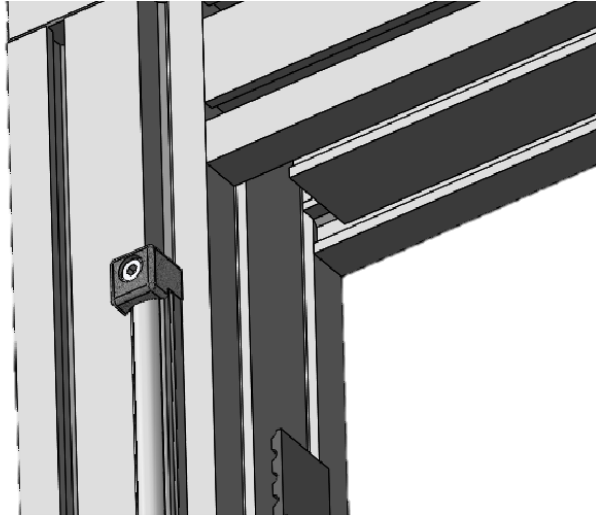


Figura 47. Pormenor do entalhe nas vigas transversais.



Figura 48. Vista geral da máquina – impressora 3D.

Na Tabela 12 é possível encontrar a síntese dos componentes que englobam a construção da máquina e as suas quantidades.

Tabela 14. Síntese dos componentes da máquina – impressora 3D.

ELEMENTO	COMPONENTES	QUANTIDADE
Slide	Componente deslizante	Três
	Tensor da correia	Seis
	Pilar	Seis
	Veio	Três
	Correia	Três
Torres	Perfil (3 500 mm)	Três
	Perfil (1 385 mm)	Três
	Guia (3 240 mm)	Seis
	Suporte da guia (3 240 mm)	Seis
	Terminal da guia	Doze
Vigas transversais	Perfil (954 mm)	Três
	Perfil (934 mm)	Três
Elemento central	Placa base	Um
	Pilar	Seis
	Veio	Três
Braços	Tubo (1 620 mm)	Seis
	Casquilho	Doze
	Porcas	Doze
	Rotula	Doze
	Polia	Seis
	Motor	Três
Canto superior	Conjunto	Três
Canto inferior	Conjunto	Três
	Painel de união das vigas	Quatro
	Painel de união de torres	Três
	Acessórios de aperto	A analisar quantidade

7. Simulação

Após o término da montagem da máquina – impressora 3D – no *software CAD* realizou-se a simulação da análise estática da estrutura. De modo a facilitar a análise tendo em vista que os perfis utilizados possuem uma estrutura complexa calculou-se um perfil equivalente através das especificações publicadas pela empresa detentora dos mesmos (*Minitec*). Obteve-se um perfil quadrado de secção oca de medidas 90x90 mm e uma espessura de 8,5 mm. De uma forma geral, simplificou-se toda a configuração da máquina para componentes equivalentes permitindo um cálculo simplificado.

As figuras 49, 50, 51 e 52 mostram os resultados obtidos após a simulação efetuada, esta foi realizada tendo em conta os seguintes aspetos:

- Cargas aplicadas nos pontos críticos das torres, i.e. no meio das torres e próximo da zona de divisão das mesmas;

- Cargas aplicadas similares à força resultante aplicada nos slides;
- Na simulação da estrutura simplificada “fixou-se” – *Fixed Geometry* – toda a base da máquina tendo em conta que esta zona é a única que representa o contacto com a superfície/piso;
- Na simulação da estrutura completa “fixaram-se” – *Fixed Geometry* – toda a base da máquina e as torres de modo a testar o comportamento dos braços aplicando a carga no elemento central simplificado. Nesta simulação aplicou-se uma carga de 10 Kg no elemento central simplificado, indo ao encontro dos cálculos anteriormente realizados expectando a utilização de um acessório/ferramenta até este peso.

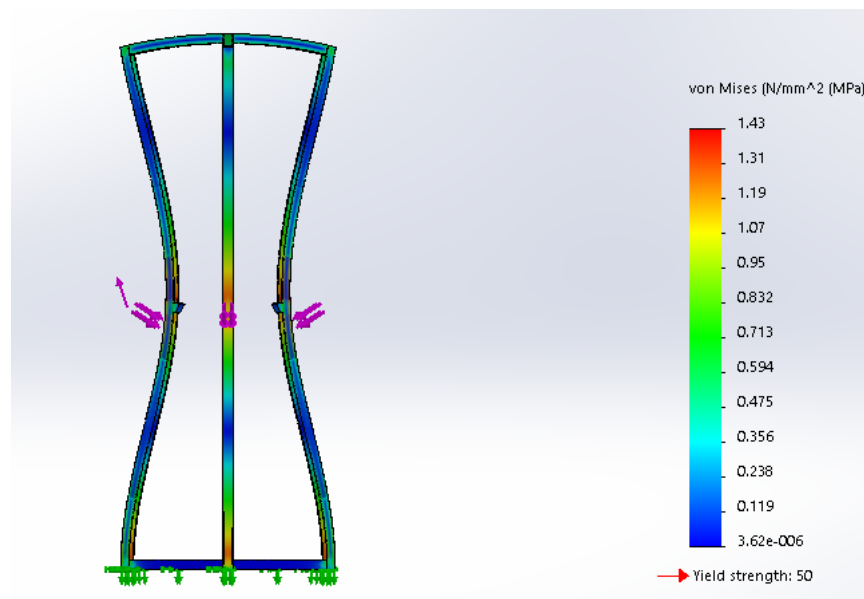


Figura 49. Simulação da estrutura simplificada (tensões).

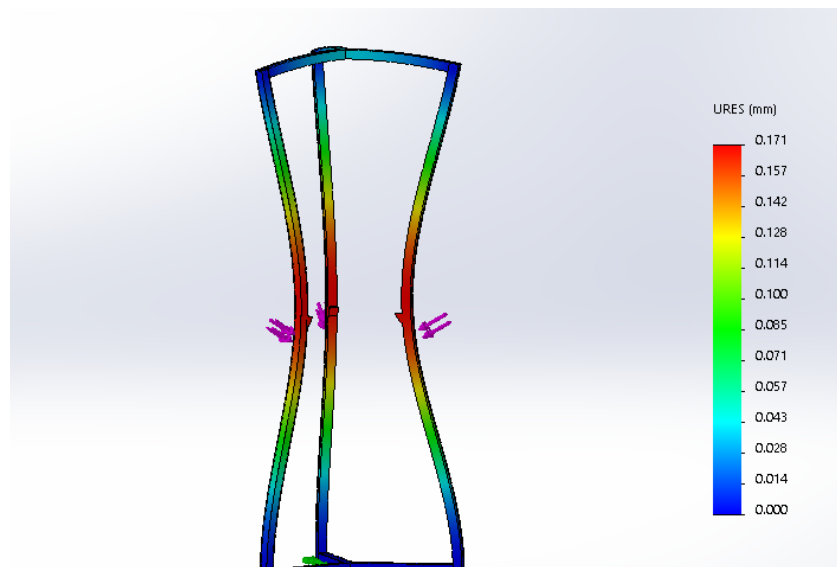


Figura 50. Simulação da estrutura simplificada (deslocamento).

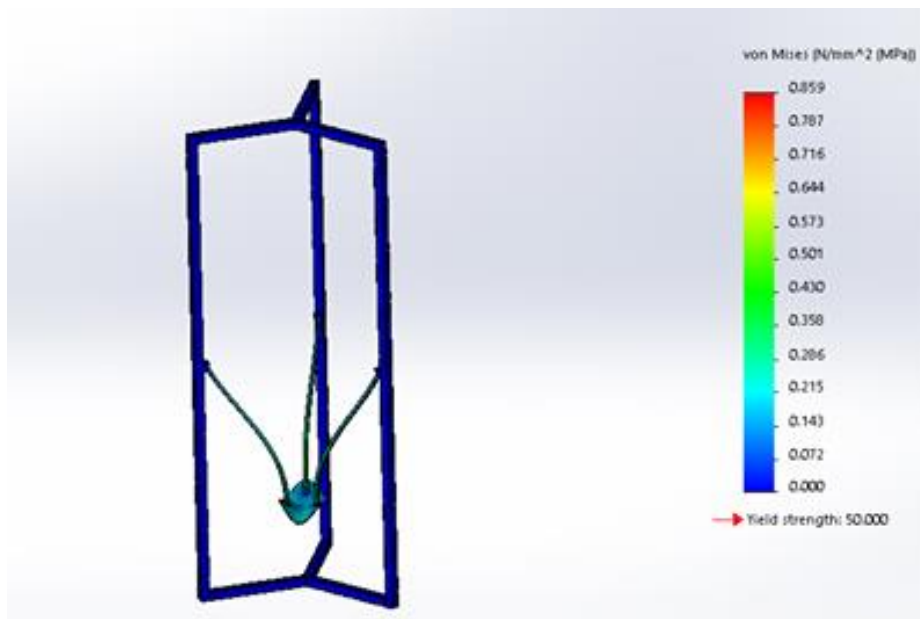


Figura 51. Simulação da estrutura completa – análise de braços (tensões).

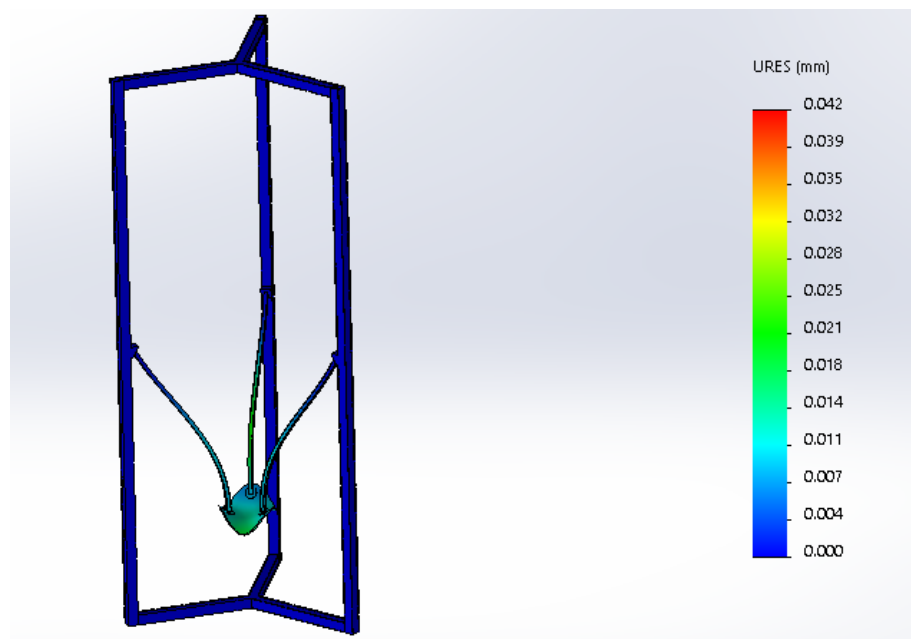


Figura 52. Simulação da estrutura completa – análise de braços (deslocamento).

Verificou-se, através da simulação, que a estrutura suporta as cargas e o deslocamento/encurvatura das torres não é significativo. O mesmo é possível concluir relativamente aos braços. Estas conclusões permitem corroborar a cargas inicialmente expectadas.

Capítulo 4 | Conclusão

Para que fosse possível responder quer aos requisitos da construção da máquina quer aos requisitos colocados pelos supervisores do presente trabalho de projeto foi necessário o desenho preliminar e o estudo de todos os componentes que a constituem.

Tendo por base o processo de manufatura aditiva do tipo FDM foi possível a construção de uma impressora 3D do tipo Delta com os seguintes componentes: elemento central, slide, torres, braços, vigas transversais, motor, polia, corrente, cantos superiores e inferiores, bem como todos os acessórios de união e fixação, tornando a opção A viável.

Desta forma, foi possível a obtenção de todas as características físicas e referências de materiais presentes no mercado para posterior aquisição dos mesmos para a construção da máquina assim como os desenhos e ficheiros que possibilitam o fabrico dos elementos que foram desenvolvidos neste projeto.

Na Tabela 13 encontram-se sumariadas as principais características da máquina bem como os valores que as caracterizam. Através destes dados é possível verificar que o requisito de obter pelo menos 1 m³ de volume útil de impressão foi cumprido, uma vez que, o volume útil de impressão desta máquina é cerca de 4 m³.

Uma das características a ter em conta no dimensionamento desta máquina era o facto desta poder ser transportada num veículo ligeiro de mercadorias do tipo furgão, para tal e tendo em conta a estrutura da máquina e o seu funcionamento conseguiu-se dividir as torres a 1 500 mm a contar da sua base, o que permite a sua divisão sem afetar os guias do slide, estando estas sempre fixas à restante seção das torres.

Tabela 15. Principais características da máquina.

CARATERÍSTICAS	VALOR (MM)
Diâmetro de impressão	1500
Diâmetro da máquina	2000
Comprimento dos braços	1700
<i>Offset</i> do elemento central	150
<i>Offset</i> do slide	70
Afastamento dos braços	250
Atura de impressão	2 500

4.1. Trabalhos futuros

Após a realização deste trabalho de projeto, seguem-se algumas sugestões de trabalhos futuros:

- Construção da impressora 3D;
- Executar e implementar a componente eletrónica da impressora 3D;
- Executar a calibração da impressora 3D.

Bibliografia

3Dhubs (2018). [3https://www.3dhubs.com/3d-printers/deltawasp-20-40](https://www.3dhubs.com/3d-printers/deltawasp-20-40) (Acedido a 07 Janeiro 2018)

3Ders (2014). https://www.3ders.org/articles/20140729-5-meter-tall-giant-magna-delta-3d-printer-unveiled-by-japanese-creators.html?fbclid=IwAR1g6p2U9pMwnfXbtXGy1AL3sQXYRFvF9P4CluYy87IhH_amv_o1sPLlyhc (Acedido a 02 Março 2018)

3Dprinting (2018). <https://3dprinting.com/3dprinters/best-large-scale-fdm-fff-3d-printers-big-enough-to-3d-print-furniture/?fbclid=IwAR0Q7MKtmaR4JLWtlrEOvJCZ6hkjYS5teHHxg7UEPcEaheaEHuCLL6PGp44>

Abreu, J. (2017), *Análise de cinemática – Impresora 3D Delta*. Porto.

All3DP.STL file format for 3D printing. 2016

Ambrosi, A. and Pumera, M., *3D printing technologies for electrochemical applications. Chemical Society Reviews*, 2016 . 45(10): pp. 2740-2755

Alves, D. (2014) https://projectrostockdelta.blogspot.com/2014/03/impresora-3d-rostock-delta.html?fbclid=IwAR3J_uGl9kvIhr5DiRvcJDPwLgbu-PrCXOrJqC93yWZu_ylpOKy0xt2J1Xk (Acedido a 02 Março 2018)

ASTM F2792 *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, International, *Standard terminology for additive manufacturing techonologies*.

Bell, C., *3D Printing with delta printers*. 2015: Apress. 368.

Carrara, V., *Apostila de Robótica*. 2009: Universidade Braz Cubas.

Choudhari, C.M. and V.D. Patil. *Product development and its comparative analysis by SLA, SLS and FDM rapid prototyping processes*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016.

Designoteca (2012). http://site.designoteca.com/2012/01/20/fabricacao-digital/?fbclid=IwAR1HNmOya_WIOrqZOz2bomRM8Hw1UdM0f7cY85hq1OKF7WMAuxrb7VmqFts (Acedido a 8 Janeiro 2018).

González, S. G., *Impresión 3D*. 1ª Ed: MARCOMBO. 2016

Groover, M.P., *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. 2002: Wiley.

Horvath, J., *Mastering 3D printing*. 2014: Apress. 224.

Lipson, H. e Kurman, M, *Fabricated: The New World of 3D Printing*. 2013: Wiley Publishing. 280.
[SpiderBot \(2018http://www.spiderbot.eu/en/](http://www.spiderbot.eu/en/) (Acedido a 07 Janeiro 2018)

Koren, Y., *Robotics for engineers*. 1985: McGraw-Hill.

Machinist (2015) <http://machinist.org/uncategorized/the-invention-of-cnc-machining/> (Acedido a 8 Janeiro 2018).

ManufacturingGuide. *Fused Deposition Modeling, FDM*. 2016
(<https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>, Acedido a 10 Janeiro 2018)

Medium (2016) https://medium.com/@lusadesouzadieter/por-que-a-impress%C3%A3o-3d-precisa-chegar-%C3%A0s-nossas-vidas-6c1d26f19cc4?fbclid=IwAR1VTGr2J8jEMyUC9FsbF5JuiJYWkapvvJ4nPDXLIVYvu_IlurwIyIgP7E
(Acedido a 8 Janeiro 2018)

Pandilov, Z e Dukovsky, V., *Comparison of the characteristics between serial and parallel robots*, Acta Technica Corviniensis, 2014. Bulletin of Engineering (Fascículo 1).

PollenPAM, 2018 <https://www.pollen.am/pam-series-p>(Acedido a 07 Janeiro 2018)

Relvas, C. *O mundo da impressão 3D e do fabrico digital*, Publindústria, Edições Técnicas, 2017

RepRap (2017) http://reprap.org/wiki/Diamond_Hotend(Acedido a 9 Janeiro 2018)

Sánchez, A. (2015) http://diwo.bq.com/impresoras-3d-cartesianas-vs-delta/?fbclid=IwAR0EmDNz027HY83f9MpCup7yVtTZVb1ayiFi4Cd9_cbfNWliAcTtN5VGpE4

Schmitt, B; Zirbes, C; Bonin, C; Lojmann, D; Lencina, D e Netto, A (2008). *A comparative study of cartesian and delta 3D printers on producton PLA parts*. ISSN 1516-1439

SD3D (2013) https://www.sd3d.com/fff-vs-sla-vs-sls/?fbclid=IwAR3HnLt8SlrYOxDkD3rxG8KUq1zLMwYNcl_Za6J9t4oau3UWFtj2NSbMZTE,
Acedido a 9 Janeiro 2018)

SpiderBot ([2018http://www.spiderbot.eu/en/](http://www.spiderbot.eu/en/) (Acedido a 07 Janeiro 2018)

Thingiverse. *Digital designs for physical objects*. 2016; Disponível em: <https://www.thingiverse.com/> (Acedido a 12 Fevereiro 2018)

WASP, *WASP's Big Delta 3D printer has potential to build insect-repelling houses*. Disponível em: <http://www.3ders.org/articles/20150914-wasp-big-delta-3d-printer-has-potential-to-build-insect-repelling-houses.html>. (Acedido a 12 Fevereiro 2018)

Wohlers, T. T., et al., *Wholers Report 2016: 3D printing and additive manufacturing state of industry: Annual Worldwide Progress Report*. 2016: Wohlers Associates.

| ANEXOS

Anexo A – Softwares e Robôs

Tabela 16. Comparação entre os diferentes softwares.

<i>SOFTWARE</i>	CAM	CONTROLO	TIPO	NÍVEL
<i>Repetier-Host</i>	Sim	Sim	Livre ou Pago	Médio
<i>Cura</i>	Sim	Não	Livre	Básico
<i>Pronterface</i>	Não	Sim	Livre	Básico
<i>Slic3r</i>	Sim	Não	Livre	Médio
<i>Simplify3D</i>	Sim	Sim	Pago	Profissional

Tabela 17. Comparação entre os robôs em serie e em paralelo, adapto de ((Pandilov , Z. e Dukovsky, V., 2014).

	CARATERÍSTICA	SÉRIE	PARALELO
VOLUME DE TRABALHO	Volume de trabalho	Grande	Pequeno e complexo
	Rácio entre o volume de trabalho e tamanho do robô	Elevado	Baixo
CAPACIDADE DE CARGA	Carga máxima	Baixa	Elevada
	Rigidez	Baixa	Elevada
DINÂMICA	Modelação dinâmica	Simples	Complexa
	Inércia	Elevada	Baixa
	Velocidade e aceleração	Baixa	Elevada
POSICIONAMENTO	Erro de posição	Acumulativo	Médio
	Precisão	Baixa	Elevada
	Calibração	Fácil	Difícil
CONSTRUÇÃO	Uniformidade de componentes	Baixa	Elevada

Anexo B – Componentes do desenho

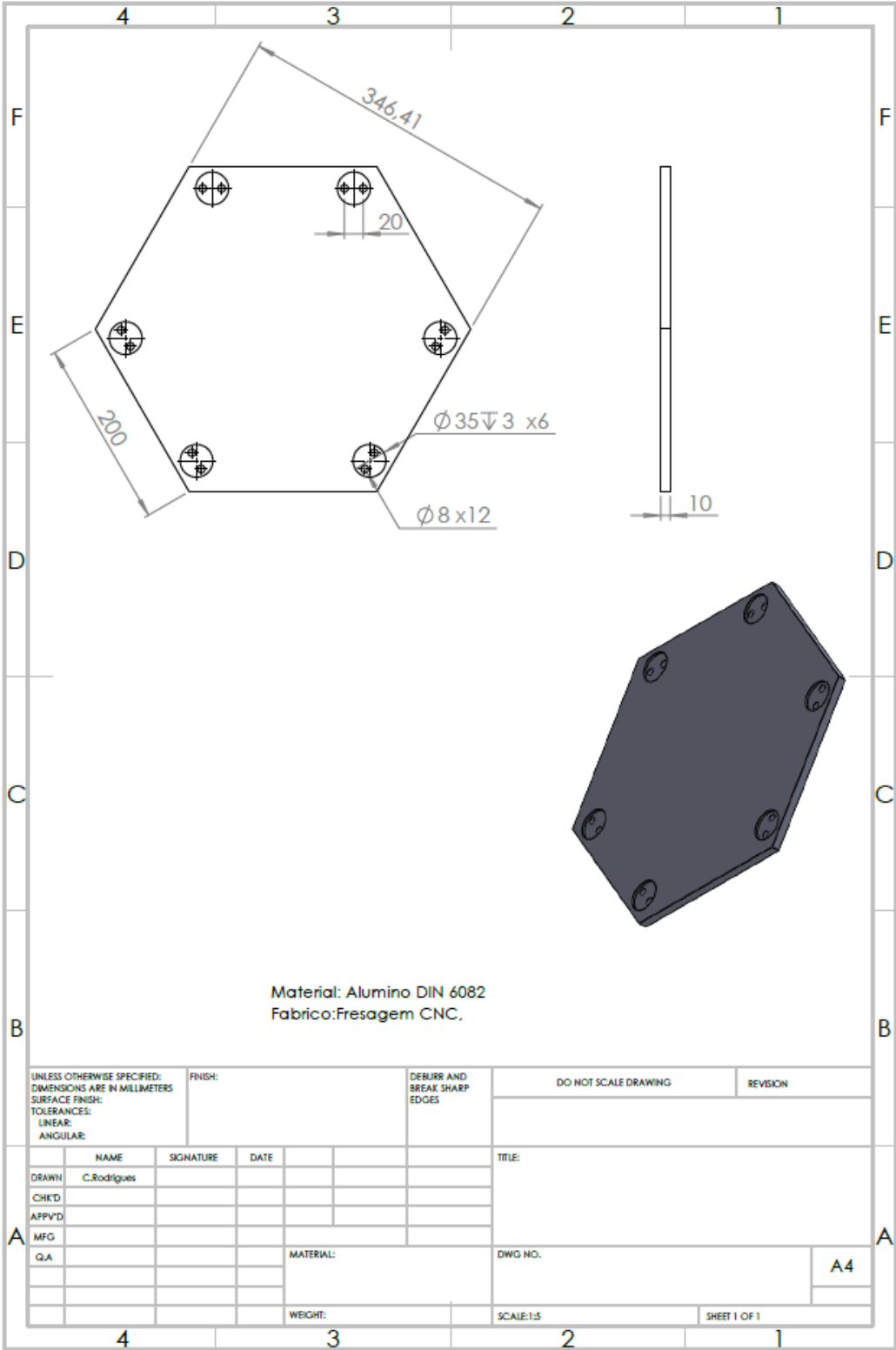


Figura 53. Desenho da placa base do elemento central.

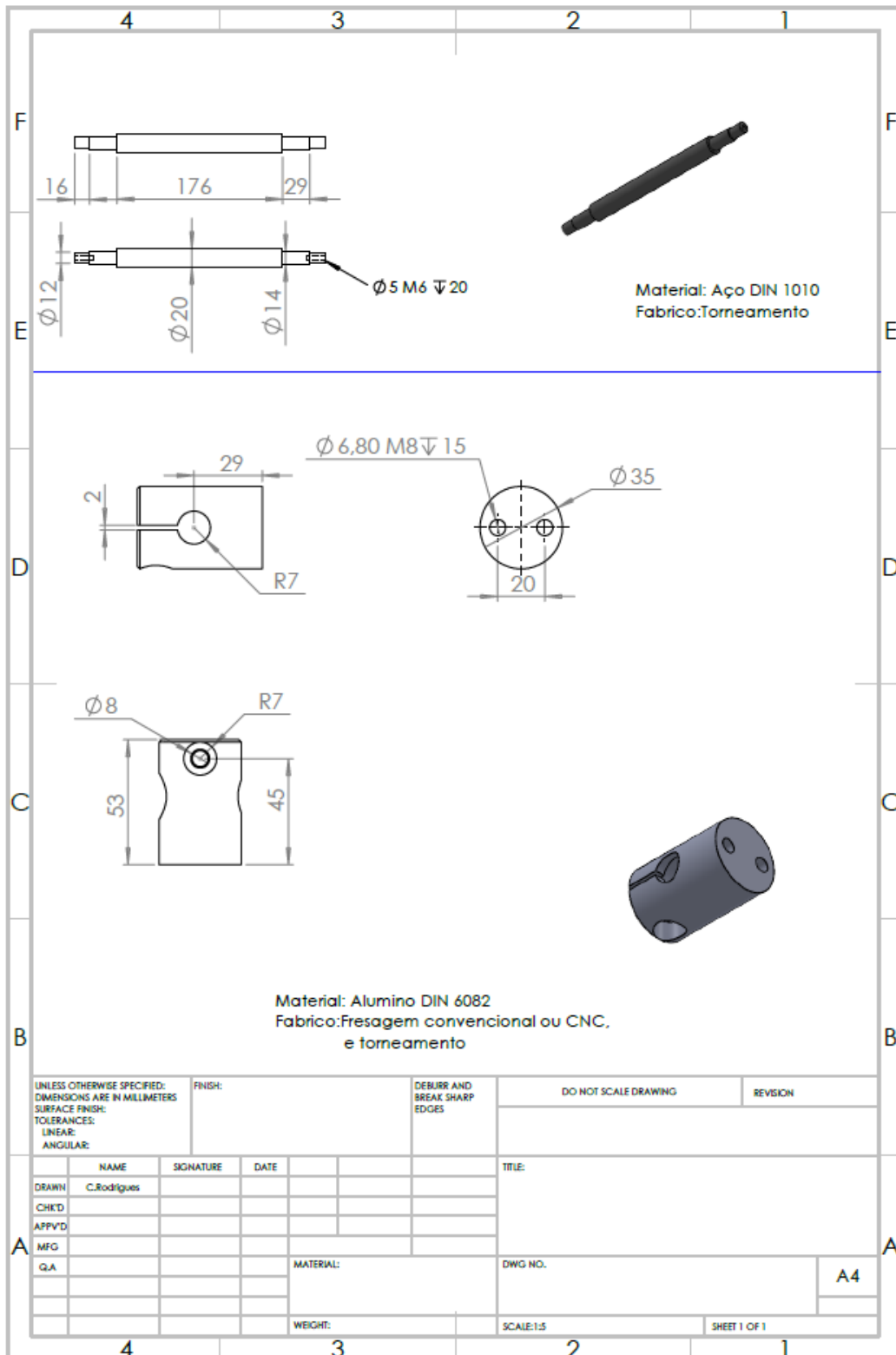
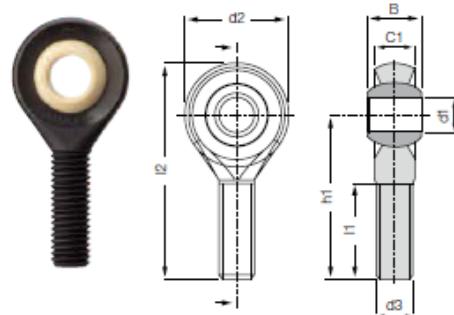


Figura 54. Desenho dos componentes do elemento central.

Rod ends, male thread; 2nd generation:
KARM CL



- Smooth design has no dirt traps
- Compensation of misalignment
- Light weight
- Excellent corrosion resistance
- Design with metal sleeve for higher torque strength available
- Left-hand thread version KALM in preparation
- Dimensional series K according to standard DIN ISO 12240

Order key

Type Size Version

K A R M - 06 CL

Dimensional series K

Housing (male thread)

Right-hand thread

Metric

Inner-Ø [mm]

2nd generation

Material:

- Housing: igumid G ▶ Page 1235
- Spherical ball: iglidur® W300 ▶ Page 121
- More spherical ball materials on request ▶ Page 693

Technical data

Part No.	Max. static tensile strength		Max. radial load		Min. thread depth	Max. torque strength	Max. torque through ball		Weight [g]
	Short term [N]	Long term [N]	Short term [N]	Long term [N]	Thread [mm]	Outer threading [Nm]	without MH [Nm]	with MH [Nm]	
KARM-06 CL	1,000	500	100	50	15	0.5	10	15	3.5
KARM-08 CL	1,700	850	200	100	18	2.0	12	40	6.2
KARM-10 CL	2,500	1,250	300	150	20	5.0	20	50	11.2
KARM-12 CL	2,700	1,350	400	200	22	6.0	30	70	15.6

Dimensions [mm]

Part No.	d1	d2	d3	C1	B		h1	l1	l2	Max. pivot angle
	E10				without MH	with MH +0.2				
KARM-06 CL	06	20	M06	7.0	9.0	9.2	36	21	46	40°
KARM-08 CL	08	24	M08	9.0	12.0	12.2	42	25	55	35°
KARM-10 CL	10	30	M10	10.5	14.0	14.2	48	28	63	35°
KARM-12 CL	12	34	M12	12.0	16.0	16.2	54	32	71	35°

Rod ends can be ordered in metric dimensions **with metal insert** with the addition of **MH** after the part numbers listed here. Example: KARM-10 MH (Inner-Ø: 10 mm).
For another spherical bearing material please add **J** or **R** to the part number. Example: KARM-10 CL J.

614 Lifetime calculation, configuration and more ▶ www.igus.eu/rod-end

Figura 55. Datasheet da rótula.

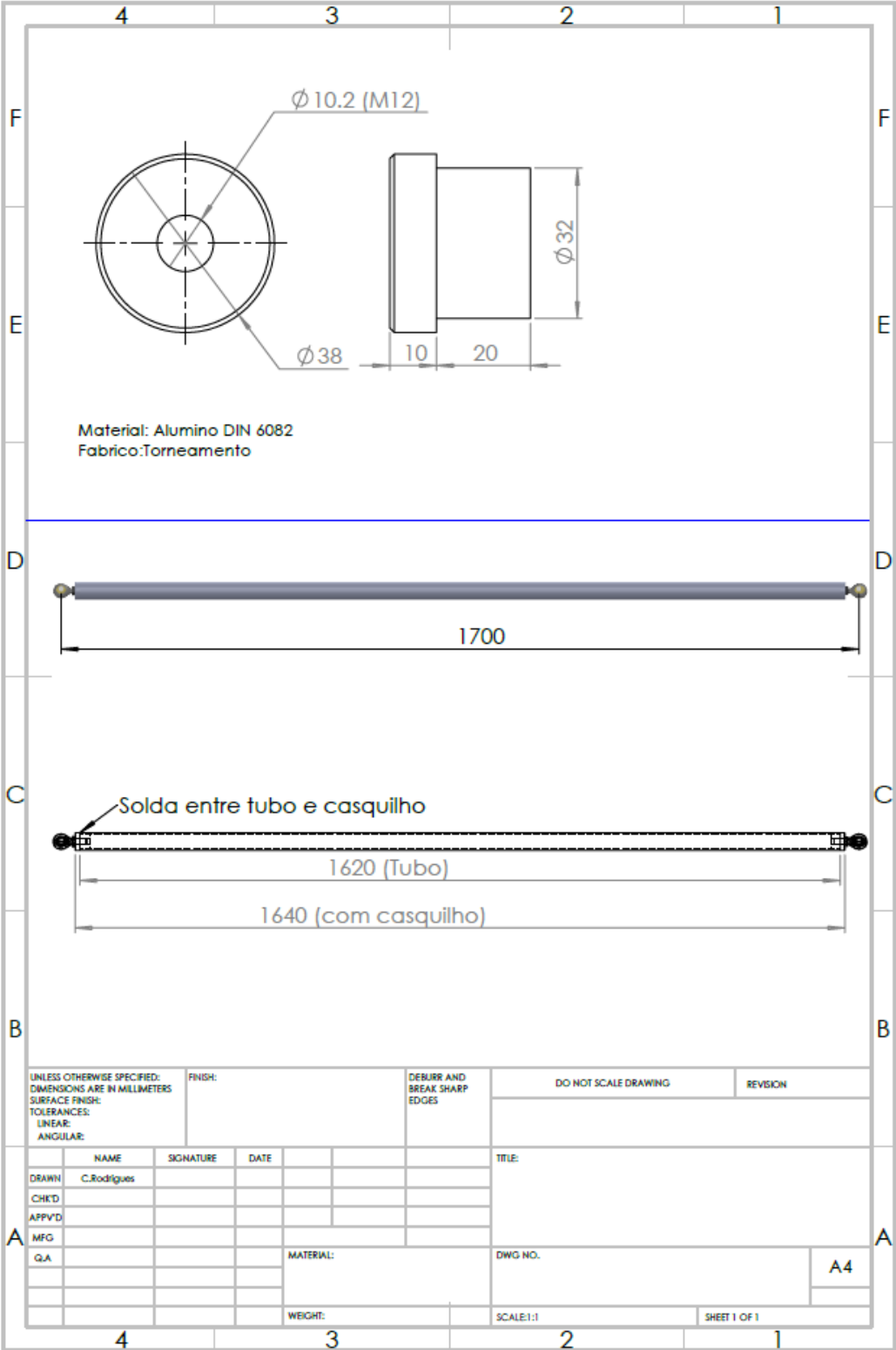


Figura 56. Desenho dos elementos que constituem o braço.

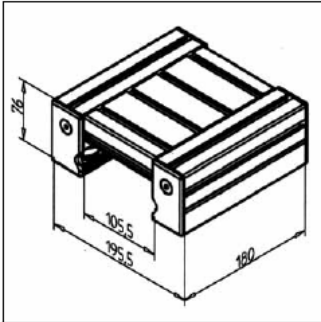


TIMING BELT TENSIONER		Part. N° 28.0090/0
SLIDE LW 90		Part. N° 28.0092/0
		
TECHN. DATA / ITEMS SUPPLIED	APPLICATIONS	ASSEMBLY
- Slide completely assembled	- 1- or multi-axis guides	- Assemble slide on rail 45 x 90 F, rail 90 or rail 90 x 180 H; adjust clearance with eccentric bush
- 2 concentric and 2 eccentric bearing units	- Linear robots	- Assemble cover and greasing system
- End caps LR and Cover profiles LR	- Handling systems	- OPTIONS:
- Load capacity: see page 260	- Measuring devices	- Slide clamping Part N° 28.0270/0
- Weight 2.700 kg	- For rails 45 x 90 F, 90 x 90, 90 x 180 H	
- Stainless version Part N° 28.0092/2		

Figura 57. Datasheet do slide.

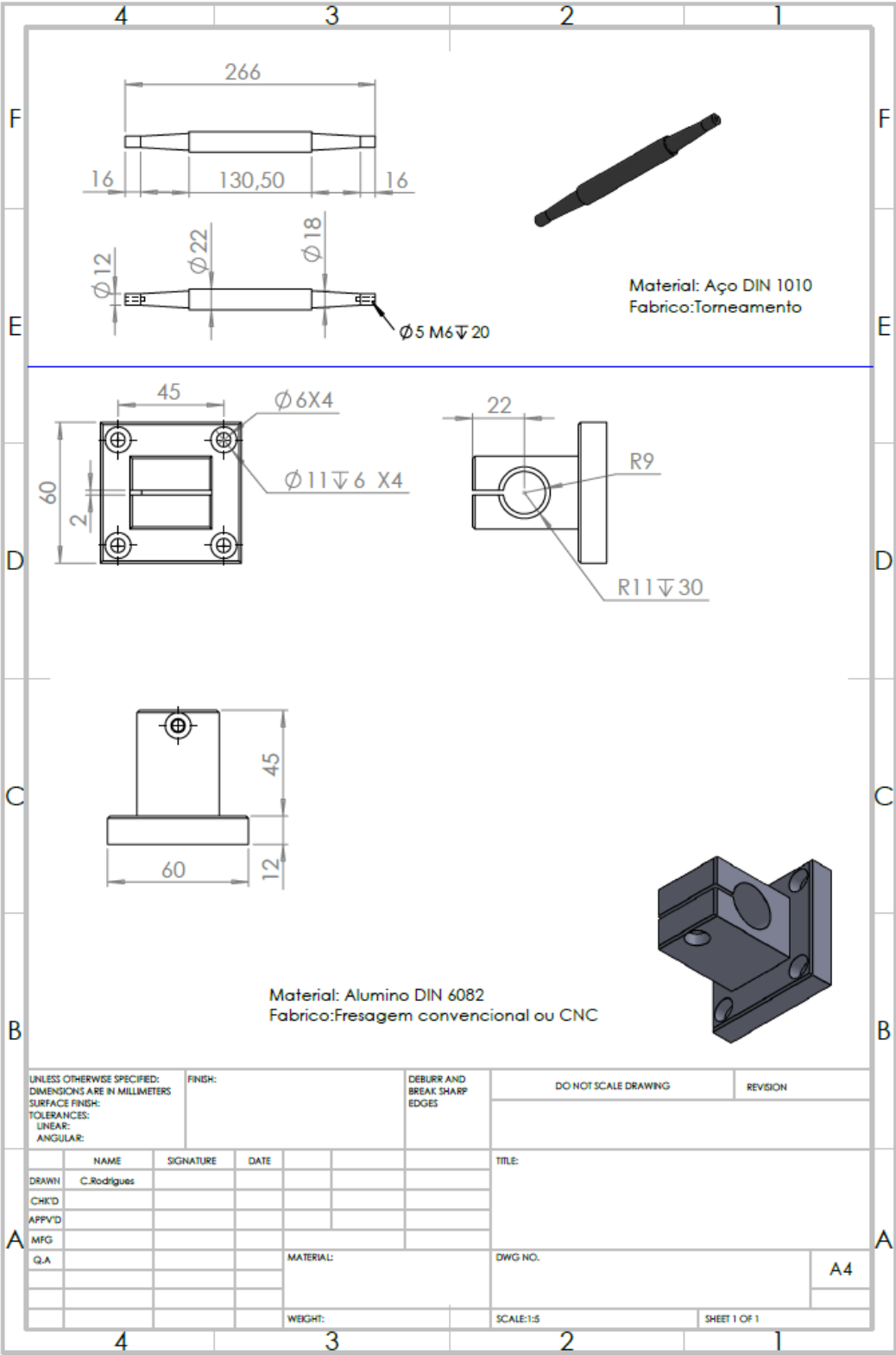


Figura 58. Desenho dos elementos que constituem o slide.

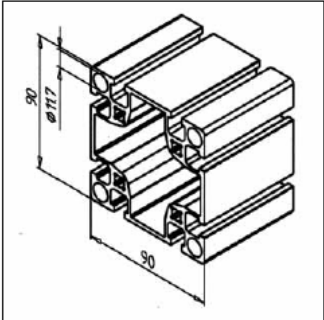
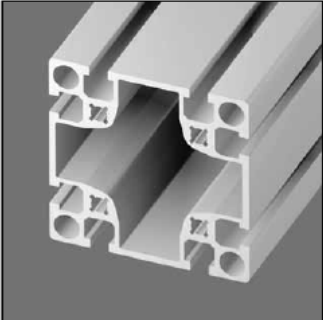
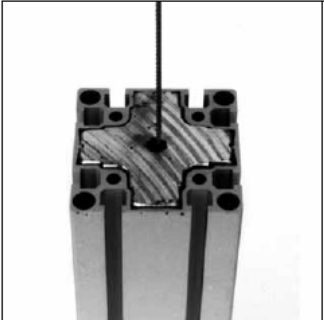
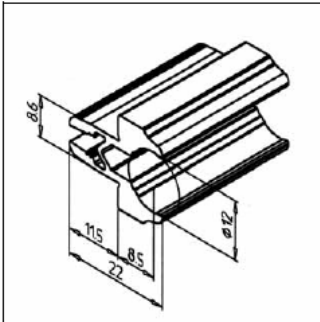
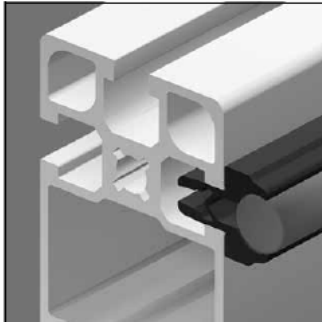
TIMING BELT TENSIONER		Part. N° 28.0090/0
PROFILE 90 X 90 L		Part. N° 20.1010/0
		
TECHN. DATA / ITEMS SUPPLIED	APPLICATIONS	ASSEMBLY
- Ix = 186,260 cm ⁴	- General heavy duty applications	- MiniTec power-lock fastener
- Iy = 186,260 cm ⁴	- The central cavity is constructed for guiding counterweights	- Angel 45 or 90
- wx = 41,391 cm ³		- Screw connection
- wy = 41,391 cm ³		- Bolt-fastener
- Weight 5,222 kg/m		
- Length 6 m		
- Packing unit 12 m		

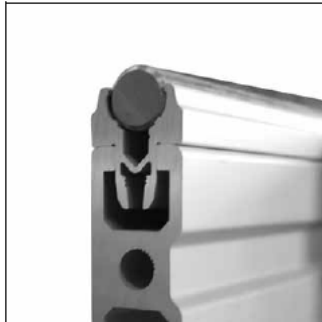
Figura 59. Datasheet do perfil utilizados nas torres e nas vigas transversais.

SHAFT SUPPORTING PROFILE

Part. N° 28.0002/0





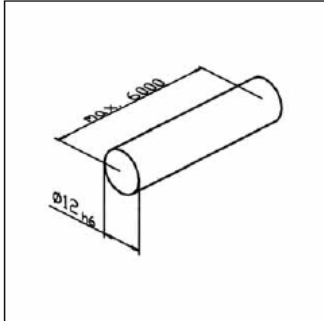



TECHN. DATA / ITEMS SUPPLIED	APPLICATIONS	ASSEMBLY
- Aluminium, natural anodized E6/EV1	- MiniTec linear guides LR/LG	- Press into the groove of rail profile
- Weight 0,365 kg/m		- If necessary clamp with set screw M5 x 10 in position
- Length 6 m		- Press shaft into supporting profile with appropriate tool (plastic mallet)

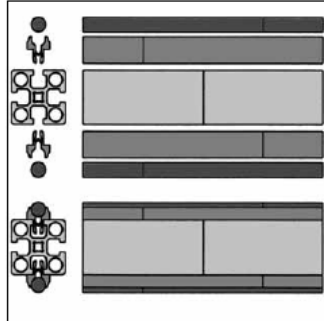
Figura 60. Datasheet do suporte do guia.

SHAFT 12

Part. N° 17.1741/0







TECHN. DATA / ITEMS SUPPLIED	APPLICATIONS	ASSEMBLY
- Cf 53, hardened 60 + 5 HRC, precision ground h6	- All MiniTec linear guides LR	- Press shaft into supporting profile with appropriate tool (plastic mallet)
- Weight 0,888 kg/m		- For rails L > 6000 mm assemble profile, shaft supporting profile and shaft with offset joints
- max. Length 6 m		
- Stainless version Part N° 17.1760/0		

Figura 61. Datasheet do guia.

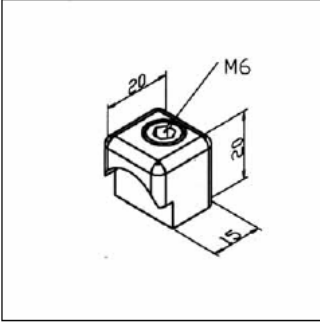
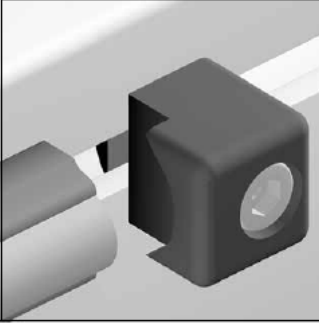
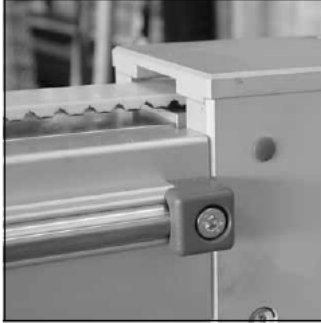
SHAFT RETENTION DEVICE		Part. N° 28.0052/0
		
TECHN. DATA / ITEMS SUPPLIED	APPLICATIONS	ASSEMBLY
<ul style="list-style-type: none"> - Aluminium , powder coated, grey - Fastening kit - Weight 0,03 kg - Stainless version Part N° 28.0053/0 	<ul style="list-style-type: none"> - Axial retention of shafts in dynamically stressed linear guides 	<ul style="list-style-type: none"> - Fasten the retention device at both shaft ends with fastening kit - No processing required

Figura 62. Datasheet do terminal da guia.

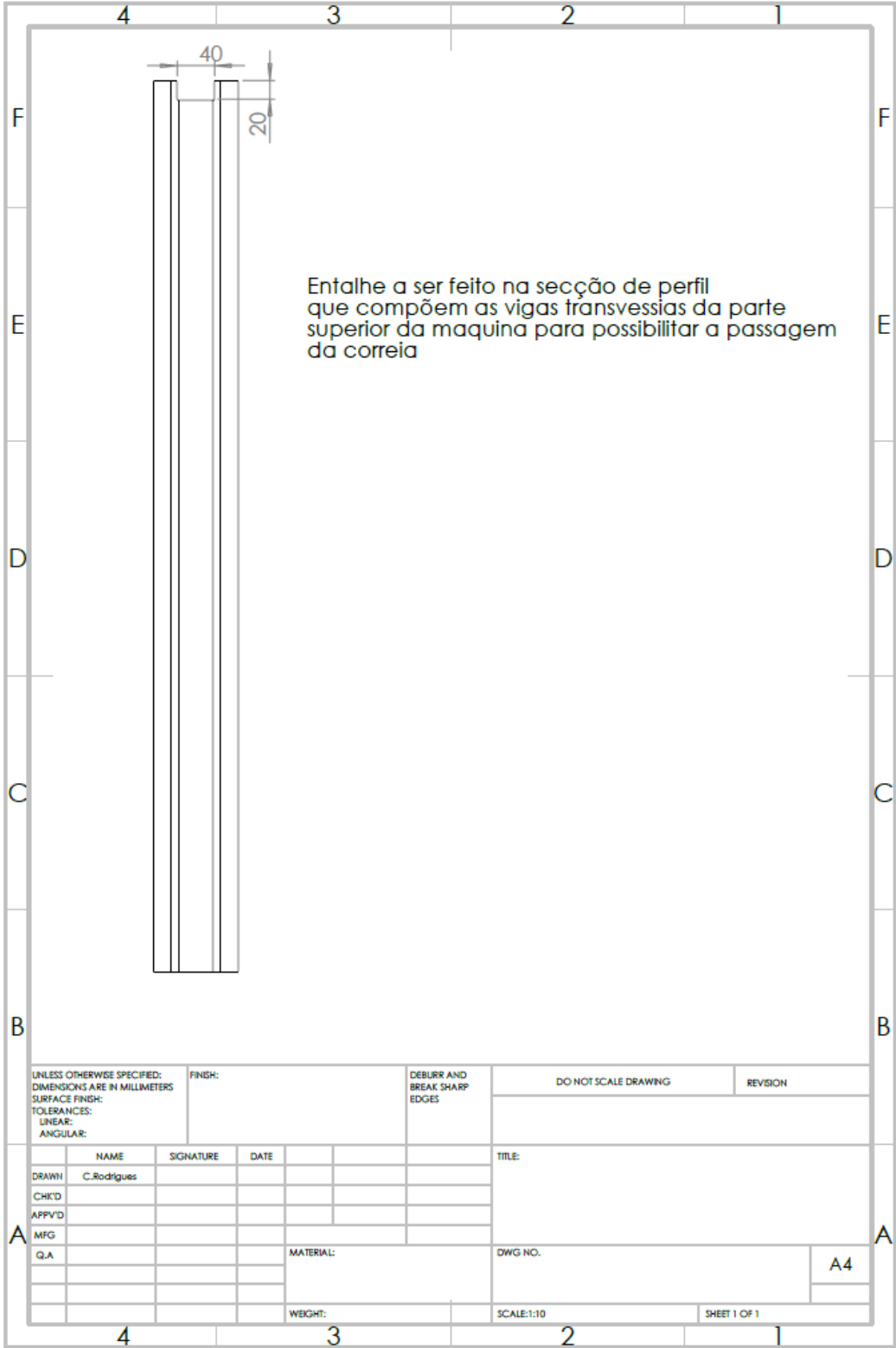


Figura 63. Desenho do entalhe a ser feito nas vigas transversais superiores.

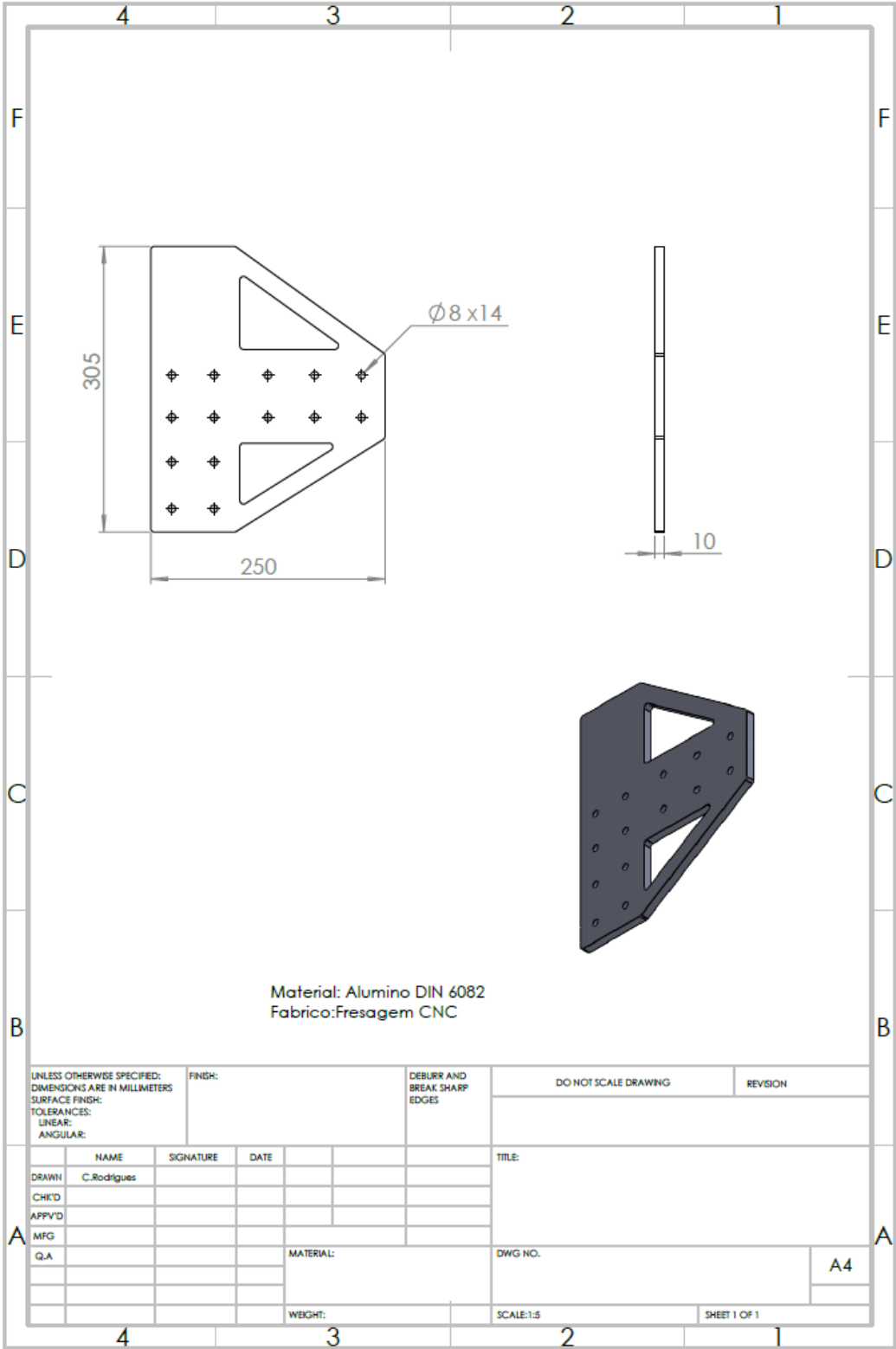


Figura 64. Desenho dos cantos superiores.

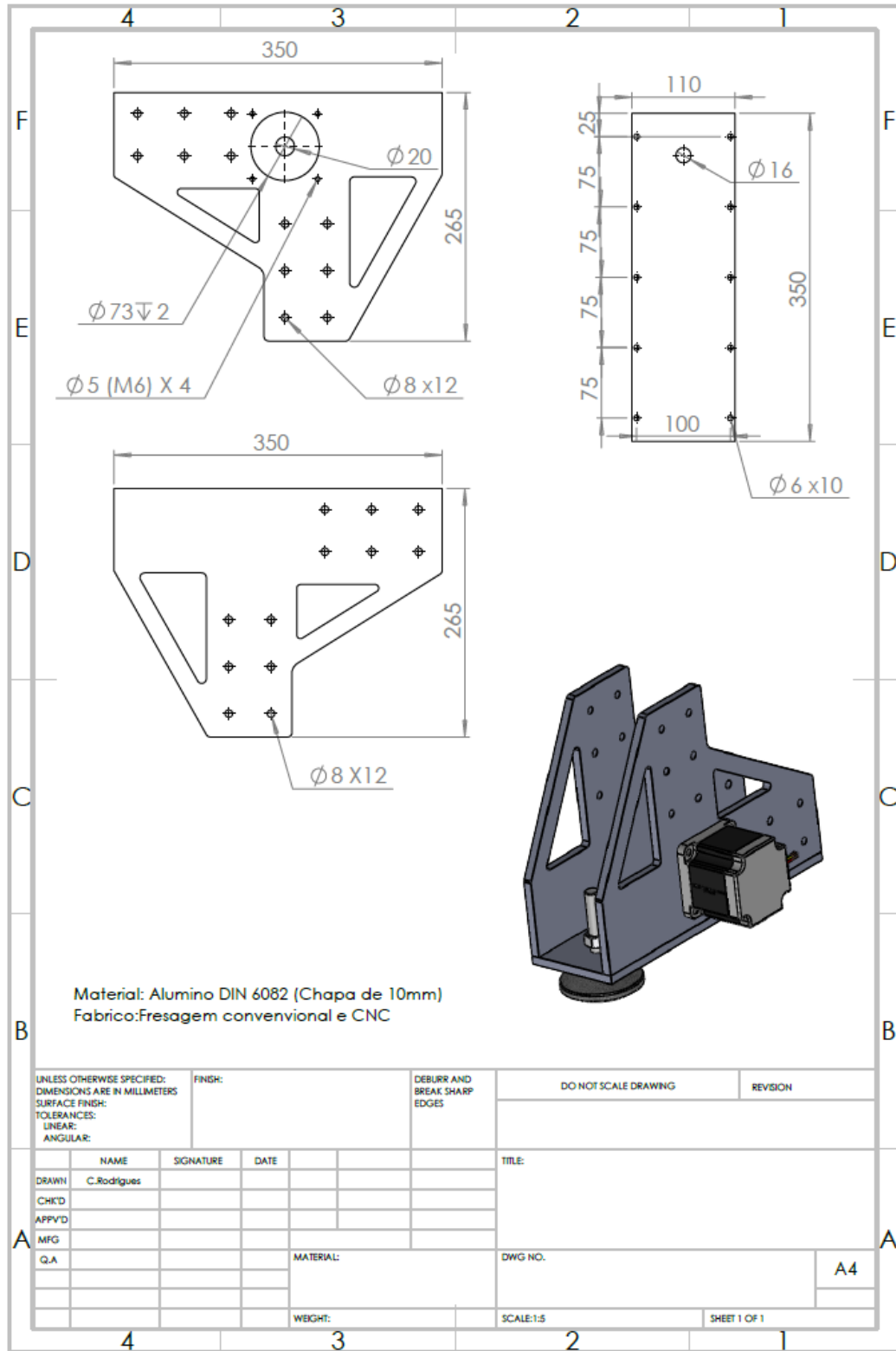


Figura 65. Desenho dos elementos que constituem o canto inferior.

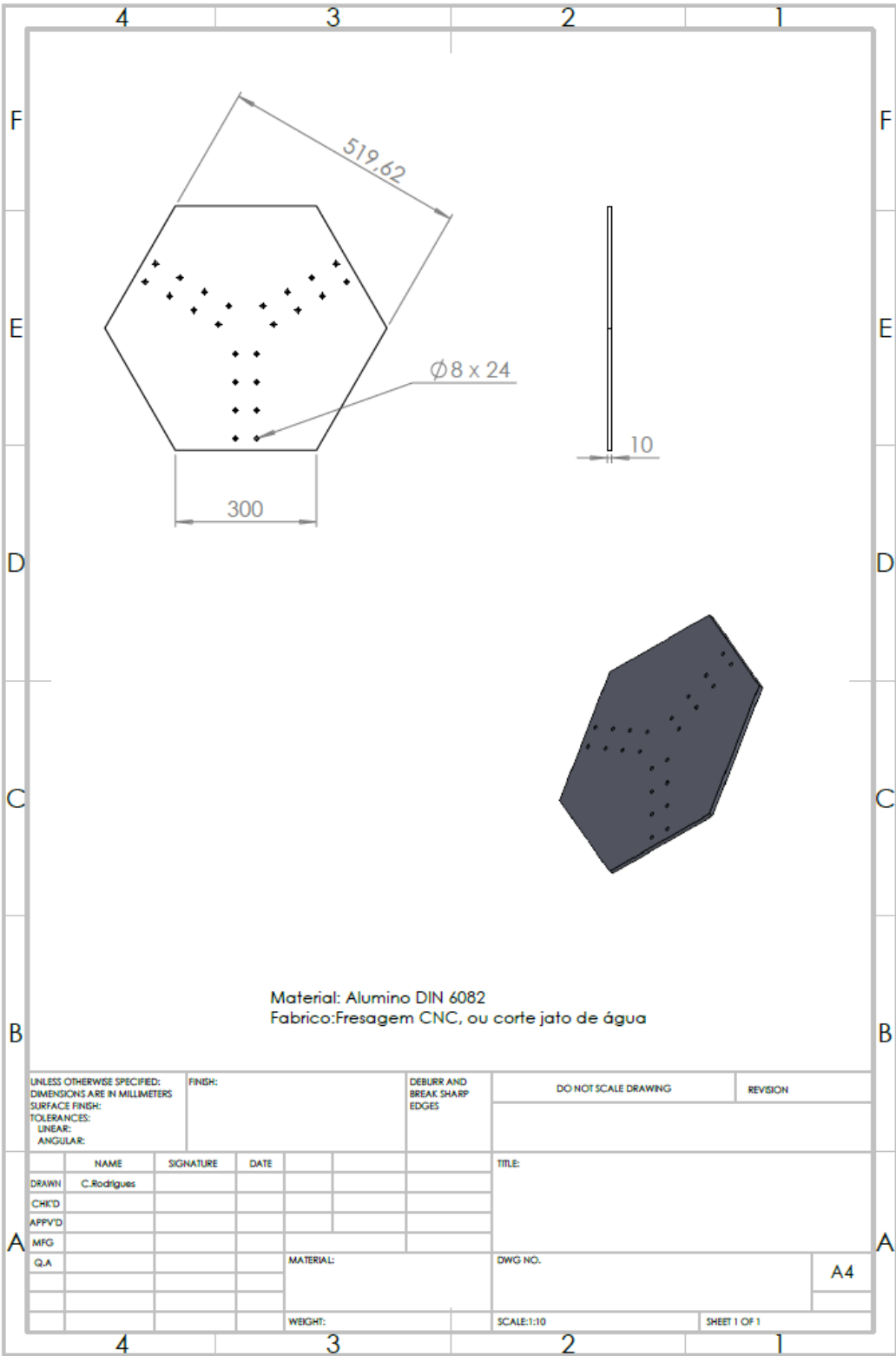


Figura 66. Desenho do painel de união das vigas.

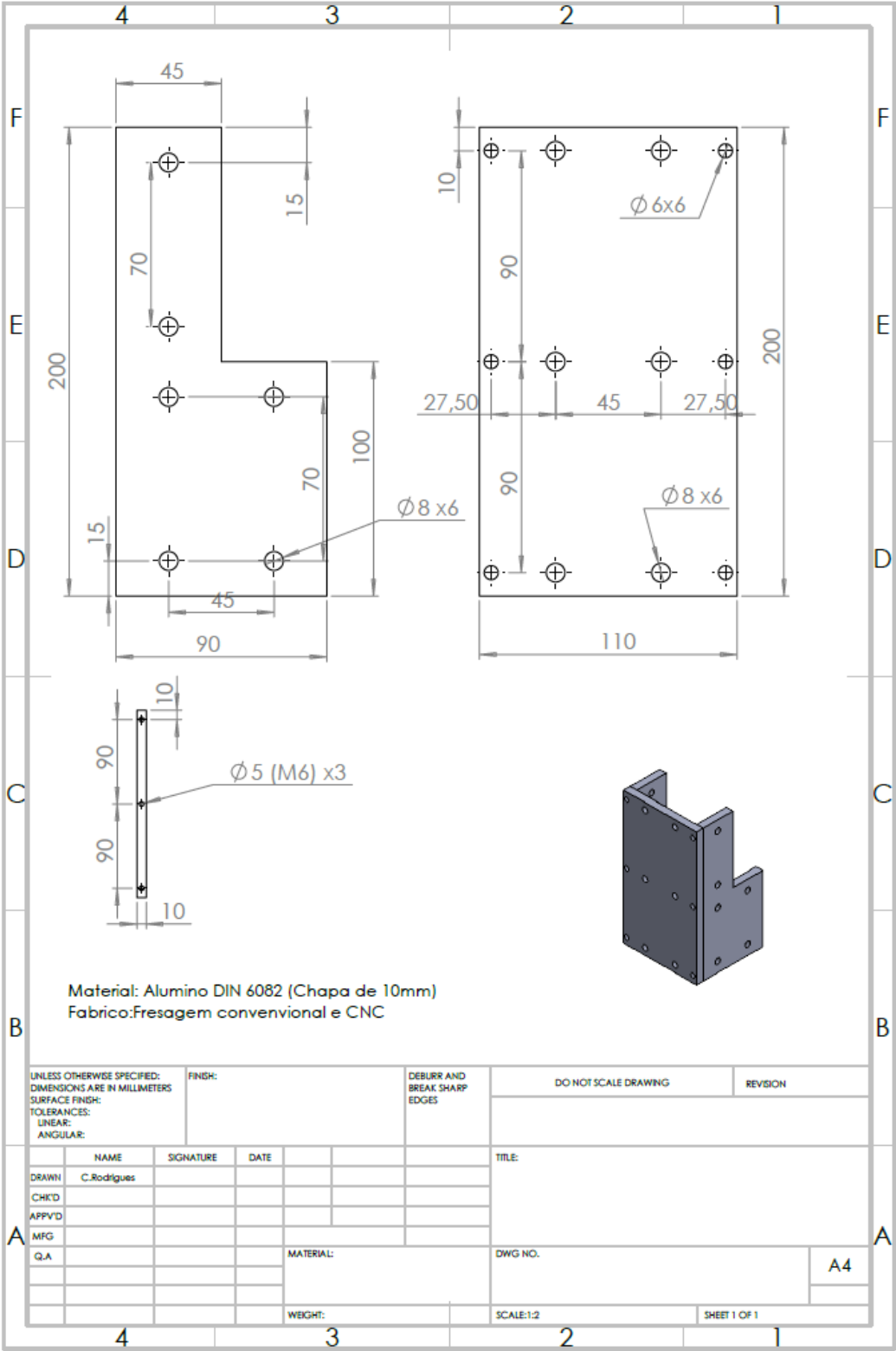


Figura 67. Desenho dos elementos do encaixe das torres.

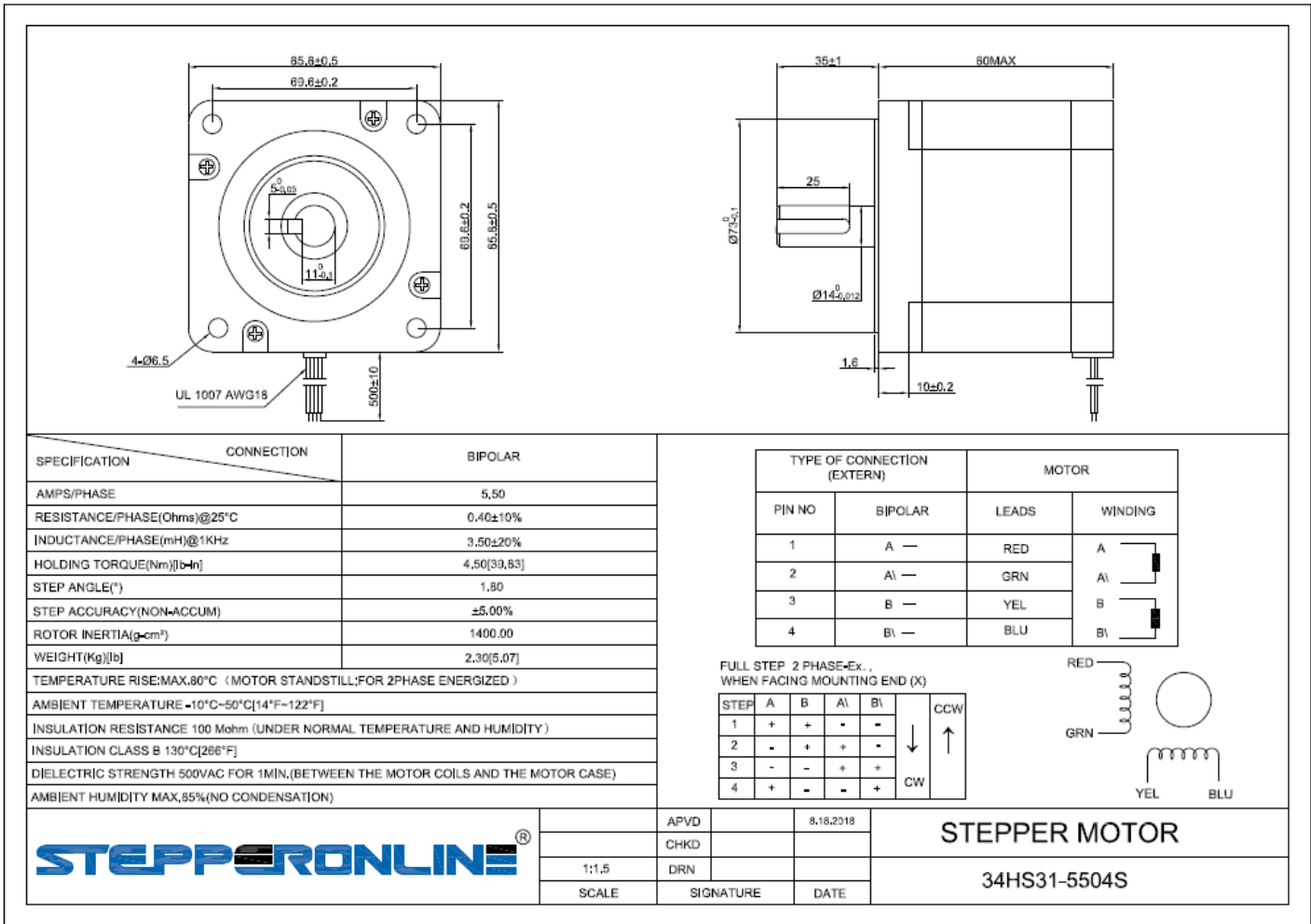
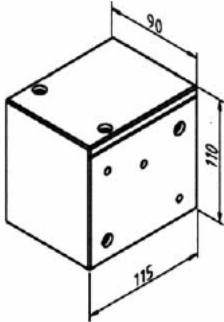


Figura 68. Datasheet do motor.

TIMING BELT TENSIONER

TIMING BELT PULLEY T 90 (LR 12 + LR 16)

Part. N° 28.0090/0



Techn. data/items supplied

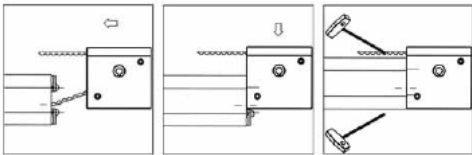
- Aluminium, anodized E6/EV1
- Completely assembled with pulley
- 2 ball bearings

Applications

- For MiniTec linear guides LR

Assembly

- Form threads M8 in both ends of rail and mount power-lock fastener Part N° 21.1018/0
- Pass belt through the rail and through pulley unit
- Insert pulley unit from top
- Tighten set screw



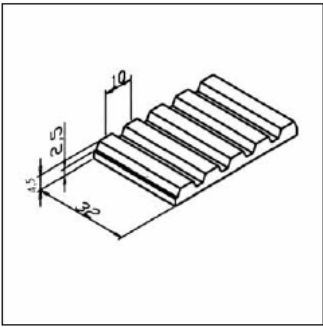
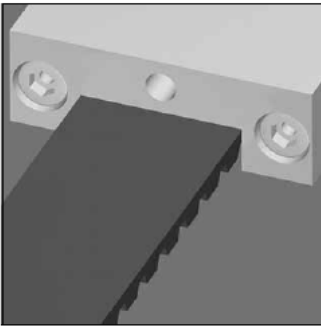
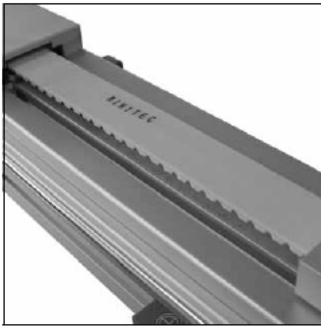
Bore	Weight	Part N°	Part N° stainless steel
without	2,800 kg	28.0082/0	28.0045/0
Ø 11 mm	2,798 kg	28.0082/2	28.0045/2
Ø 14 mm	2,795 kg	28.0082/3	28.0045/3
Ø 16 mm	2,789 kg	28.0082/4	28.0045/4
Ø 19 mm	2,775 kg	28.0082/5	28.0045/5
Ø 20 mm	2,773 kg	28.0082/7	28.0045/7
Ø 24 mm	2,764 kg	28.0082/8	28.0045/8

Figura 69. Datasheet da polia.

69

Part. N° 28.0093/0

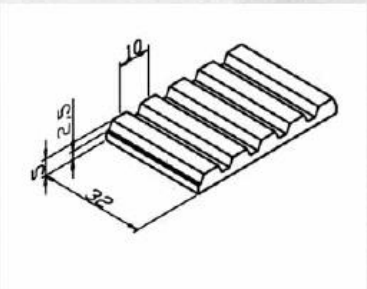
TIMING BELT 32 AT 10

TECHN. DATA / ITEMS SUPPLIED	APPLICATIONS	ASSEMBLY
- PUR white, reinforced with integrated wires	- For MiniTec linear guides LR 12 and LR 16	- Fix timing belt optimizing belt tensioner
- Type 32 AT 10	- For belt drives	- Calculate belt length: see page 285
- Weight 0,19 kg/m		
- Load max. 4750 N		

Figura 70. Datasheet da correia.

Calculation of the timing belt



When using T 45 and T 90

2 x rail length
 + 2 x 210 mm belt length in reverse
 - slide length
 - 2 x 20 mm in belt tensioner

= 2 x rail length - slide length + 380 mm

When using belt drive

Rail length + 212 mm

When using LR6

2 x Rail length + 260 mm

Figura 71. Data sheet da correia 32AT0.