

# **Estudo de conceção de um eixo vertical (Z) para uma mesa XY controlada por um CNC modular**

*Diogo Daniel Alves da Costa*

**Dissertação de Mestrado**

Orientadores: Prof. Manuel Romano dos Santos Pinto Barbosa

Prof. Paulo Augusto Ferreira de Abreu



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Setembro de 2016



*Aos meus pais, irmã e namorada*



## Resumo

A larga utilização na indústria de equipamentos automatizados com recurso ao CNC torna indispensável o estudo destes sistemas durante a formação académica dos estudantes de engenharia mecânica. Com o objetivo de complementar o estudo destes equipamentos, e dando continuidade ao trabalho desenvolvido anteriormente numa mesa XY controlada por um CNC modular, pretende-se conceber uma estrutura de suporte, incluindo o sistema mecânico de um eixo vertical (Z). O eixo Z suporta o acoplamento de um *spindle* para acionamento de uma ferramenta de modo a que a máquina possa realizar operações de fresagem ou corte.

Numa primeira fase é apresentada e analisada a mesa de posicionamento de dois eixos existente, detalhando-se todos os seus componentes, nomeadamente ao nível do sistema de comando, controlo e sistema de transmissão de movimento.

Seguidamente, são analisadas possíveis soluções tendo em conta as funcionalidades desejadas para a máquina, com diferentes tipos de estruturas e de componentes constituintes.

Por fim, é apresentada a solução final da estrutura de suporte e o eixo vertical. O comportamento desta estrutura é analisado tendo em conta os valores dos esforços resultantes do processo de maquinagem e da força exercida pelos eixos da mesa de posicionamento. Este estudo inclui uma análise estática e dinâmica.

Tendo em conta a solução apresentada, e após a sua especificação, são indicados possíveis trabalhos futuros a desenvolver para o melhoramento do sistema existente.



# Design of a vertical axis (Z) and support structure for an XY table controlled by CNC

## Abstract

The large use of CNC equipment in industries makes the study of this systems particularly relevant for mechanical engineering students. In order to complement this study and further complete the development of an existing XY table controlled by a modular CNC it's presented a new support structure and a vertical axis that carries a *spindle* for milling machining.

Initially it is presented and analyzed the existing XY table, including all its components: control and command system, mechanical system and sensors.

Afterwards, possible solutions, with different kinds of structures and are analyzed in order to evaluate the respective advantages or limitations considering the identified requirements.

Subsequently, the solution for the support structure and vertical axis is presented including an analysis of its behavior when subject to the structural and dynamic loads resulting from the machining processes and the XY axes moment.

The work concludes with proposals for improvements future based solution developed.



## Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores, Professor Manuel Romano Barbosa e Professor Paulo Abreu, pela extrema dedicação, rigor, pela motivação, disponibilidade e *feedback* construtivo durante a realização deste trabalho. Aos dois fica um enorme agradecimento.

À minha família, por todo o apoio e carinho que demonstraram, pela motivação constante e por criarem condições para que atingisse o sucesso. Um sincero obrigado.

À minha namorada, Libânia Cunha, quero agradecer pelo apoio incondicional e pelo carinho durante esta fase. Por isso deixo um agradecimento especial.

Aos meus amigos reconheço os bons momentos e contributo nesta particular fase académica.



# Índice de Conteúdos

1	Introdução .....	1
1.1	Tecnologia CNC.....	1
1.2	Centros de maquinagem .....	5
1.3	Fresagem.....	8
1.4	Objetivos da dissertação .....	10
1.5	Organização da dissertação.....	10
2	Caracterização do sistema existente .....	11
2.1	Mesa de posicionamento XY.....	12
2.1.1	Componentes da mesa de posicionamento.....	12
2.1.2	Configuração da área de trabalho .....	14
2.2	CNC modular e sistema de acionamento.....	16
2.3	Spindle existente.....	20
3	Estudo de alternativas para o eixo vertical (Z) e estrutura de suporte .....	25
3.1	Requisitos de dimensionamento da estrutura de suporte e eixo Z.....	25
3.1.1	Esforços resultantes da capacidade de acionamento dos servomotores X e Y.	26
3.1.2	Estimativa da força de maquinagem.....	27
3.1.3	Esforços máximos suportados pelo acoplamento.....	29
3.1.4	Síntese de requisitos de dimensionamento do eixo Z e estrutura de suporte....	30
3.2	Configuração para a estrutura.....	31
3.3	Alternativas para o eixo linear vertical.....	35
4	Especificação detalhada da solução para o eixo vertical (Z).....	39
4.1	Dimensionamento do eixo linear MKK e acessórios .....	39
4.1.1	Projeto mecânico de fixação/suporte do motor e do acoplamento entre veios..	43
4.1.2	Projeto mecânico da interface de fixação do acoplamento pneumático ao eixo	46
4.2	Estrutura de suporte do eixo vertical e da mesa de posicionamento .....	48
4.2.1	Fixação do módulo linear e da mesa de posicionamento à estrutura de suporte.....	51
4.3	Análise estática .....	55
4.4	Análise dinâmica .....	58
4.5	Apresentação da estrutura de suporte detalhada .....	62
5	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro.....	65
	Referências .....	67
ANEXO A:	Orçamento da estrutura.....	69
ANEXO B:	Desenhos de definição e características dos componentes existentes .....	73
ANEXO C:	Desenhos de definição dos componentes e estrutura de suporte .....	81



## **Siglas e Acrónimos**

ATC	Automatic Tool Changer
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CM	Centro de maquinagem
CN	Comando Numérico
CNC	Computerized Numerical Control (Comando Numérico Computorizado)
CT	Centro de torneamento
HMI/MMI	Human-Machine Interface/Man-Machine Interface
NCK	Numerical Control Kernel
OEM	Original Equipment Manufacturer
PLC	Programmable Logic Controller
UC	Unidade Central



## Índice de Figuras

Figura 1.1 - HMI do CNC Siemens Sinumerik 840D sl [5] .....	3
Figura 1.2 - HMI do CNC 8065 POWER [3].....	4
Figura 1.3 - HMI do CNC TNC 640 [6].....	4
Figura 1.4 - Exemplo de estrutura de fresadora vertical de 5 eixos .....	6
Figura 1.5 - Centro de maquinagem vertical SHARP SV-2414S-M [4].....	6
Figura 1.6 - Centro de maquinagem vertical HAAS VF-12/50 [8].....	7
Figura 1.7 - Fresagem de topo e fresagem cilíndrica .....	8
Figura 2.1 - Equipamento existente.....	11
Figura 2.2 - Mesa de posicionamento XY .....	12
Figura 2.3 - Mesa de trabalho.....	13
Figura 2.4 - Conjunto superior .....	13
Figura 2.5 - Conjunto inferior .....	14
Figura 2.6 - Configuração da área de trabalho (dimensões em mm).....	15
Figura 2.7 - Bancada didática modelada em <i>SolidWorks</i> .....	16
Figura 2.8 - Módulos da unidade central.....	17
Figura 2.9 - Monitor, teclado e volante eletrónico do comando Fagor .....	18
Figura 2.10 - Fonte de alimentação PS-25B4.....	18
Figura 2.11 - Driver Fagor AXD 1.08.....	18
Figura 2.12 - Servomotor Fagor FXM31 .....	19
Figura 2.13 - <i>Spindle</i> PDS XLC-070.....	21
Figura 2.14 - Curva Potência/Binário.....	21
Figura 2.15 - Sistema pneumático SCHUNK SWS – 011 .....	22
Figura 2.16 - Interface PDS XLC-070/ SCHUNK SWS – 011.....	22
Figura 3.1 - Montagem do <i>spindle</i> ao acoplamento pneumático.....	29
Figura 3.2 - Esquema da montagem <i>spindle</i> /acoplamento pneumático .....	30
Figura 3.3 - Perfil Bosch Rexroth AG.....	32
Figura 3.4 - Estrutura tipo pórtico .....	33
Figura 3.5 - Estrutura tipo pórtico reforçada .....	33
Figura 3.6 - Estrutura semifechada.....	34
Figura 3.7 - Estrutura fechada .....	34
Figura 3.8 - Estrutura fechada com acessibilidade frontal .....	35
Figura 3.9 - Módulo compacto CKK.....	36
Figura 3.10 - Módulo OBB.....	36
Figura 3.11 - Módulo PSK .....	37

Figura 3.12 - Módulo TKK.....	37
Figura 3.13 - Módulo MKK .....	37
Figura 4.1 - Esquema simplificado da montagem do eixo vertical MKK110 (dimensões em mm) .....	41
Figura 4.2 - Esquema simplificado da montagem do eixo vertical MKK165 (dimensões em mm) .....	43
Figura 4.3 - Acoplamento de fole MBCK51-25-19-A .....	44
Figura 4.4 - Modelo CAD da luneta .....	45
Figura 4.5 - Distribuição de tensões na luneta .....	46
Figura 4.6 - Interface entre acoplamento pneumático e eixo MKK-165.....	47
Figura 4.7 - Aplicação dos esforços .....	47
Figura 4.8 - Distribuição de tensões na interface acoplamento/eixo.....	48
Figura 4.9 - Estrutura de suporte do módulo linear e da mesa de posicionamento XY .....	49
Figura 4.10 - Perfil técnico .....	49
Figura 4.11 - Perfil simplificado .....	49
Figura 4.12 - Acessórios para união de perfis técnicos .....	50
Figura 4.13 - Esquadro módulo linear MKK.....	51
Figura 4.14 - Interface entre Esquadro e estrutura de suporte.....	52
Figura 4.15 - Ligação " <i>Profile conector</i> " .....	52
Figura 4.16 - Aplicação dos esforços na interface do esquadro .....	52
Figura 4.17 - Distribuição de tensões na Interface Esquadro/Estrutura .....	53
Figura 4.18 - Extremidades da mesa de posicionamento .....	53
Figura 4.19 - Aplicação das cantoneiras para a fixação da mesa .....	54
Figura 4.20 - Distribuição de tensões na cantoneira.....	54
Figura 4.21 - Aplicação das forças e fixação da estrutura.....	55
Figura 4.22 - Distribuição de tensões na estrutura para solicitações de maquinagem .....	56
Figura 4.23 - Deslocamento da cabeça do <i>Spindle</i> .....	56
Figura 4.24 - Distribuição de tensões na estrutura para solicitações da mesa de posicionamento .....	57
Figura 4.25 - Deslocamento na parte inferior do MKK 165 .....	57
Figura 4.26 - Adição de quatro perfis à estrutura de base .....	59
Figura 4.27 - Forma do primeiro modo de vibração .....	60
Figura 4.28 - Gráfico amplitude-frequência .....	60
Figura 4.29 - Gráfico tensão equivalente máxima-frequência .....	61
Figura 4.30 - Forma de vibração do oitavo modo de vibração.....	61

Figura 4.31 - Estrutura final .....	62
Figura 4.32 - Dimensões gerais da estrutura .....	62



## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características do CM SHARP SV-2414S-M [4].....	7
Tabela 2 - Características do CM HAAS VF-12/50 [8].....	7
Tabela 3 - Características dos <i>drivers</i> Fagor AXD 1.08.....	19
Tabela 4 - Características dos Servomotores Fagor FXM31.....	20
Tabela 5 - Características dos Fusos KGS N 2505.....	23
Tabela 6 - Características das Guias e rolamentos lineares.....	23
Tabela 7 - Características gerais do sistema existente [15].....	24
Tabela 8 - Dados para o cálculo das forças de acionamento dos eixos X e Y .....	26
Tabela 9 - Características da fresa.....	27
Tabela 10 - Parâmetros de maquinagem considerados.....	28
Tabela 11 - Dados para determinação da força através do acoplamento SCHUNK - 011.....	30
Tabela 12 - Requisitos para o eixo vertical .....	31
Tabela 13 - Características do perfil Bosch Rexroth AG [23] .....	32
Tabela 14 - Dados para dimensionamento do módulo linear do eixo vertical .....	40
Tabela 15 - Cargas máximas admissíveis do módulo linear MKK-110 [24].....	40
Tabela 16 - Massa dos componentes do eixo vertical .....	41
Tabela 17 - Esforços no módulo linear MKK-110.....	42
Tabela 18 - Cargas máximas admissíveis do módulo linear MKK-165.....	42
Tabela 19 - Dados para seleção de acoplamento flexível.....	43
Tabela 20 - Principais características do acoplamento de fole.....	44
Tabela 21 - Características da liga de alumínio AW7075-T651 .....	45
Tabela 22 - Características dos perfis técnicos.....	50
Tabela 23 - Características dos acessórios para ligação dos perfis .....	50
Tabela 24 - Características dos perfis simplificados .....	51
Tabela 25 - Características do aço estrutural S275JR .....	54
Tabela 26 - Frequências de funcionamento dos vários componentes da máquina.....	58
Tabela 27 - Modos naturais de vibração da Estrutura .....	59
Tabela 28 - Características gerais da máquina .....	63



## 1 Introdução

O aumento das exigências atuais ao nível da produtividade, flexibilidade e qualidade na indústria torna inevitável a utilização de sistemas automáticos nos processos de produção. Neste contexto, o uso de máquinas ferramenta automatizadas com recurso ao uso do comando numérico computadorizado (CNC) torna possível cumprir estas exigências uma vez que é possível fabricar componentes complexos com elevado rigor dimensional, elevadas velocidades de funcionamento e ainda possibilitam rápidas adaptações aos processos.

Apesar de se poder considerar uma tecnologia do século passado, a evolução dos sistemas CNC têm permitindo não só a incorporação de novas funcionalidades em máquinas mais recentes, mas também a atualização de equipamentos existentes tirando partido em particular de sistemas CNC modulares.

Assim, surge o presente trabalho, que envolve a atualização de uma mesa de posicionamento XY existente, já dotada de um comando por CNC, projetando uma estrutura para a mesa capaz de suportar um eixo vertical e que torne possível a realização de operações de maquinaria típicas de uma fresadora vertical. O projeto e configuração dos vários módulos ou elementos do sistema, desde o acionamento de cada movimento, sistemas de segurança e programação da máquina, tem por objetivo disponibilizar um equipamento para fins académicos e de formação na tecnologia CNC aos estudantes de engenharia mecânica.

### 1.1 Tecnologia CNC

O comando numérico (CN) é um sistema que possibilita a produção de peças com geometrias complexas, elevada exatidão e rapidez [1, 2]. Em 1947, a *Parsons Company* impulsionou o desenvolvimento do CN através da elaboração de um novo método de fabrico baseado na utilização de uma lista de coordenadas de posicionamento de uma fresadora no plano XY[1]. No ano de 1952, é apresentada pelo laboratório de servomecanismos do MIT, uma fresadora automática de três eixos que interpreta as coordenadas de posicionamento armazenadas numa fita perfurada, sendo considerada a primeira máquina ferramenta de comando numérico.

A evolução do CN para o comando numérico computadorizado (CNC) surge através da associação do CN às tecnologias de computação. Para além das especificidades próprias de cada processo/equipamento em que atualmente se incorporam sistemas de CNC e das características particulares que cada fabricante introduz nas suas soluções de CNC é possível identificar um conjunto de elementos ou funcionalidade principais presentes em cada CNC [2]: o *Numerical Control Kernel* (NCK), um *Programmable Logic Controller* (PLC) e uma *Human-Machine Interface* (HMI).

O NCK é muitas vezes associado ao CN propriamente dito uma vez que tem como função principal o controlo dos eixos de movimento da máquina-ferramenta de forma sincronizada de modo a definir a trajetória de referência que resulta da interpretação do programa de CN. Inclui assim funções de controlo de posição, velocidade e aceleração de cada eixo de movimento bem como funções de interpolação. As funcionalidades de PLC incluem normalmente o controlo e monitorização de sistemas auxiliares tais como troca de ferramenta automática (*ATC-Automatically Tool Changer*), mudança de peça a maquinar, remoção de aparas e sistemas de segurança e ainda velocidade da árvore, processamento de sinais de I/O e funcionamento global da máquina. O objetivo da HMI é permitir ao utilizador executar, editar e simular programas de comando numérico, e configurar os parâmetros da máquina, realizar *jogging*, monitorizar equipamentos de segurança, entre outros. Assume uma importância particular na facilidade de utilização e configuração da máquina para cada trabalho e conseqüentemente para a sua flexibilidade.

A evolução dos sistemas CNC tem-se verificado ao nível de cada um destes três elementos incluindo a estrutura de *hardware* e *software* subjacente à implementação das várias funcionalidades. Esta evolução possibilitou em geral uma maior capacidade de integração da máquina quer com os sistemas de programação CN quer com sistemas complementares ao funcionamento da máquina.

Uma consequência visível da evolução dos sistemas de CNC, ao nível industrial, é a capacidade de proporcionar condições para o aumento da produtividade através da automatização dos processos conjugada com uma grande capacidade de adaptação a mudanças nos processos produtivos. A capacidade de um CNC controlar simultaneamente múltiplos eixos de movimento, por exemplo 28 eixos[3], permite que as outrora linhas de maquinaria dedicadas possam ser substituídas por máquinas *universais* ou mais facilmente reconfiguráveis, como por exemplo centro de maquinaria vertical SHARP Model SV-2414 Mini Mill [4].

Ao nível dos elementos abrangidos pela tecnologia CNC, para além dos três elementos principais de um controlador CNC (NCK, PLC, HMI) os fabricantes disponibilizam ainda em geral, os elementos de atuação e sensores para os eixos de movimento. Ao nível académico, o estudo desta tecnologia permite potenciar o conhecimento e prática em várias áreas desde o controlo de processos de maquinagem até à sua integração e controlo a um nível mais elevado de sistemas de produção.

As vantagens dos sistemas CNC abertos são facilmente perceptíveis quando associadas à capacidade de atualização tecnológica da máquina, capacidade de incorporar funcionalidades permitidas por dispositivos ou sistemas complementares de outros fornecedores, capacidade de configuração customizada da HMI, integração com sistemas de programação *off-line* ou outros sistemas de planeamento e controlo da produção. A tendência para a disponibilização de sistemas abertos e sistemas modulares por parte dos fabricantes de CNCs pode observar-se analisando as soluções oferecidas por alguns fabricantes.

A Siemens, um dos principais fabricantes de sistemas CNC dispõe atualmente de 3 versões de comandos numéricos na sua gama Sinumerik [5]. O modelo Sinumerik 840D sl é considerado um CNC aberto ao nível da HMI e do NCK que permite controlar 8 eixos, sendo expansível até 93. Neste modelo é possível ao fabricante da máquina (OEM) criar novas interfaces para a HMI através de linguagens de programação normalmente utilizadas no sistema operativo *Windows*, tais como *framework.NET*, *C++*, *C#* e *Visual Basic*. Através de um simulador deste CNC, disponível para PC, é possível executar novas funções de CN criadas pelo fabricante ou utilizador de uma máquina ferramenta de forma a verificar o seu correto funcionamento [5]. Na Figura 1.1 é possível visualizar a HMI deste CNC.



Figura 1.1 - HMI do CNC Siemens Sinumerik 840D sl [5]

A FAGOR dispõe de 4 modelos na sua gama de comando numéricos para fresadoras. O CNC 8065 POWER (Figura 1.2) é considerado um CNC aberto ao nível da HMI e do NCK que permite controlar até 28 eixos. Este modelo contém um conversor de DXF, um tradutor de linguagens CNC, permite a simulação 3D dos processos, a contagem de peças, diagnóstico e resolução de problemas por conexão remota[3].



Figura 1.2 - HMI do CNC 8065 POWER [3]

O CNC TNC 640 é um dos 5 modelos disponibilizados pela Heidenhain (Figura 1.3). Este CNC permite controlar até 14 eixos, converter ficheiros DXF, visualizar ficheiros CAD, criar novas interfaces para a HMI e novas funções de CN [6].



Figura 1.3 - HMI do CNC TNC 640 [6]

## 1.2 Centros de maquinagem

Os Centros de Maquinagem (CM) representam a evolução de uma fresadora convencional para uma máquina-ferramenta mais automatizada, não só devido ao comando automático dos movimentos da máquina através do CNC, mas também devido à incorporação de sistemas automáticos de mudança de ferramenta (ATC), de mudança de peça, múltiplas operações de maquinagem, ajuste automático e monitorização do processo de maquinagem, monitorização do estado geral da máquina e integração com outros sistemas computadorizados. Estas características tiveram um papel determinante na evolução não só ao nível da automatização das máquinas-ferramenta, mas também a um nível mais geral dos sistemas de produção flexível. Juntamente com os Centros de Torneamento (CT) podiam ser considerados como blocos elementares de sistemas flexíveis de maquinagem. Esta evolução continua atualmente com o desenvolvimento de centros de maquinagem que incorporam eixos lineares adicionais para juntar na mesma máquina as funcionalidades de um centro de maquinagem (fresadora) e um centro de torneamento (torno mecânico). Para além desta multiplicidade de operações de maquinagem possíveis, a evolução verificou-se também no aumento da capacidade de remoção de material com o aumento da potência e velocidades de avanço e de corte. A evolução verifica-se ainda na capacidade de utilizar sistemas de programação mais eficientes e complexos diretamente no controlador de comando numérico (ex. CAM).

Obviamente nem sempre se justificará toda a funcionalidade permitida pelas máquinas mais complexas, pelo que continuam a existir gamas variadas de centros de maquinagem quer relativamente a dimensões e volume de trabalho, quer em relação às outras funcionalidades.

Tal como nas fresadoras podemos distinguir centros de maquinagem horizontais ou verticais em função da direção do eixo de corte principal. Naturalmente existirão soluções de implementação diferentes segundo as especificidades próprias de cada máquina. Em geral, tal como uma fresadora vertical, um CM vertical é uma máquina constituída por uma mesa de trabalho horizontal, na qual se coloca a peça a maquinar, com capacidade de ser movida segundo as direções X e Y e por um eixo vertical (Z) que transporta a árvore da máquina, ou *spindle*, que aciona a ferramenta (fresa), em rotação. Para além destes três eixos de movimento é frequente atualmente encontrar CM com um ou dois eixos rotativos adicionais (Figura 1.4), CM de 4 ou 5 eixos respetivamente, cujo objetivo é permitir manter a orientação da ferramenta perpendicularmente ao plano de corte

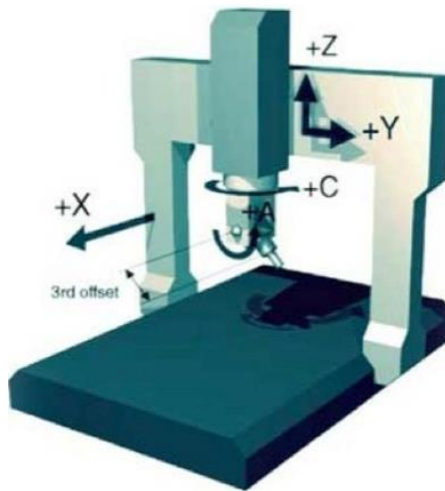


Figura 1.4 - Exemplo de estrutura de fresadora vertical de 5 eixos

Existem vários fabricantes e gamas de CM, normalmente distinguidos pelo número de eixos de movimento e cursos, potência e velocidades de corte, velocidades de avanço, sistemas auxiliares e funcionalidades do controlador.

Dentro da oferta do mercado de centros de maquinagem vertical foram escolhidos equipamentos dos fabricantes HAAS[7] e SHARP[4] como exemplos desta variedade de oferta.

O centro de maquinagem SV-2414S-M (Figura 1.5) da SHARP é o equipamento de menores dimensões disponibilizado por este fabricante. Na Tabela 1 é possível verificar as principais características deste modelo.



Figura 1.5 - Centro de maquinagem vertical SHARP SV-2414S-M [4]

Tabela 1 - Características do CM SHARP SV-2414S-M [4]

Curso Eixo X	[mm]	406
Curso Eixo Y	[mm]	305
Curso Eixo Z	[mm]	254
<i>Spindle</i> até à superfície da mesa	[mm]	102-306
Velocidade <i>Spindle</i>	[rpm]	10 000
Velocidade de avanço rápido	[m/min]	30,5
Velocidade de corte máxima	[m/min]	21,2
Potência <i>Spindle</i>	[KW]	11,2
Exatidão de posicionamento	[mm]	0.004

A HAAS tem na sua gama o modelo de grandes dimensões HAAS VF-12/50 (Figura 1.6), cujas características são apresentadas na Tabela 2.

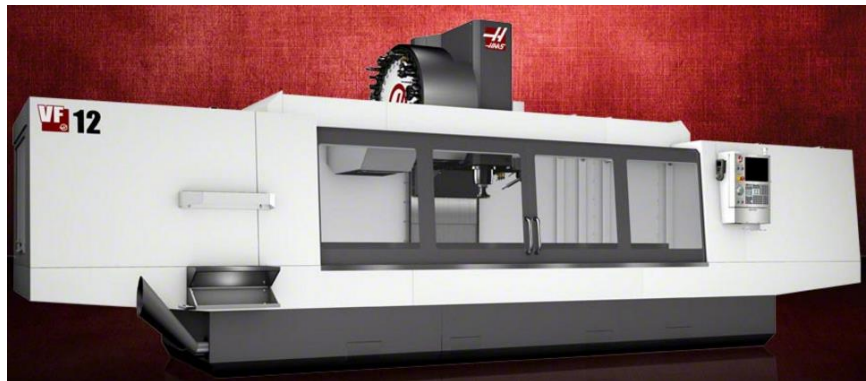


Figura 1.6 - Centro de maquinagem vertical HAAS VF-12/50 [8]

Tabela 2 - Características do CM HAAS VF-12/50 [8]

Curso Eixo X	[mm]	3810
Curso Eixo Y	[mm]	813
Curso Eixo Z	[mm]	762
<i>Spindle</i> até à superfície da mesa	[mm]	127-889
Velocidade <i>Spindle</i>	[rpm]	7500
Velocidade de avanço rápido	[m/min]	15.2
Velocidade de corte máxima	[m/min]	9.1
Potência <i>Spindle</i>	[KW]	22.4

Como se verifica nas tabelas anteriores é possível obter centros de maquinagem consoante a tarefa pretendida pelo utilizador final existindo no mercado máquinas com cursos que podem variar desde as dezenas até aos milhares de milímetros, diferentes potências de acionamento da árvore e diferentes velocidades de funcionamento e de corte.

### 1.3 Fresagem

A fresagem é um dos processos por arranque de aparas muito usado numa vasta gama de peças ou produtos. Este processo é utilizado desde o desbaste até ao acabamento conseguindo obter peças com geometrias complexas, incluindo cavidades ou bossas, furos roscados, reentrâncias, entre outros.

Na fresagem o material é removido por uma ferramenta, chamada “fresa”. À rotação da fresa está associado o movimento principal de corte que conjuntamente com os restantes movimentos, implementados na mesa ou no eixo vertical, determinam o volume de material removido. A fresa consiste num sólido de revolução com múltiplas arestas de corte equidistantes, iguais entre si, e dispostas simetricamente em relação ao eixo de rotação (Figura 1.7) [9].

O eixo da fresa pode estar posicionado de duas formas relativamente à peça: perpendicularmente (fresagem de topo) ou paralelamente (fresagem cilíndrica).

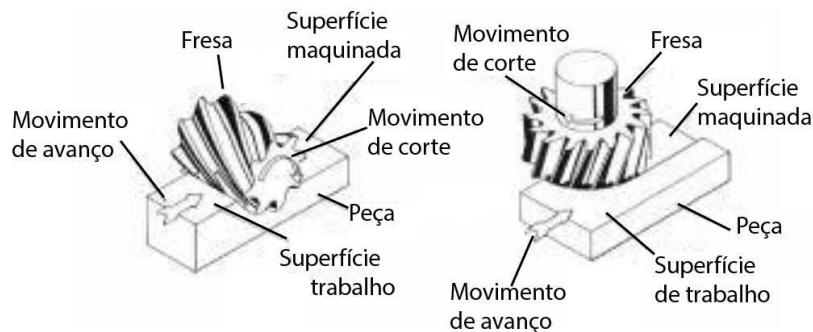


Figura 1.7 - Fresagem de topo e fresagem cilíndrica

No caso da fresagem cilíndrica o movimento de avanço pode ser feito em sentido contrário ao de rotação da ferramenta (fresagem concordante) ou no mesmo sentido (fresagem discordante). Na fresagem “concordante” as forças de corte não são tão elevadas como na fresagem discordante, sendo por isso o método mais utilizado. A fresagem “discordante” é indicada para grandes taxas de remoção de material. A fresagem de topo, quando comparada com a fresagem paralela produz aparas de espessura uniforme conduzindo a um rendimento 15 a 20% mais elevado e uma superfície mais lisa[10].

A qualidade do produto final obtido pela operação de fresagem depende de vários fatores intrínsecos à máquina, tais como potência disponível, exatidão e resolução. No entanto tal como em outros processos de maquinagem, é necessário definir ou ajustar para cada operação os parâmetros que determinam o volume de material removido nomeadamente a penetração da ferramenta no material, as velocidades de corte e de avanço. O ajuste destes parâmetros depende não só das características da máquina, mas também da ferramenta, dos materiais a maquinar e do acabamento pretendido.

Assim, para um processo de fresagem é comum usar os parâmetros e designações abaixo enunciados [11]:

- **Velocidade de corte (Vc) [m/min]** - Velocidade tangencial instantânea do ponto selecionado sobre a lâmina, no movimento de corte, em relação à peça.
- **Velocidade de rotação (N) [rpm]** - Velocidade angular da fresa.
- **Avanço por dente (ft) [mm]** - Distância linear percorrida por um dente da ferramenta no intervalo em que dois dentes consecutivos entram em corte.
- **Velocidade de avanço (fm) [mm/min]** - Velocidade instantânea do ponto selecionado sobre a aresta de corte em relação à peça, no movimento de avanço.
- **Largura de corte (ae) [mm]** – Quantidade que a fresa penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço.
- **Número de dentes (nt)** - Número de dentes da fresa.
- **Profundidade de corte (ap) [mm]** - Distância que a fresa penetra na peça (na direção do eixo da fresa).
- **Potência de corte (Pc) [kW]** - Potência necessária para atingir a taxa de remoção de material.
- **Coefficiente de Força Específica de Corte (Kc) [MPa]** - Força na direção de corte necessária para cortar uma área de cavacos de 1 mm<sup>2</sup>.

Em geral o objetivo principal será retirar o máximo possível de material no mais curto espaço de tempo, no entanto a interação dos vários parâmetros torna o processo de ajuste de cada um difícil de determinar explicitamente. Normalmente recorre-se a dados dos fabricantes das ferramentas e dados empíricos disponíveis em várias referências [11]. Naturalmente a utilização de um dado valor para cada parâmetro tem consequências nos resultados da maquinação e na determinação dos esforços resultantes do processo de maquinação, sendo portanto importantes na análise do projeto da máquina.

#### **1.4 Objetivos da dissertação**

O presente trabalho envolve a utilização de uma mesa de posicionamento XY existente no laboratório de robótica do DEM-FEUP, projetando um estrutura mecânica de modo a reconfigurar o equipamento como uma máquina fresadora de eixo vertical, tirando partido do CNC modular de 3 eixos (Fagor-8055 i) já utilizado para controlar a mesa XY. Pretende-se assim atingir os seguintes objetivos:

- Projetar uma estrutura mecânica de suporte da mesa e do eixo vertical
- Dimensionar e selecionar um eixo vertical tendo em conta as especificações de um *spindle* existente bem como o conjunto servomotor/driver já disponível no CNC
- Caracterizar a estrutura desenvolvida em termos de solicitações estáticas e dinâmicas.

#### **1.5 Organização da dissertação**

A dissertação está organizada em mais quatro capítulos para além deste capítulo de introdução. No capítulo seguinte, capítulo 2, faz-se uma caracterização dos sistemas existentes que incluem a mesa XY, os componentes do sistema CNC e respetivos servomotores, utilizado para comandar a mesa e o eixo Z, bem como o motor de acionamento da ferramenta (*spindle*). O capítulo 2 termina com uma análise e especificação dos requisitos para o projeto da estrutura e do eixo Z. Com base nas especificações estabelecidas no capítulo 2, no capítulo 3 são apresentadas as alternativas consideradas para o projeto do eixo Z e da estrutura de suporte. No capítulo 4 a solução escolhida é analisada em detalhe sendo apresentados os estudos correspondentes a uma avaliação do comportamento da estrutura e eixo Z com solicitações estáticas e dinâmicas, de modo a caracterizar as condições de utilização da máquina. Por fim no capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho efetuado e proposta para trabalhos futuros.

## 2 Caracterização do sistema existente

O objetivo deste capítulo é fazer uma apresentação e análise do sistema existente (Figura 2.1) de modo a estabelecer os requisitos de projeto da estrutura de suporte e do eixo Z.

O sistema é constituído por uma mesa de posicionamento XY, um sistema modular da Fagor[12], um *spindle* do fabricante PDS[13], e um sistema de acoplamento pneumático da marca SCHUNK[14].

A caracterização do sistema existente é necessária visto que condicionará os requisitos para o eixo vertical e estrutura de suporte devido aos esforços estáticos e dinâmicos permitidos pelos sistemas de acionamento existentes, os cursos de trabalho definidos, as velocidades estabelecidas e as características do CNC, em conjugação com os objetivos de materiais a maquinar e ferramentas a utilizar.

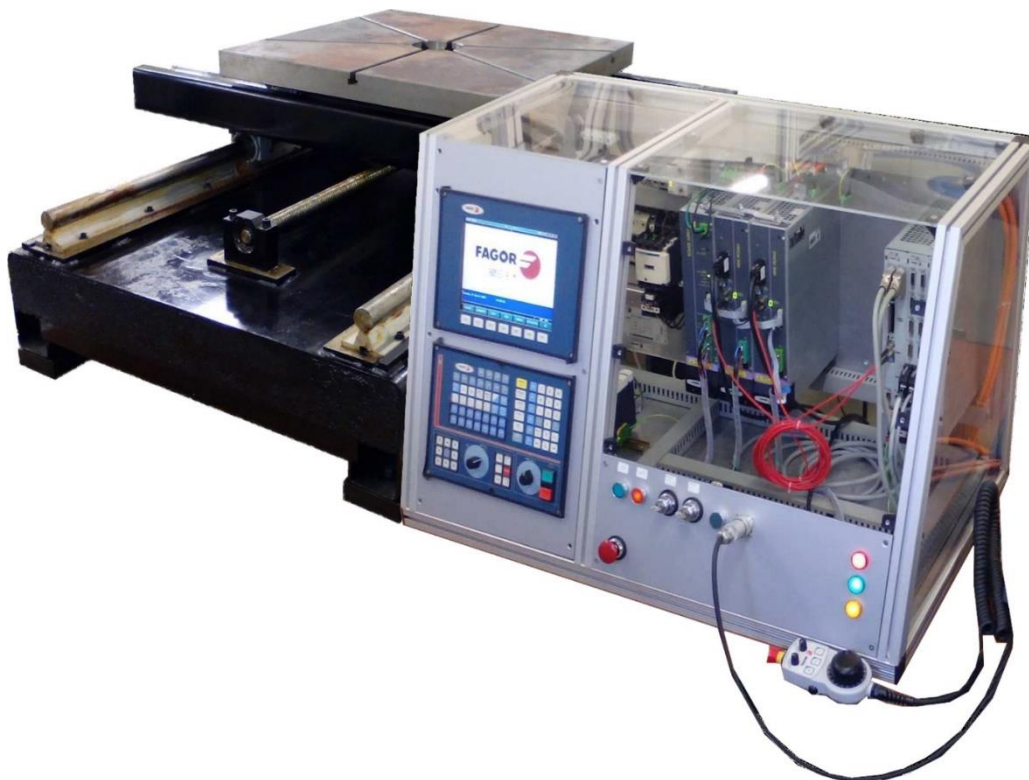


Figura 2.1 - Equipamento existente

## 2.1 Mesa de posicionamento XY

A mesa de posicionamento atual consiste numa estrutura mecânica com dois conjuntos móveis, suportados por guias lineares e sistemas de transmissão por fuso e porca de esferas. O projeto inicial da mesa é desconhecido tendo o seu estado atual, que incorpora comando por CNC, resultado em grande parte dos trabalhos desenvolvidos ao longo de uma dissertação realizada no ano de 2015 [15].

### 2.1.1 Componentes da mesa de posicionamento

A mesa de posicionamento pode ser dividida em três conjuntos principais (Figura 2.2): uma base fixa (conjunto inferior) sobre a qual desliza diretamente um conjunto superior (eixo X) que por sua vez transporta os componentes associados ao eixo Y sobre o qual assenta a mesa de trabalho.

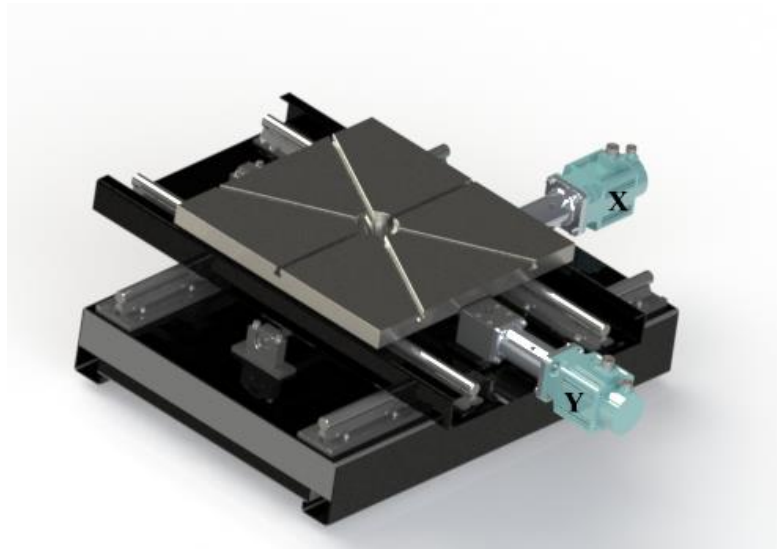


Figura 2.2 - Mesa de posicionamento XY

A mesa de trabalho (Figura 2.3) corresponde ao elemento terminal da mesa de posicionamento no qual se fixa a peça a trabalhar. Este conjunto contém uma base em aço de dimensões 600 x 600 x 45 (mm) acoplada aos rolamentos lineares e porca de esferas (eixo Y) tendo uma massa estimada de 124 kg. Os rasgos maquinados são para porcas M10, ISO 299/DIN 508, permitindo assim a fixação de peças.

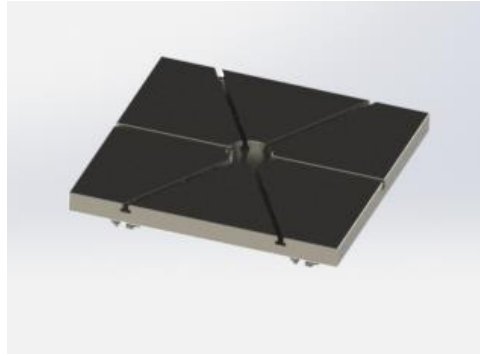


Figura 2.3 - Mesa de trabalho

O conjunto superior, detalhado na Figura 2.4, movimenta-se segundo a direção do eixo X, contendo os elementos responsáveis (suporte do fuso superior e as guias de movimentação) por movimentar o conjunto da mesa de trabalho, segundo o eixo Y. Este conjunto tem como base uma chapa de aço quinada com espessura de 4 mm e no total apresenta uma massa de aproximadamente 105 kg.

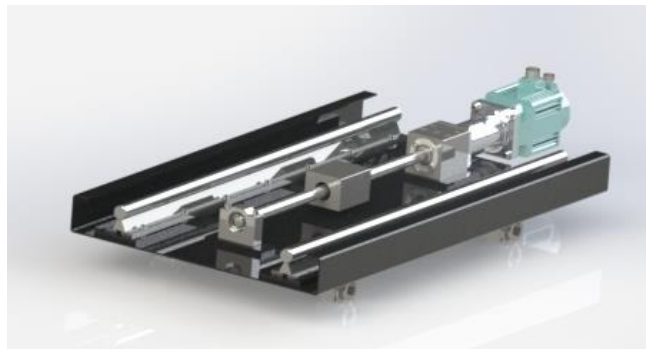


Figura 2.4 - Conjunto superior

O conjunto inferior, ou base da mesa (Figura 2.5), é a estrutura que suporta os elementos responsáveis pelo acionamento e guiamento do eixo X (montagem do fuso superior e as guias de movimentação).

O conjunto inferior tem como base uma chapa de aço quinada com espessura de 4 mm, em que o espaço interior desta estrutura está preenchido com betão polimérico que permite a absorção de vibrações. No total este conjunto tem uma massa estimada de 344 Kg.

Assim, a massa total da mesa de posicionamento é de aproximadamente 573kg.

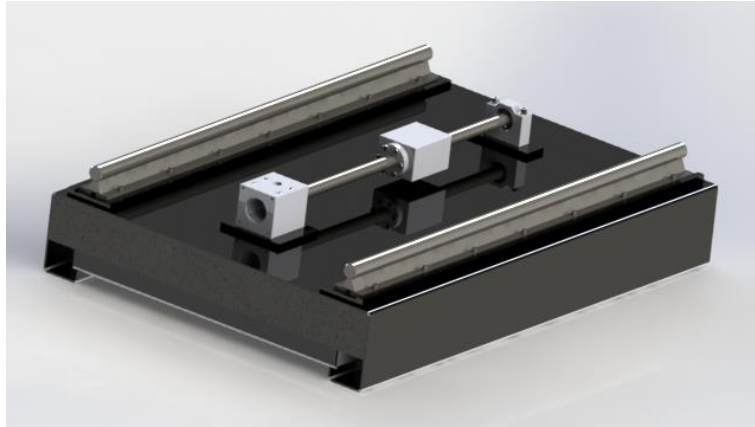


Figura 2.5 - Conjunto inferior

Os eixos de movimento lineares (X,Y) são constituídos por fusos e porcas de esferas INA (KGS N 2505, KGF-N 2505 RH EE) para conversão do movimento de rotação dos servomotores *brushless* AC, aos quais estão acoplados através de junções rotativas elásticas de fole e lunetas de suporte dos servomotores. São ainda usadas para guiamento guias lineares (TSWW30), rolamentos lineares (KBO30-PP) e suportes dos rolamentos lineares (KGBO30-PP), também do fabricante INA.

### 2.1.2 Configuração da área de trabalho

A delimitação do espaço ocupado pela mesa, tendo em conta os limites de movimentação dos eixos é importante para definir a estrutura de suporte e a posição do eixo Z no plano XY. Na Figura 2.6, estão representadas as áreas abrangidas pelos eixos XY tendo em conta valores máximos dos cursos dos fusos (área azul), posição dos sensores de segurança (área verde), definição das posições limite através de sensores de fim-de-curso virtuais (área a vermelho).

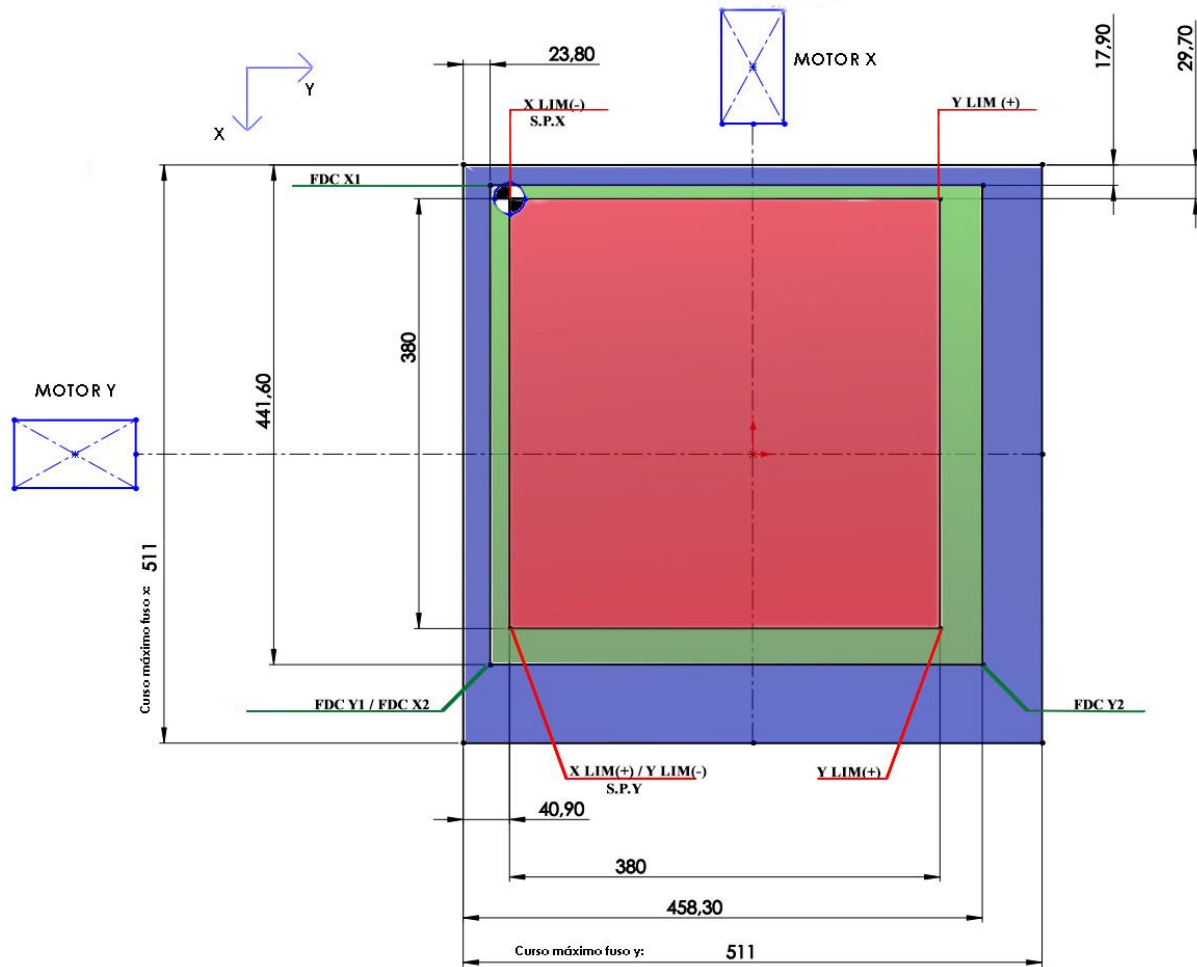


Figura 2.6 - Configuração da área de trabalho (dimensões em mm)

Tal como é visível na Figura 2.6, o curso de trabalho máximo da mesa por eixo (área azul) é de 511 mm. A verde está representada a área definida pelos sensores de fim-de-curso de segurança (FDC X1, FDC X2, FDC Y1 e FDC Y2) que contempla uma distância de segurança em relação aos limites físicos da mesa.

Os sensores de posição (S.P. X e S.P. Y) são utilizados para a identificação do *Zero Máquina* através da funcionalidade *home search*<sup>1</sup>. Esta operação é necessária uma vez que são utilizados transdutores de posição incrementais nos eixos XY.

Com base na posição dos sensores S.P.X e S.P.Y e através dos parâmetros da máquina “LIMIT (+)” e “LIMIT (-)” está definida uma área de trabalho útil com um curso segundo os eixos X e Y de 380 mm (área a vermelho), correspondendo a posição do *Zero Máquina* à posição assinalada no canto superior esquerdo da figura a uma distância de 29.7 mm e 40.9 mm dos limites da mesa.

<sup>1</sup> Pesquisa do ponto de referência da máquina

A possibilidade de ajustar a área de trabalho útil através de parametrização no CNC é tida em conta na especificação da estrutura do eixo vertical visto que é necessário desenvolver uma estrutura capaz de adaptar a posição do *spindle* ao centro da área de trabalho da mesa de posicionamento.

Incluindo as dimensões da base da mesa e dos servomotores a área envelope corresponderá às dimensões de 1340x1340 mm e uma altura de 396 mm.

## 2.2 CNC modular e sistema de acionamento

O sistema CNC Fagor 8055M é um sistema modular vocacionado para operações de fresagem com capacidade de controlo até quatro eixos, constituído pela unidade central (UC) que integra as funcionalidades NCK e de PLC, um monitor e teclado independentes (HMI) e por um volante eletrónico. Este modelo terá uma idade superior a 10 anos tendo sofrido a última atualização de *software* no ano de 2015.

O sistema de acionamento Fagor *Digital Drive System* inclui os *drivers* para comandar os servomotores, a fonte de alimentação e os servomotores. Estes componentes, interligados, juntamente com outros elementos dos circuitos de comando e de potência constituem a bancada didática (Figura 2.7) que comanda a mesa de posicionamento.

A modelização da bancada didática, juntamente com as fichas técnicas disponibilizadas pelos fabricantes dos componentes, permitiu estimar a massa de aproximadamente 76 kg para este conjunto.

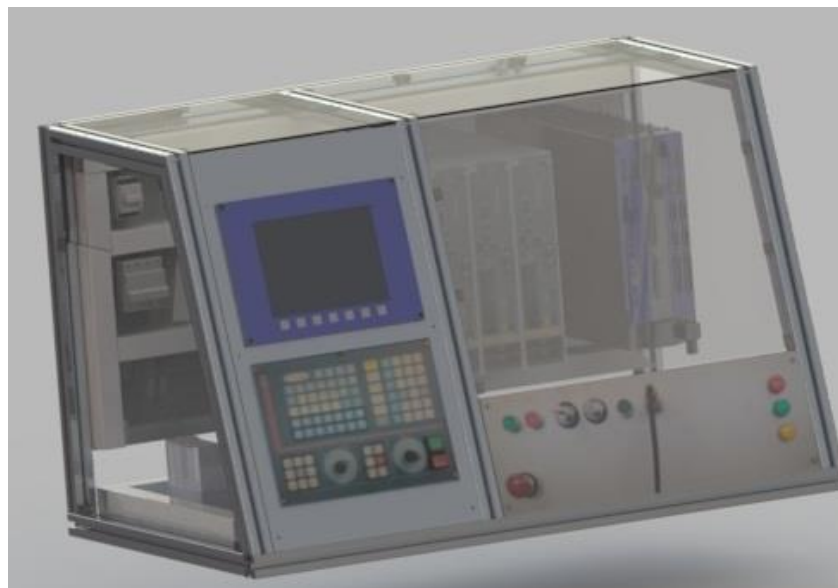


Figura 2.7 - Bancada didática modelada em *SolidWorks*

### **Unidade Central (UC)**

A unidade central é responsável pelas funções de CNC e pelas funções auxiliares através de um *soft* PLC. As funções de CNC passam por interpretar programas e gerar referências de velocidade enquanto o *soft* PLC controla e monitoriza os sistemas auxiliares tais como, a troca de ferramentas automática (ATC-*Automatically Tool Changer*), a velocidade da árvore, a mudança de peça a maquinar, o processamento de sinais de I/O, o funcionamento global da máquina, a remoção de aparas, entre outros.

A UC deste sistema é constituída por três módulos, o módulo de CPU (CPU 8055/AB-M), o módulo dos eixos (AXES 8055), o módulo do disco rígido e ligação *Ethernet* (HD 8055-E) (Figura 2.8).



Figura 2.8 - Módulos da unidade central

### **Interface máquina/utilizador (HMI) e volante eletrónico**

A Interface entre máquina e o utilizador é feita através de um monitor (NMON-55-11-LCD), de um teclado (OP-55MCO/TCO) e de um volante eletrónico (HBA-072915) (Figura 2.9).



Figura 2.9 - Monitor, teclado e volante eletrônico do comando Fagor

### **Drivers Fagor AXD 1.08 e fonte de alimentação PS-25B4**

A energia elétrica é fornecida aos *drivers* e ao circuito de comando através de uma fonte de alimentação da Fagor, modelo PS-25B4 (Figura 2.10) [16], com uma massa de 9kg.

Os três *drivers* Fagor AXD 1.08 (Figura 2.11) existentes amplificam e convertem os sinais de referência derivados da UC em sinais de potência que são enviados para os servomotores.

As principais características dos *drivers* são apresentadas na Tabela 3.



Figura 2.10 - Fonte de alimentação PS-25B4



Figura 2.11 - Driver Fagor AXD 1.08

Tabela 3 - Características dos *drivers* Fagor AXD 1.08

Tensão admitida no barramento de potência	[Vdc]	542-800
Corrente nominal	[A]	4
Corrente de pico máxima (durante 500ms a cada 10s)	[A]	8
Massa	[kg]	6

### Servomotores

O sistema existente é composto por três servomotores do fabricante Fagor modelo FXM () [16], cujas características principais são apresentadas na Tabela 4.

Os servomotores são motores *brushless* AC trifásicos síncronos, isto é, sem escovas com rotor de íman permanente. Integram um encoder incremental sinusoidal para leitura de posição e de velocidade.

Os dois servomotores FXM31.40A.E1.000 (Figura 2.12) são usados para acionamento dos eixos de movimento no plano horizontal (X, Y) enquanto o servomotor FXM31.40A.E1.010 destina-se ao acionamento do eixo vertical (Z) distinguindo-se por integrar um travão eletromecânico.



Figura 2.12 - Servomotor Fagor FXM31

Tabela 4 - Características dos Servomotores Fagor FXM31

Característica		FXM 31.40A.E1.000	FXM 31.40A.E1.010
Binário de bloqueio, $M_O$	[N.m]	2.6	2.6
Binário máximo $M_{Máx.}$	[N.m]	13	13
Velocidade de rotação, n	[rpm]	4000	4000
Potência	[KW]	1.1	1.1
$t_{aceleração}$	[ms]	11.3	11.3
Momento de inércia, J	[kg.cm <sup>2</sup> ]	3.5	4.5
Constante de binário	[Nm/A]	1.35	1.35
Corrente de pico	[A]	9.6	9.6
Massa	[kg]	5.5	6.1

Apesar de os servomotores poderem disponibilizar um binário de pico de 13 Nm, estes encontram-se limitados pela corrente de pico do driver (8 A), verificando-se assim para estas condições um binário de pico dos motores é de 10.8 Nm. Atualmente, por questões de segurança devido às condições de instalação da mesa a velocidade de rotação dos servomotores foi limitada a 2000 rpm.

### 2.3 *Spindle existente*

Pretende-se usar como árvore da fresadora um *spindle* já existente no laboratório e usado para operações de fresagem com robôs industriais. De modo a manter essa possibilidade o projeto do eixo Z terá que considerar a possibilidade de montagem do *spindle* a partir do sistema de fixação para montagem no robô.

A utilização de motores projetados especificamente para suportar a ferramenta (i.e. *spindle*) é uma solução cada vez mais comum. O *spindle* a utilizar, Figura 2.13, é o modelo XLC-070 do fabricante Precision Drive System (PDS), existente no Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP.



Figura 2.13 - *Spindle* PDS XLC-070

Consiste num motor assíncrono comandado por um variador de frequência Delta VFD-VE [17] e apresentando as curvas de funcionamento (Figura 2.14) com uma zona de binário constante até às 22000 rpm e uma zona de potência constante das 22000 rpm até à velocidade máxima (40000 rpm).

O *spindle* XLC-070 tem uma potência máxima de 2.2 KW, uma velocidade máxima de 40000rpm, um binário máximo de 0,97 Nm e uma massa de 9.1 kg.

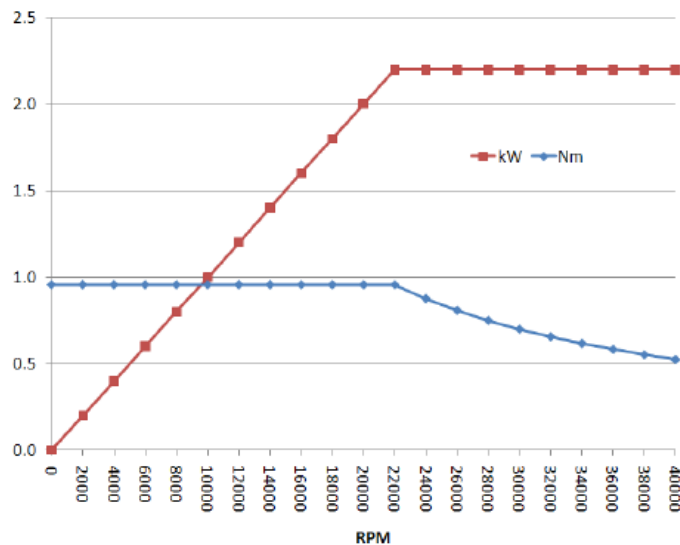


Figura 2.14 - Curva Potência/Binário

O funcionamento do *spindle* inclui ainda um circuito pneumático para arrefecimento e fixação, da ferramenta e do próprio *spindle*. Todos os componentes para os circuitos de comando e potência encontram-se alojados num armário independente.

A utilização de ferramentas deve ter em conta o porta-pinças HSK-E32. A fixação ao eixo vertical será feita através do sistema pneumático de mudança rápida de ferramenta SCHUNK SWS – 011 [18] (Figura 2.15), que tem uma massa de 210 g e é adequado para cargas até 16 kg. As características deste sistema pneumático são apresentadas no Anexo B.



Figura 2.15 - Sistema pneumático SCHUNK SWS – 011

O acoplamento do sistema pneumático SCHUNK SWS - 011 ao *spindle* é feita através de uma interface, com uma massa estimada de 155g visível na Figura 2.16, e as suas dimensões são apresentadas no Anexo B.

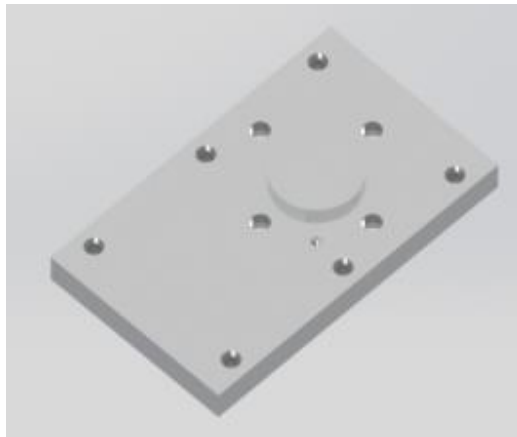


Figura 2.16 - Interface PDS XLC-070/ SCHUNK SWS – 011

Um excerto das indicações do fabricante relativamente aos materiais a maquinar com este *spindle*, destinado a maquinar materiais leves e pouco duros (desde espumas rígidas até alumínio e ligas leves), fornecida no manual do *spindle*, pelo fabricante[19] é apresentado no Anexo B, juntamente com as dimensões de atravancamento.

### **Características gerais do equipamento existente**

Uma síntese das características de cada um dos componentes e sistema existentes é apresentada nas tabelas seguintes. Na Tabela 5 são apresentadas as características dos fusos e porcas de esferas incluindo capacidades de carga, velocidades, cursos, momentos de inércia e massa, tendo em conta valores máximos e nominais obtidos dos fabricantes [20].

Tabela 5 - Características dos Fusos KGS N 2505

Velocidade Linear	20	[m/min]
Força nominal	2,9	[kN]
Capacidade de carga	383	[kg]
Binário nominal	2,6	[N.m]
Curso de trabalho	511	[mm]
Comprimento total	655	[mm]
Passo do fuso	5	[mm]
Diâmetro nominal	25	[mm]
Momento de inércia	$2.25 \times 10^{-4}$	[kg.m <sup>2</sup> /m]
Velocidade de rotação máxima	4500	[rpm]
Massa	1.99	[kg]
Carga estática (porca de esferas)	22,5	[kN]
Carga dinâmica (porca de esferas)	12,3	[kN]

As características das guias e rolamentos lineares incluindo capacidades de carga, velocidades, pesos e coeficiente de atrito são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características das Guias e rolamentos lineares

Guia linear INA TSWW30 e rolamentos lineares INA KBO30-PP		
Velocidade máxima	5	[m/s]
Aceleração máxima	50	[m/s <sup>2</sup> ]
Massa rolamentos	0.240	[kg]
Número de linhas de esferas	5	
Carga estática	3,7	[kN]
Carga dinâmica	3,0	[kN]
Massa suporte rolamentos	0.780	[kg]
Coeficiente de atrito de rolamento ( $\mu$ )	0.001 – 0.0025	
Massa guia linear	7.580	[kg/m]

A Tabela 7 apresenta as características da mesa de posicionamento, *spindle* e bancada didática incluindo dimensões de referência, pesos/massas, velocidades e acelerações, potências, forças e binários.

Tabela 7 - Características gerais do sistema existente [15]

Sistema existente		
Comprimento roscado dos fusos dos eixos X e Y	[mm]	655
Curso útil dos eixos X e Y	[mm]	380
Velocidade de rotação do <i>spindle</i>	[rpm]	1 - 40 000
Velocidade de avanço rápido	[mm/min]	10 000
Potência <i>spindle</i>	[kW]	2.2
Binário máximo do <i>spindle</i>	[N.m]	0.97
Força máxima do eixo X	[N]	2900
Força máxima do eixo Y	[N]	2900
Velocidade de <i>JOG</i>	[mm/min]	0-1 000
Potência dos motores dos eixos X e Y	[kW]	1.1
Potência do motor do eixo Z	[kW]	1.1
Tempo de aceleração	[ms]	11.3
Aceleração avanço	[m/s <sup>2</sup> ]	30
Massa máxima que pode ser colocada na mesa	[kg]	383
Atravancamento da mesa	[mm]	1340x1340x430
Massa do <i>spindle</i>	[kg]	9.1
Atravancamento da bancada	[mm]	1080x680x677
Massa da mesa de posicionamento	[kg]	573
Massa da bancada	[kg]	76

Com base na análise dos sistemas existentes e na identificação das suas características o capítulo seguinte apresenta os requisitos considerados e as soluções alternativas para a estrutura de suporte e eixo vertical.

### 3 Estudo de alternativas para o eixo vertical (Z) e estrutura de suporte

O estudo de alternativas que possam suportar a mesa de posicionamento existente e o eixo vertical a dimensionar, passa pela análise e definição dos requisitos a considerar tendo em conta as características dos sistemas existentes e os objetivos de utilização do equipamento final, como meio de suporte ao estudo das tecnologias CNC ao nível dos alunos de graduação do MIEM.

Após a especificação dos requisitos de projeto são apresentadas soluções alternativas quer para o eixo vertical quer para a estrutura de suporte. As soluções apresentadas foram modeladas em *SolidWorks* de modo a permitir uma análise mais detalhada da funcionalidade global da máquina e posteriormente do seu comportamento quando solicitada por esforços estáticos e dinâmicos.

Neste capítulo serão apresentadas cinco alternativas de estruturas de suporte e cinco de sistemas de movimento lineares. Foram considerados sistemas baseados em perfis e eixos integrados da BOSCH REXROTH AG[21], por serem de fácil montagem e disponibilizando uma vasta gama de acessórios. Apesar de existirem outras soluções de outros fabricantes esta solução foi considerada por permitir uma gama alargada de soluções quer para os perfis da estrutura quer para os módulos lineares.

#### 3.1 Requisitos de dimensionamento da estrutura de suporte e eixo Z

A estrutura de suporte está naturalmente condicionada pela escolha e dimensionamento da solução para o eixo Z e pelas dimensões e massas associadas à mesa de posicionamento, já existente. Para além dessas condicionantes, deve ter em conta os seguintes aspetos:

- facilidade de montagem da estrutura no próprio laboratório;
- acessibilidade para montagem/desmontagem da peça a maquinar;
- acessibilidade para montagem/desmontagem das ferramentas;
- acessibilidade para montagem/desmontagem do conjunto do *spindle*;
- acessibilidade para remoção de aparas;
- proteção e segurança da máquina e do operador;

- possibilidade de evolução futura nas suas funcionalidades;
- possibilidade de integração com outros dispositivos (ex. robô industrial)
- sendo um dispositivo com objetivos didáticos deve permitir a visualização e análise detalhada dos componentes e sistemas utilizados.

O dimensionamento do eixo vertical envolve a definição do curso a implementar, das velocidades de avanço estabelecidas, bem como das solicitações a que irá estar sujeito durante as operações de maquinagem a executar. Tratando-se de uma máquina de 3 eixos, podemos considerar as componentes das forças resultantes no plano XY e na direção do eixo vertical (Z). Em relação aos esforços no plano horizontal podemos considerar as limitações impostas pelos equipamentos existentes, nomeadamente a capacidade máxima de força disponível nos servomotores. Por outro lado podemos determinar as condições mais desfavoráveis tendo em conta a potência/binário permitido pelo *spindle* existente. Em relação aos esforços na direção do eixo Z temos que considerar ainda o efeito do peso das massas móveis o que dependerá da solução particular escolhida. Naturalmente deve ainda ser tidos em conta os custos das soluções apresentadas tendo em vista a sua implementação futura.

### 3.1.1 Esforços resultantes da capacidade de acionamento dos servomotores X e Y

Os esforços considerados nesta subsecção resultam da capacidade de acionamento dos servomotores X e Y através do sistema de transmissão por fuso de esferas tendo em conta o seu binário disponível. Para a determinação destes esforços são desprezadas as forças de atrito referentes ao sistema de transmissão e das massas a deslocar visto que conduz a valores maiores e assim mais prejudiciais em termos de dimensionamento do eixo vertical e estrutura de suporte. Na Tabela 8 são apresentados os dados necessários para efetuar o cálculo das forças de acionamento através da equação (3.1).

Tabela 8 - Dados para o cálculo das forças de acionamento dos eixos X e Y

Dados para o cálculo das forças de acionamento dos eixos X e Y		
Binário Nominal, $M_0$	2.6	[N.m]
Passo do fuso	$5 \times 10^{-3}$	[m]
Rendimento, $\eta$	0.9	[-]

$$F = \frac{M_0 \times 2 \times \pi \times \eta}{passo} \quad [N] \quad (3.1)$$

Assim, através da equação (3.1) conclui-se que a força máxima disponível por cada eixo no plano da mesa é de 2940 N.

### 3.1.2 Estimativa da força de maquinagem

Num processo de fresagem de um dado material é necessário definir vários parâmetros como referido anteriormente (secção 1.3, página 8).

Para calcular as forças de maquinagem foi considerada a fresagem de topo 2D para avaliar os esforços resultantes da movimentação dos eixos X e Y no eixo Z. Tendo em conta as limitações do *spindle* especificou-se um material (ligas de alumínio) considerado um dos mais exigentes para o *spindle*. Como o *spindle* utiliza um porta-pinças HSK-E32 que suporta pinças ER25, foi escolhida uma ferramenta com um diâmetro de conexão igual ao diâmetro máximo (16mm) da pinça ER25. Foi seleccionada uma fresa cilíndrica [22] que possui as características apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Características da fresa

Largura de corte, ae	[mm]	21.7
Profundidade de corte máxima, ap	[mm]	1.7
Número de dentes, Z	[-]	3

A determinação dos esforços da fresagem foi feita com base em valores recomendados para parâmetros de corte [11], para ligas de alumínio e tendo em conta características da ferramenta a utilizar. Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros de maquinagem a considerar.

Tabela 10 - Parâmetros de maquinagem considerados

Tipo de fresagem	[-]	Fresagem de topo
Avanço por dente, ft	[mm/dente]	0.2032
Coefficiente de Força Específica de Corte, Kc	[N/m <sup>2</sup> ]	840 x 10 <sup>6</sup>
Velocidade de corte, vc	[m/s]	4.31

Velocidade de rotação do *spindle*:

$$n = \frac{60000 v_c}{\pi a_e} = 3797 \text{ [rpm]}$$

Velocidade de avanço:

$$f_m = n \times z \times f_t = 2314.42 \text{ [mm/min]} = 0.0386 \text{ [m/s]}$$

Taxa de remoção de material:

$$Q = f_m \times a_e \times a_p = 85379 \text{ [mm}^3\text{/min]} = 1.42 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Potência de corte:

$$P_c = K_c \times Q = 1209 \text{ [W]} = 1.21 \text{ [kW]}$$

Força de corte:

$$F_c = \frac{P_c}{v_c} = 281 \text{ [N]}$$

Binário de corte:

$$T = F_c \times \frac{a_e}{2} = 3044 \text{ [N.mm]} = 3.04 \text{ [N.m]} > 0.97 \text{ [N.m]}$$

As condições de corte acima calculadas só são possíveis com outro *spindle* pelo que é necessário ajustar os parâmetros de corte para que a operação de fresagem seja possível com o *spindle* existente. Tendo em conta as limitações de binário do *spindle* existente é calculada a força de corte em que é necessário alterar a profundidade de corte.

Força de corte:

$$F_c = \frac{T \times 1000}{\frac{a_e}{2}} = 89 \text{ [N]}$$

Com base nestas limitações da força de corte podemos ajustar os parâmetros de corte, o que vai traduzir-se numa taxa de remoção de material menor.

Potência de corte:

$$P_c = F_c \times v_c = 388 \text{ [W]} = 0.39 \text{ [kW]}$$

Taxa de remoção de material:

$$Q = \frac{P_c}{K_c} = 4.62 \times 10^{-7} \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Nestas condições a profundidade de corte deverá ser de:

$$a_p = \frac{1000 \cdot Q}{f_m \times a_e} = 0.54 \times 10^{-3} \text{ [m]} = 0.54 \text{ [mm]}$$

### 3.1.3 Esforços máximos suportados pelo acoplamento

Atualmente o *spindle* utiliza um sistema pneumático de fixação (Figura 3.1), que possibilita a troca rápida de ferramenta. Através das características do acoplamento, estimar uma força máxima que pode ser imposta ao *spindle*.



Figura 3.1 - Montagem do *spindle* ao acoplamento pneumático

Considerando o momento máximo mais restritivo que pode ser aplicado ao acoplamento pneumático, os dados dos equipamentos existentes (Tabela 11) e o esquema apresentado na Figura 3.2, que traduz a distância mínima do *spindle* à mesa (arbitrada em função do avançamento necessário para o porta-pinças e fresa), é possível estimar a força máxima que o sistema consegue suportar.

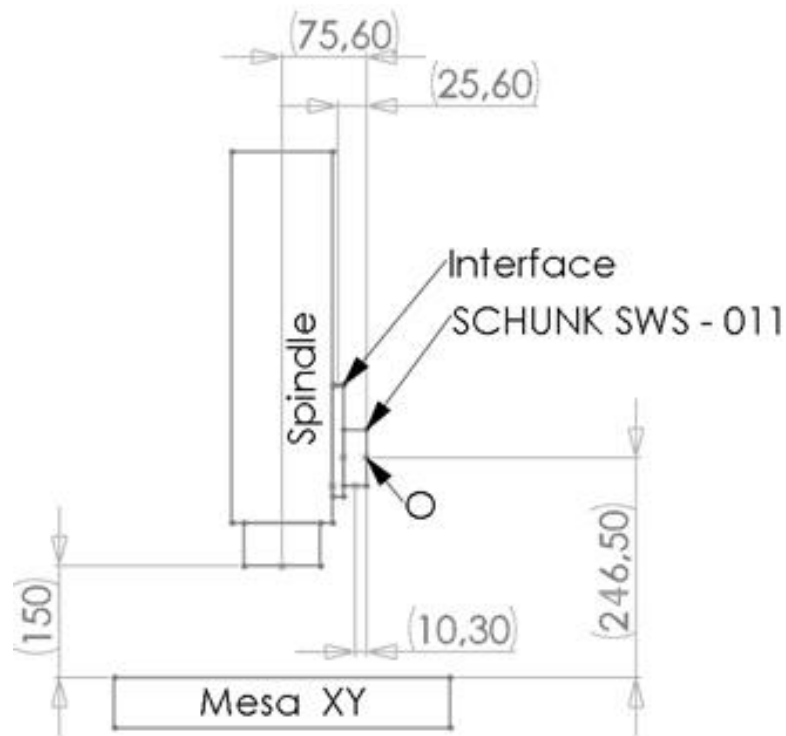


Figura 3.2 - Esquema da montagem *spindle*/acoplamento pneumático

Tabela 11 - Dados para determinação da força através do acoplamento SCHUNK - 011

Dados dos equipamentos existentes		
Massa do <i>spindle</i> e da ferramenta	[kg]	10
Massa do acoplamento SCHUNK - 011	[kg]	0.08
Massa da interface <i>spindle</i> /SCHUNK - 011	[kg]	0.155
Momento máximo do acoplamento	[N.m]	25

Assim, do equilíbrio de momentos no ponto “O”, conclui-se que a força máxima que pode ser aplicada no *spindle* no plano XY tendo em conta a restrição do acoplamento pneumático é de 71.14 N, que é um valor inferior ao obtido na estimativa dos esforços originados pelo processo de fresagem.

### 3.1.4 Síntese de requisitos de dimensionamento do eixo Z e estrutura de suporte

O curso definido para o eixo Z teve em conta uma primeira análise de possíveis soluções para implementação do eixo Z e uma definição das dimensões máximas das peças a maquinar. Foi arbitrado um curso útil para o eixo vertical de 250 mm e uma distância mínima desde a cabeça do *spindle* até à mesa de trabalho de 150 mm devido ao atravancamento necessário para o porta-piças e fresa.

Assim na Tabela 12 estão representados os requisitos identificados para o dimensionamento do eixo vertical

Tabela 12 - Requisitos para o eixo vertical

Curso útil do eixo Z	[mm]	250
Distância do <i>spindle</i> até à superfície da mesa	[mm]	150-400
Força máxima do eixo Z	[N]	2940 <sup>1</sup>
Volume de peça de trabalho máxima <sup>2</sup>	[mm]	380x380x400
Velocidade de avanço rápido	[m/min]	10
Força devido aos processos de fresagem para o <i>spindle</i> existente	[N]	89
Força máxima permitida pelo acoplamento pneumático	[N]	71
Força dos eixos da mesa de posicionamento	[N]	2940
Força devido aos processos de fresagem	[N]	281

O dimensionamento do eixo Z terá em conta estas forças de modo a verificar em que condições é possível combinar as soluções a analisar.

### 3.2 Configuração para a estrutura

As soluções típicas para máquinas-ferramenta a partir de construção em chapa quinada e soldada foram apenas consideradas numa análise preliminar, tendo sido preteridas em relação à construção a partir de perfis de alumínio normalizados devido à facilidade de montagem, flexibilidade na conjugação dos vários módulos, disponibilidade de eixos integrados em perfis e disponibilidade no mercado de várias soluções. A alternativa com base em estruturas obtidas por fundição também foi eliminada devido aos requisitos de facilidade de montagem no laboratório, disponibilidade e custos possivelmente maiores. Por outro lado pretendia-se uma estrutura leve, com capacidade para poder evoluir nas suas funcionalidades e se tratar de um equipamento para baixas potências de maquinagem.

Assim a estrutura de suporte foi concebida utilizando perfis de Alumínio EN AW – 6060 (Figura 3.3), uma liga normalmente utilizada em aplicações como camiões, canoas, automóveis, mobiliário e tubagens. O emprego destes perfis permite um menor tempo de montagem, facilidade de expansão, conversão e a reutilização dos componentes, entre outros[23].

<sup>1</sup> Força calculada para fuso com passo de 5 mm

<sup>2</sup> Sem considerar o atravancamento do porta-pinças e fresa



Figura 3.3 - Perfil Bosch Rexroth AG

Na Tabela 13 são apresentadas as principais características mecânicas destes perfis.

Tabela 13 - Características do perfil Bosch Rexroth AG [23]

Tensão de rotura	[MPa]	245
Limite de elasticidade (alongamento permanente a 0,2%)	[MPa]	195
Módulo de elasticidade	[MPa]	70000
Coefficiente de Poisson	[-]	0.34

Os requisitos para a escolha da arquitetura da estrutura de suporte foram principalmente a volumetria disponível, a proteção dos utilizadores e equipamento, e o número de componentes. Assim, em termos de volumetria a estrutura foi pensada para estar dentro de um laboratório sendo necessário ter em conta a altura máxima disponível do mesmo, permitir uma boa visibilidade dos processos durante o seu funcionamento e acessibilidade para mudança de ferramenta ou de peça/produto. A segurança dos utilizadores devido aos vários movimentos possíveis pela máquina, e segurança do próprio equipamento contra elementos estranhos ao sistema, como por exemplo a contaminação dos fusos com aparas provenientes dos processos de maquinagem, são também aspetos fundamentais a considerar.

As figuras seguintes (Figura 3.4 a Figura 3.8) apresentam diferentes estruturas idealizadas e das quais resultou a estrutura tipo para a solução final atendendo aos requisitos anteriormente apresentados. Estas estruturas foram modeladas em *SolidWorks* o que permitiu analisar a inserção dos vários módulos/componentes, bem como analisar o comportamento destas devido aos esforços estáticos calculados anteriormente.

A estrutura apresentada na Figura 3.4 disponibiliza uma boa acessibilidade e facilidade de inspeção visual durante os processos de maquinagem. Apresenta como possível desvantagem a menor rigidez da estrutura em relação a estruturas mais fechadas. Poderá também ser menos favorável à integração de soluções para a segurança da máquina e do utilizador.

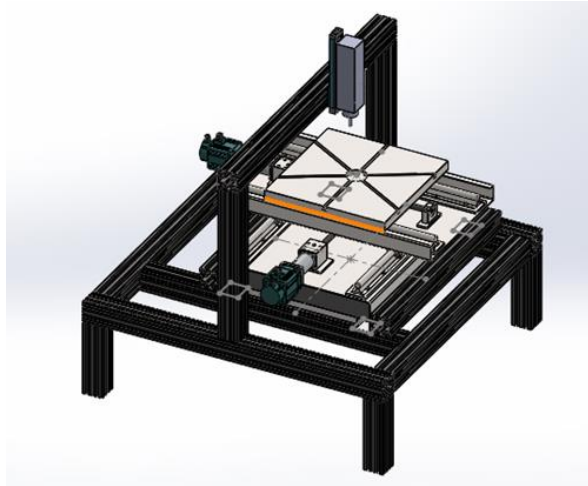


Figura 3.4 - Estrutura tipo pórtico

A Figura 3.5 apresenta uma estrutura semelhante à estrutura da Figura 3.4 mas que é reforçada na zona de apoio do eixo vertical. O reforço aplicado nesta estrutura tem o intuito de aumentar a rigidez estrutural. Continua a apresentar as mesmas vantagens e desvantagens da estrutura apresentada anteriormente (Figura 3.4).

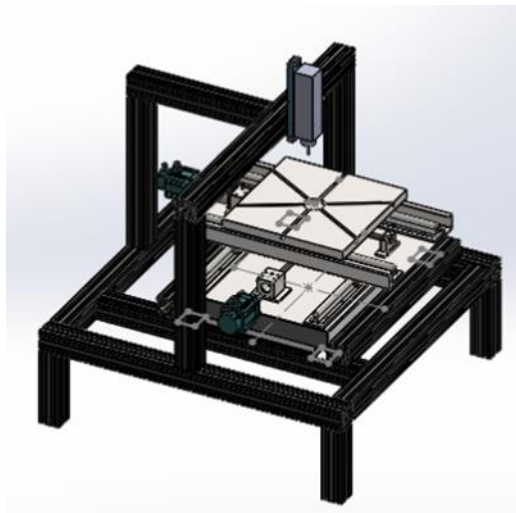


Figura 3.5 - Estrutura tipo pórtico reforçada

A estrutura da Figura 3.6 apresenta uma arquitetura semifechada que permite uma boa inspeção visual e uma boa acessibilidade. Esta estrutura continua a apresentar problemas de segurança

para o utilizador e para a máquina visto que algumas zonas de trabalho da mesa de posicionamento estão localizadas fora dos limites da estrutura, mas apresentará certamente uma maior rigidez estrutural.

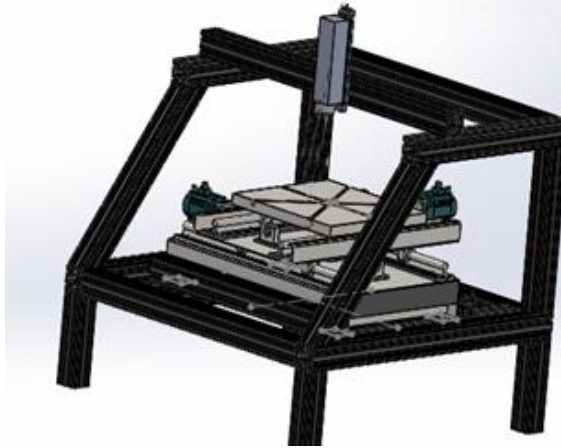


Figura 3.6 - Estrutura semifechada

A estrutura fechada (Figura 3.7) permite uma boa inspeção visual, apresenta condições melhores que as estruturas anteriores para resolver os problemas de segurança tanto para a máquina como para o utilizador visto permitir isolar completamente a zona de trabalho do meio exterior. Como desvantagem tem menor acessibilidade para a mudança de ferramenta e peça a maquinar.

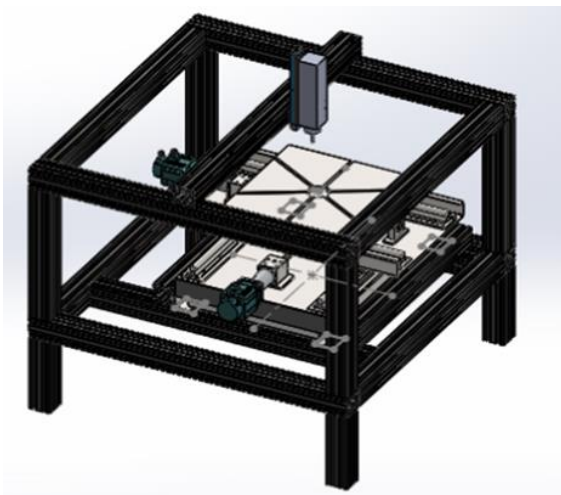


Figura 3.7 - Estrutura fechada

Na Figura 3.8 é apresentada uma estrutura semelhante à da Figura 3.7 na qual foi subtraído o perfil superior frontal permitindo assim boa acessibilidade para a mudança de ferra-

menta e peça a maquinar, boa inspeção visual durante o processo de maquinagem e mais adequada para acomodar soluções que permitem garantir uma maior segurança para a máquina e para o utilizador.

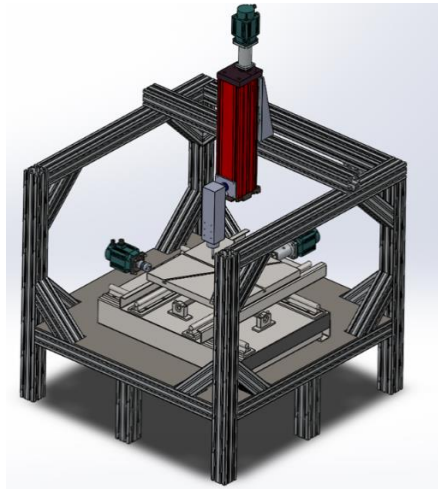


Figura 3.8 - Estrutura fechada com acessibilidade frontal

Assim a estrutura da Figura 3.8 foi considerada a que apresenta a melhor configuração sendo por isso a que será estudada mais detalhadamente.

### **3.3 Alternativas para o eixo linear vertical**

A escolha do eixo linear será feita tendo em conta os sistemas eixos lineares compactos visto que apresentam maior facilidade de montagem, não necessitam de fabricação de peças específicas para a integração dos seus elementos e apresentam mais alternativas de acessórios.

Dentro dos sistemas de movimento linear da marca BOSCH REXROTH AG[21] existe uma vasta gama de equipamentos. Os principais requisitos para a escolha do eixo linear são a exatidão, esforços máximos admissíveis e preço.

As figuras seguintes (Figura 3.9 a Figura 3.13) apresentam diferentes tipos de sistemas de movimento linear considerados dos quais será escolhido o tipo de sistema para a solução final atendendo aos requisitos anteriormente apresentados.

O sistema linear CKK (Figura 3.9) insere-se nos módulos compactos com transmissão por fuso e porcas de esferas. Estes sistemas apresentam uma repetibilidade de 0.1 mm, velocidade até 2.5 m/s, um comprimento máximo de 5500 mm e capacidade carga máxima admissível de 68550 N.



Figura 3.9 - Módulo compacto CKK

Na Figura 3.10 é apresentado o módulo OBB que é vocacionado para operações de acionamento, transporte e posicionamento e apresenta um comprimento até 5500 mm, uma capacidade de carga máxima de 79300 N, uma velocidade até 5 m/s e repetibilidade de 0,1 mm. Este módulo contém guias lineares com patins de esferas e correia dentada.

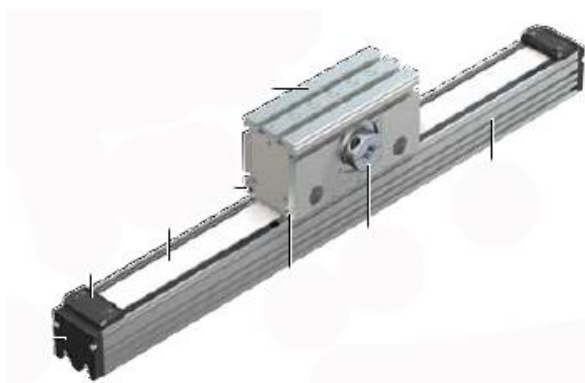


Figura 3.10 - Módulo OBB

O módulo de precisão PSK (Figura 3.11) apresenta uma repetibilidade de 0.005 mm, uma exatidão de posicionamento de 0.01mm e uma exatidão de guiamento de 0.005 mm. O PSK é construído em aço, apresenta velocidades até 1.6 m/s, capacidade de carga máxima de 17300 N e acionamento por fuso e porcas de esferas.



Figura 3.11 - Módulo PSK

O módulo TKK (Figura 3.12) é particularmente adequado como módulo para mesas lineares, com acionamento por fuso e porcas de esferas. Estes módulos apresentam um comprimento até 2869 mm capacidade de carga máxima de 180600 N, velocidades até 1,6 m/s repetibilidade de 0.005 mm exatidão de posicionamento de 0,01 mm e exatidão de guiamento de 0.007 mm.

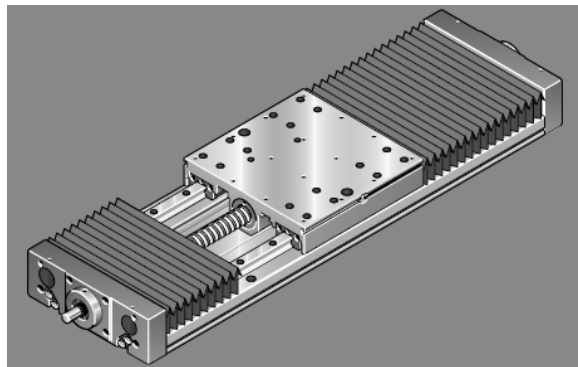


Figura 3.12 - Módulo TKK

O módulo MKK (Figura 3.13) com acionamento por fuso e porca de esferas apresenta um comprimento até 12000 mm, capacidade de carga máxima de 68100N, velocidade até 10 m/s repetibilidade de 0.005 mm, exatidão de posicionamento de 0.01 mm.

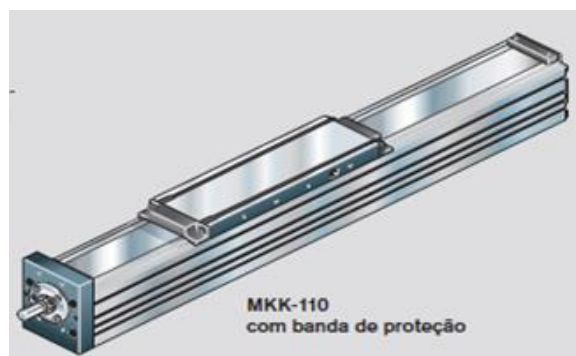


Figura 3.13 - Módulo MKK

Os módulos CKK e OBB apresentam em relação aos outros módulos, piores características de repetibilidade. O módulo PSK apesar das excelentes características apresenta uma massa e preços elevados. O módulo TKK tem um peso elevado, elevado atravancamento e só é comercializado com medidas *standard*.

O módulo MKK apresenta boas características de exatidão e repetibilidade, baixa massa, elevada capacidade de carga e boa relação qualidade preço, pelo que será o módulo escolhido.

## 4 Especificação detalhada da solução para o eixo vertical (Z)

Este capítulo tem como objetivo dimensionar o eixo vertical, a estrutura de suporte e os acessórios necessários à integração dos vários elementos. Através do manual de dimensionamento dos módulos MKK[24], o eixo vertical é configurado tendo em conta o curso útil pretendido, os esforços impostos devido à utilização do *spindle* em processos de fresagem, esforços provocados pelo acionamento dos eixos XY e as características do motor de acionamento disponível para o eixo vertical. A estrutura de suporte é modelizada usando *software* CAD, tendo sido utilizado o *SolidWorks*.

Atualmente alguns destes sistemas de CAD, para além das funções típicas que permitem construir um modelo digital num computador para suportar o projeto de uma peça ou objeto, incorporam ainda funcionalidades próprias dos *software* CAE (*Computer Aided Engineering*) que permitem analisar estática e dinamicamente os modelos criados através de métodos como por exemplo o método dos elementos finitos (*FEM-Finite Element Method*). Em alternativa podiam a este método podiam ser utilizados métodos analíticos baseados na decomposição do sistema em análise em elementos de sólidos mais simples como por exemplo, *Rigid Body Simulation-RBS* [25, 26]. A análise estática e dinâmica neste caso baseou-se na funcionalidade que o *SolidWorks* disponibiliza (*SolidWorks Simulation*), que se baseia no método dos elementos finitos. Apesar de envolver um procedimento de cálculo mais demorado na obtenção de resultados, permite obter resultados mais próximos do comportamento do sistema a implementar. Por outro lado o sistema a implementar já está numa fase de definição mais detalhada.

### 4.1 Dimensionamento do eixo linear MKK e acessórios

O eixo linear MKK foi dimensionado seguindo as diretrizes do manual de dimensionamento de módulos lineares MKK [24]. Para o dimensionamento do eixo é necessário conhecer os dados apresentados na Tabela 14, onde é possível verificar que existem dois cursos distintos a ter em conta: curso útil será o curso máximo do eixo e foi definido neste caso com mais 50

mm do que o curso de trabalho pretendido, devido a ser necessário instalar sensores de emergência que detetam os limites estabelecidos para o curso de trabalho pretendido.

Tabela 14 - Dados para dimensionamento do módulo linear do eixo vertical

Dados para dimensionamento do módulo linear		
Velocidade linear máxima	[m/min]	10
Binário de acionamento do motor	[N.m]	10.8
Curso de trabalho pretendido	[mm]	250
Curso útil total	[mm]	300

Através do binário de acionamento do motor (10.8 N.m) é possível identificar quais dos módulos lineares MKK satisfazem este requisito de transmissão de binário. Da gama disponível (MKK-040 a MKK-165) [24], só a partir dos módulos MKK-110 é que é possível satisfazer esta condição, verificando-se que esses também satisfazem a condição de velocidade linear (10 m/min). Sendo ainda possível nestes casos usar fusos de 32 mm de diâmetro e com o passo de 5 mm. No caso do módulo MKK-110, o comprimento total do módulo é obtido pela soma do curso útil total e um valor constante 450 mm, resultando num comprimento total de 750 mm. Com base neste comprimento total e nos dados dos módulos MKK-110 (Tabela 15), podem identificar-se as situações mais desfavoráveis de aplicação de forças na ferramenta, ao nível da mesa, e transmitidas ao ponto “O” de fixação do eixo (Figura 4.1). Com base na massa dos componentes apresentada na Tabela 16 calcularam-se os esforços a que o eixo pode estar sujeito e que são apresentados na Tabela 17.

Tabela 15 - Cargas máximas admissíveis do módulo linear MKK-110 [24]

Cargas máximas admissíveis do módulo linear MKK-110				
Forças [N]		Momentos [N.m]		Sistema de eixos
$F_z$ Máx	$F_y$ Máx	$M_t$ Máx ( $M_z$ Máx)	$M_L$ Máx ( $M_x$ Máx/ $M_y$ Máx)	
17300	17300	260	780	

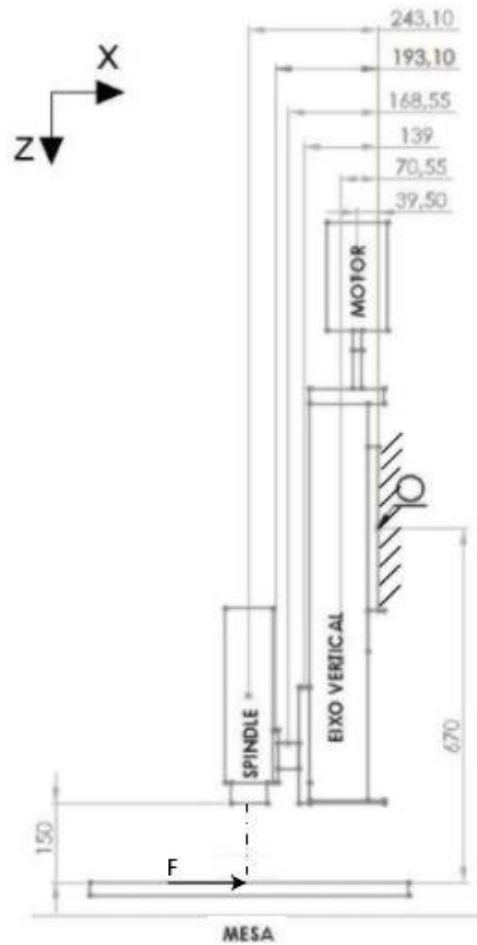


Figura 4.1 - Esquema simplificado da montagem do eixo vertical MKK110 (dimensões em mm)

Tabela 16 - Massa dos componentes do eixo vertical

Massa dos componentes do eixo vertical		
<i>Spindle</i>	[kg]	10
Interface <i>spindle</i> /SCHUNK SWS-011	[kg]	0.155
Acoplamento SCHUNK SWS-011	[kg]	0.21
Motor e luneta	[kg]	7.58
Interface <i>spindle</i> /Eixo vertical	[kg]	1.80
Eixo MKK-110	[kg]	32.1

Tabela 17 - Esforços no módulo linear MKK-110

Força	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$M_y$ [N.m]	$M_z$ [N.m]	$M_x$ [N.m]
2940 N	2940	2940	3559.4	2021.9	715.7	1822.8
280.6 N	280.6	280.6	789.2	240.1	68	188
89.4 N	89.4	89.4	598	112	21.7	59.9
71.1 N	71.1	71.1	579.7	99.7	17.2	47.6

Comparando as cargas máximas admissíveis com as solicitações calculadas, verifica-se que o módulo MKK-110 não pode ser usado para solicitações correspondentes à força máxima exercida pelos eixos da mesa (2940 N), uma vez que são ultrapassados os valores correspondentes aos momentos ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ). Por esta razão considerou-se a possibilidade de utilizar o módulo seguinte (MKK-165).

Adaptando o procedimento e dados anteriores para o caso do módulo MKK-165, determinou-se o comprimento total de 801 mm<sup>(1)</sup> e fuso com 40 mm de diâmetro e 5 mm de passo. As cargas máximas admissíveis para este módulo apresentam-se na Tabela 18. Os esforços calculados a partir do esquema da Figura 4.2 são:

- $M_x = 1984.0$  N.m;                       $M_y = 2069.7$  N.m;                       $M_z = 909.8$  N.m;
- $F_x = 2940$  N;                               $F_y = 2940$  N;                               $F_z = 3559.4$  N

Tabela 18 - Cargas máximas admissíveis do módulo linear MKK-165

Forças		Momentos	
$F_z$ max	$F_y$ max	$M_t$ max	$M_l$ max
34100	34100	723	2085

<sup>1</sup> Com proteção sanfonada:  $L = (\text{curso útil total}) \times 1,17 + 450$  [mm]

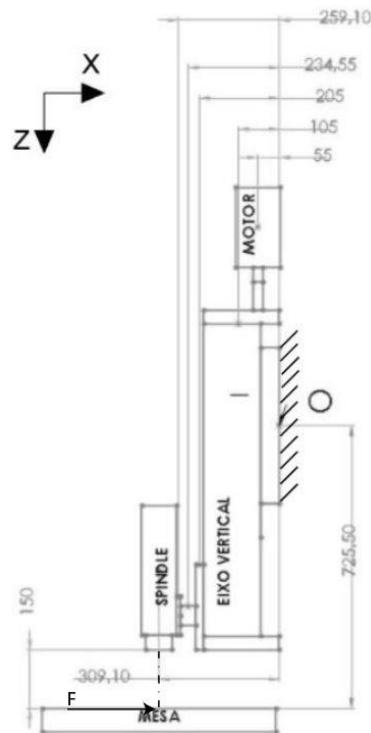


Figura 4.2 - Esquema simplificado da montagem do eixo vertical MKK165 (dimensões em mm)

Verifica-se assim que este módulo cumpre os requisitos de carga (forças e momentos) devidas às quatro forças consideradas (Tabela 17).

#### 4.1.1 Projeto mecânico de fixação/suporte do motor e do acoplamento entre veios

Com vista a obter uma solução de acoplamento que possua uma transmissão de binário sem folga (backlash), elevada rigidez torsional, capacidade de absorção de desalinhamentos inerentes à construção e montagem dos componentes, foi considerada uma solução com base num acoplamento flexível de fole [15].

Os dados necessários para a escolha do acoplamento flexível são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Dados para seleção de acoplamento flexível

Diâmetro do fuso do motor	[mm]	19
Diâmetro do fuso do eixo linear MKK-165	[mm]	25
Velocidade de rotação máxima	[rpm]	4000
Binário máximo	[N.m]	10.8

Com base nos requisitos foi escolhido o modelo (Figura 4.3) da marca RULAND[27], com cubos em alumínio e fole em aço inoxidável. A sua fixação ao veio é conseguida por aperto de uma abraçadeira ou chaveta de cada lado do acoplamento. Algumas características deste acoplamento encontram-se listadas na Tabela 20.



Figura 4.3 - Acoplamento de fole MBCK51-25-19-A

Tabela 20 - Principais características do acoplamento de fole

Ruland: MBCK51-25-19-A		
Binário nominal	[Nm]	45.2
Massa	[kg]	0.20
Rigidez à torção	[Nm/rad]	108
Máximo desalinhamento axial	± [mm]	0.5
Máximo desalinhamento lateral	± [mm]	0.25
Máximo desalinhamento angular	± [°]	2

Após a escolha do acoplamento flexível foi possível projetar o componente para fixar o motor ao eixo e consequentemente alojar o acoplamento flexível visto que já se conhece o atravancamento necessário. O meio de montagem tem de apresentar flanges compatíveis com as flanges dos dois equipamentos e uma ligação oca entre estas para acomodar os veios e o acoplamento flexível, sendo normalmente designado de luneta.

A flange do motor corresponde à flange FF115, segundo a norma IEC 600072-1:1991 [28] e a flange do eixo linear é especificada pelo fabricante do módulo linear. Deste modo projetou-se uma luneta (ANEXO C) com base nas seguintes especificações:

- Maquinação a partir de um bloco de Alumínio da série AW7075-T651;
- Comprimento suficiente para garantir a ligação entre o fuso do eixo vertical e o eixo do motor tendo em conta as dimensões do acoplamento flexível;

- Flanges de montagem compatíveis com os equipamentos existentes;
- Diâmetro interior capaz de acomodar a solução de acoplamento;
- Acessibilidade aos parafusos de fixação do acoplamento.

O projeto da luneta foi baseado na utilização do *SolidWorks* (Figura 4.4) o que permitiu juntamente com os dados do material utilizado (Tabela 21) e dos dados do motor (6.1 kg), proceder a uma análise estática do seu comportamento (Figura 4.5).

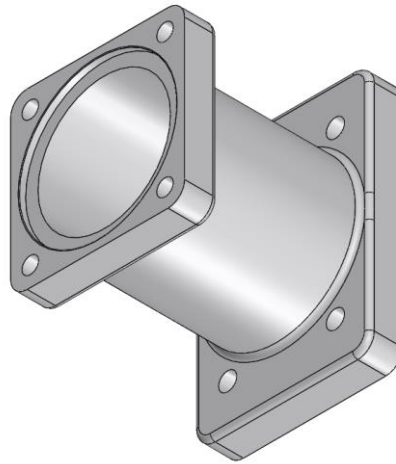


Figura 4.4 - Modelo CAD da luneta

Tabela 21 - Características da liga de alumínio AW7075-T651<sup>1</sup>

Tensão de cedência	[MPa]	455
Tensão de rotura	[MPa]	525
Módulo de elasticidade	[GPa]	72
Densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]	2830
Preço	[€/kg]	6.00

<sup>1</sup> Dados retirados de 29. *KMS - Comércio de materiais técnicos. Brochura Web. URL: <http://www.kms.com.pt/images/KMS%20-%20Brochura%20-%20Web.pdf>.*

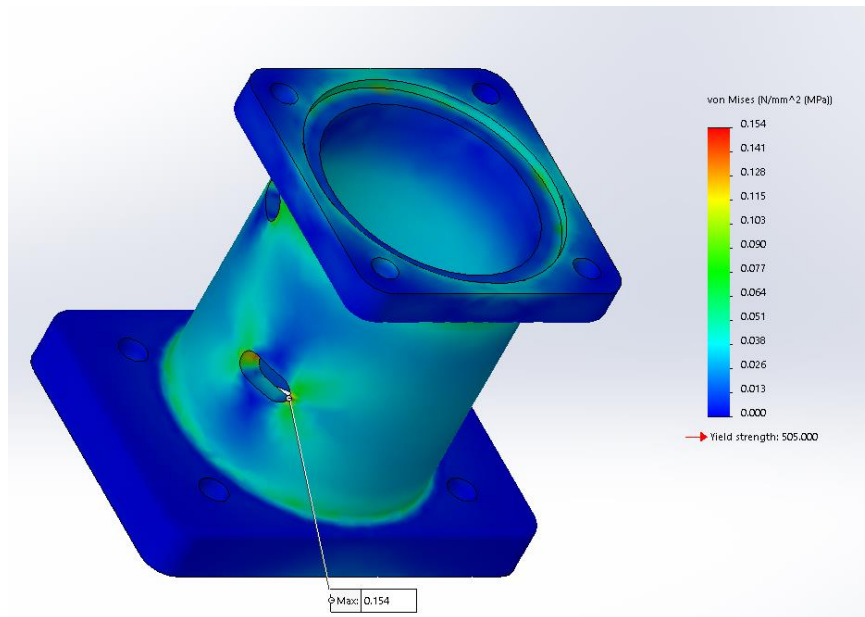


Figura 4.5 - Distribuição de tensões na luneta

Verificando-se que a distribuição de tensões e deformações estão dentro dos limites de utilização da luneta.

#### 4.1.2 Projeto mecânico da interface de fixação do acoplamento pneumático ao eixo

Com o objetivo de fixar o macho do acoplamento pneumático, SCHUNK SWS-011, ao módulo linear MKK foi projetada uma interface (Figura 4.6) que cumprisse os requisitos de rigidez estrutural, tendo em conta as dimensões dos dois componentes, que permitisse uma fácil calibração, e que garantisse o alinhamento entre a cabeça do *spindle* e o extremo inferior do módulo linear MKK-165.

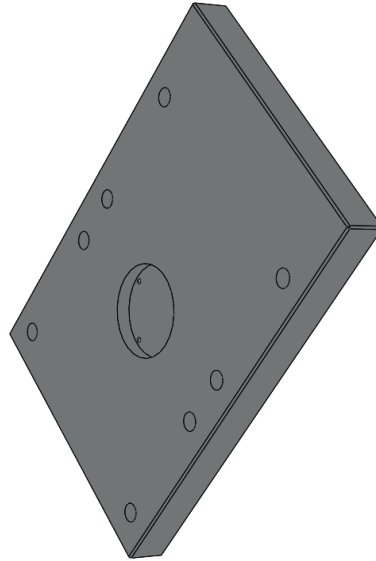


Figura 4.6 - Interface entre acoplamento pneumático e eixo MKK-165

Para o dimensionamento desta interface foram considerados o binário máximo do *spindle* e os esforços devido ao processo de fresagem modelizadas como se estivessem aplicadas na extremidade de uma fresa a 150 mm da cabeça do *spindle*, como se pode visualizar na Figura 4.7, correspondentes ao valor da força máxima exercida durante os processos de maquinagem e as características do acoplamento pneumático. O material escolhido para este componente foi igualmente a liga de alumínio AW7075-T651.

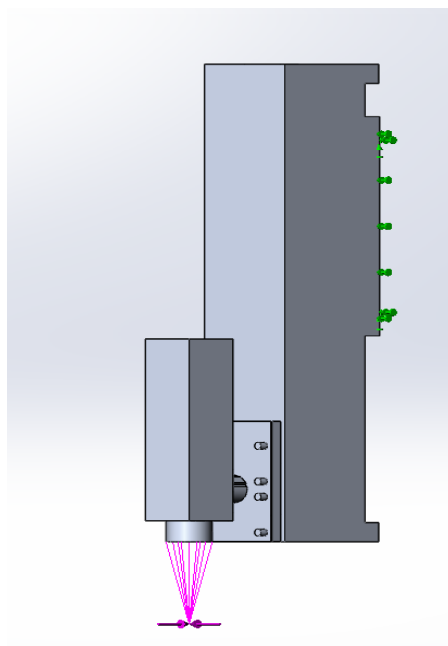


Figura 4.7 - Aplicação dos esforços

Todos os componentes exceto a interface em estudo foram considerados rígidos para assim se obterem resultados correspondentes ao caso em que todas as todas solicitações são absorvidas só pela peça. Como esperado a tensão equivalente máxima é atingida na reentrância que suporta o acoplamento pneumático SCHUNK SWS - 011 devido à concentração de tensões que aí ocorre. Verifica-se que a tensão equivalente máxima é de 3.218 MPa (Figura 4.8), um valor desprezável quando comparado com a tensão de cedência do material.

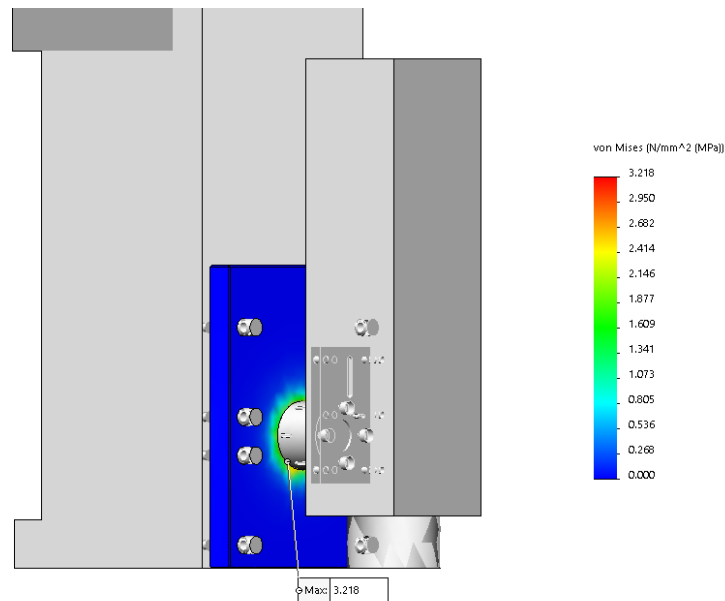


Figura 4.8 - Distribuição de tensões na interface acoplamento/eixo

#### 4.2 Estrutura de suporte do eixo vertical e da mesa de posicionamento

Considerando como base a estrutura escolhida (Figura 3.8, página 35), os cursos e atravancamento da mesa de posicionamento XY, o módulo linear MKK-165 e a distância mínima (150 mm) entre o *spindle* e a mesa de posicionamento XY, o modelo representado na Figura 4.9 apresenta a solução desenvolvida.

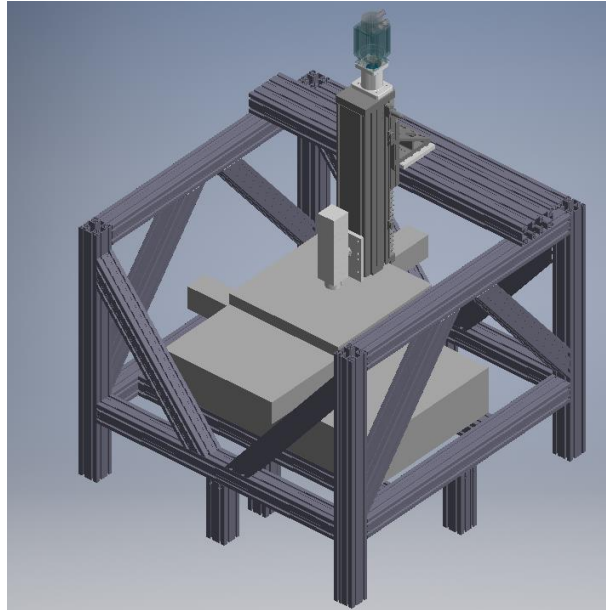


Figura 4.9 - Estrutura de suporte do módulo linear e da mesa de posicionamento XY

Nesta estrutura foram utilizados dois tipos de perfil técnico BOSCH REXROTH AG (Figura 4.10) e três tipos de acessórios para a sua união (Figura 4.12). Apesar de serem disponibilizados os modelos de CAD de cada um destes componentes, foram utilizados perfis com secções mais simples (Figura 4.11) de modo a facilitar a análise estática e dinâmica. A simplificação baseou-se em manter características equivalentes às dos perfis reais em termos de massa e momentos de inércia (Tabela 22 a Tabela 24).

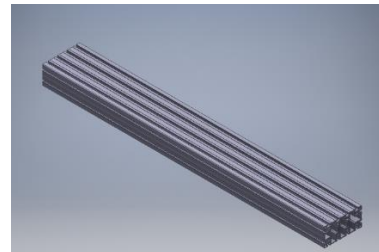
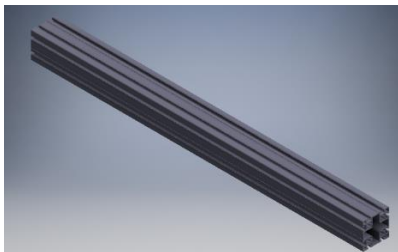


Figura 4.10 - Perfil técnico

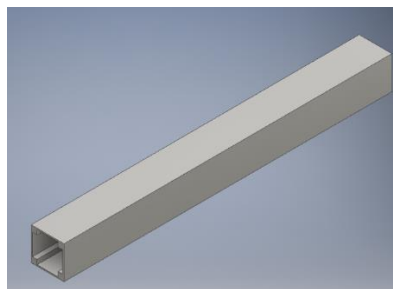


Figura 4.11 - Perfil simplificado

Através da análise estática foi possível confirmar que também os esforços nos acessórios eram inferiores aos esforços máximos permitidos (Tabela 23).

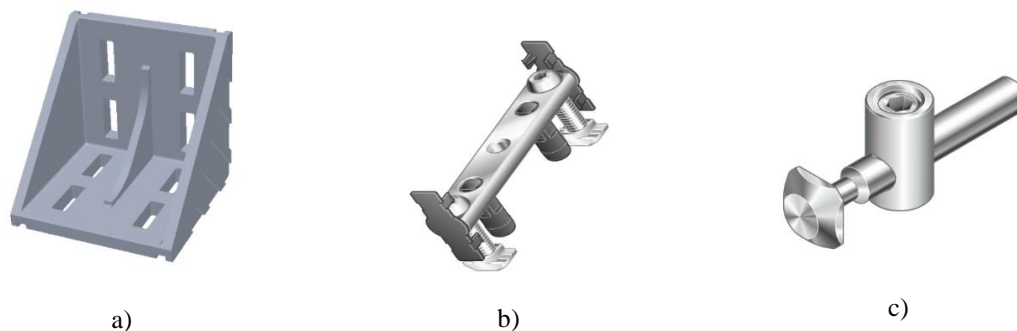


Figura 4.12 - Acessórios para união de perfis técnicos

Tabela 22 - Características dos perfis técnicos

Característica	Unidades	Perfil 100x100	Perfil 100x200
Material	[-]	Alumínio	Alumínio
Secção transversal	[mm]	100x100	100x200
Área	[cm <sup>2</sup> ]	29.9	54.0
Momento de inércia de área, I <sub>x</sub>	[cm <sup>4</sup> ]	318.3	2133.1
Momento de inércia de área, I <sub>y</sub>	[cm <sup>4</sup> ]	318.3	602.1
Massa por unidade de comprimento	[Kg/m]	8.1	14.6
Comprimento máximo	[mm]	6000	6000

Tabela 23 - Características dos acessórios para ligação dos perfis

Característica	Unidades	Bracket 100x100	Bolt conector D17x100	Conexão rápida angular
Material	[-]	Alumínio	Aço galvanizado	Aço
Mom. Torsor máx.	[N.m]	480	480	[-]
Momento fletor máx.	[N.m]	1100	1000	180
Força máx.	[N]	15000	5000	1500

Tabela 24 - Características dos perfis simplificados

Característica	Unidades	Perfil 100x100	Perfil 100x200
Material	[-]	Alumínio	Alumínio
Secção transversal	[mm]	100x100	100x200
Área	[cm <sup>2</sup> ]	23.7	42.8
Momento de inercia de área, I <sub>x</sub>	[cm <sup>4</sup> ]	303.9	2056.1
Momento de inercia de área, I <sub>y</sub>	[cm <sup>4</sup> ]	607.83	581.9
Massa	[Kg/m]	8.1	14.6

#### 4.2.1 Fixação do módulo linear e da mesa de posicionamento à estrutura de suporte

##### Fixação do Módulo MKK-165 à estrutura de suporte

A fixação do módulo linear MKK-165 à estrutura foi feita utilizando um esquadro (Figura 4.13) para ligações perpendiculares entre módulos do mesmo tipo, disponível no catálogo do fabricante.

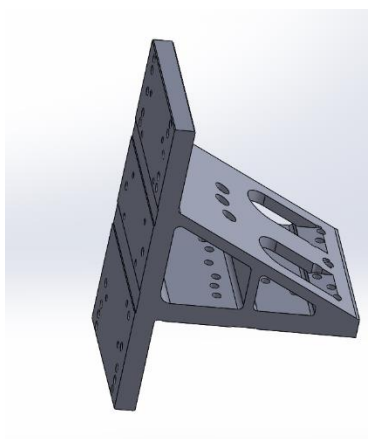


Figura 4.13 - Esquadro módulo linear MKK

Como este esquadro é indicado para ligar módulos lineares do mesmo tipo não contém furação adequada para a ligação do módulo à estrutura, existindo assim a necessidade de projetar uma interface (Figura 4.14 e Anexo C) para a ligação deste esquadro com a estrutura de suporte. A ligação do esquadro aos diferentes componentes é realizada com parafusos fornecidos na compra do mesmo. Para a ligação da interface ao perfil técnico são usadas ligações “*Profile conector*” (Figura 4.15), também disponíveis no catálogo do fabricante.

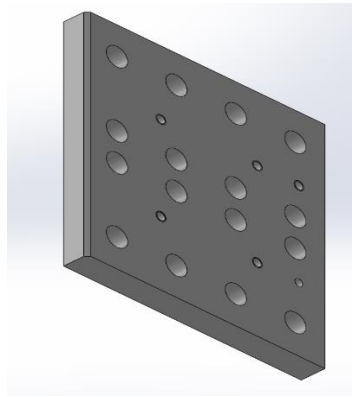


Figura 4.14 - Interface entre Esquadro e estrutura de suporte

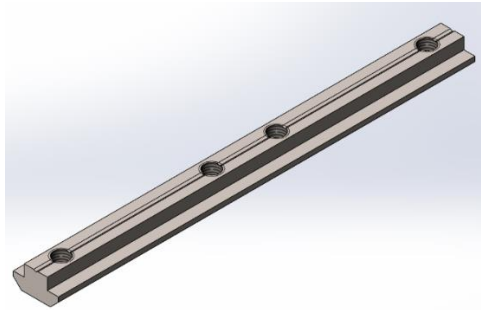


Figura 4.15 - Ligação "Profile connector"

Para o dimensionamento desta interface foram considerados as cargas máximas que a mesa de posicionamento pode exercer sobre o eixo, como se mostra na Figura 4.16. O material escolhido para este componente é também a liga de alumínio AW7075-T651.

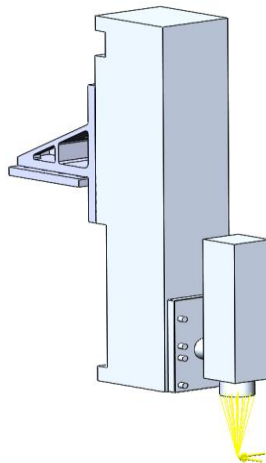


Figura 4.16 - Aplicação dos esforços na interface do esquadro

Na análise efetuada todos os componentes, exceto a interface em estudo, foram considerados rígidos.

Como expectável a tensão equivalente máxima é atingida na furação que serve para fixar a interface ao perfil devido à concentração de tensões que aí ocorre. Verifica-se que a

tensão equivalente máxima é de 0.047 MPa (Figura 4.17), um valor desprezável quando comparado com a tensão de cedência do material

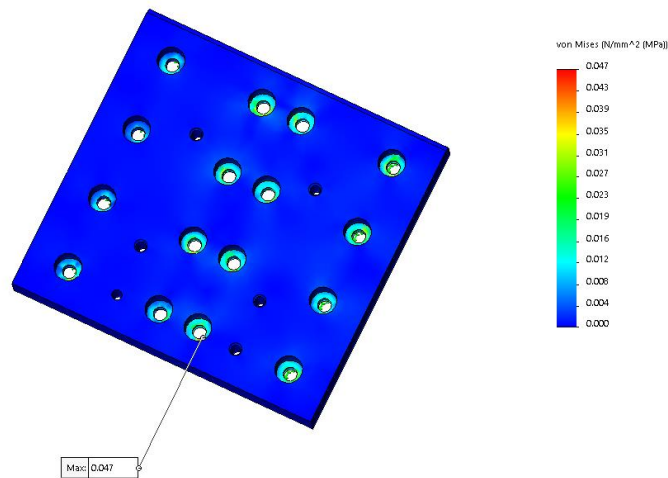


Figura 4.17 - Distribuição de tensões na Interface Esquadro/Estrutura

Estes componentes podem ser visualizados no desenho de conjunto “*Montagem de porta cabos*”, Anexo C.

### **Fixação da mesa de posicionamento XY à estrutura de suporte**

Estando grande parte da base da mesa de posicionamento preenchida com betão polimérico, a sua fixação à estrutura de suporte está delimitada às quatro extremidades da mesma (Figura 4.18). Estas extremidades contêm um espaço oco com cerca de 80 mm de profundidade.

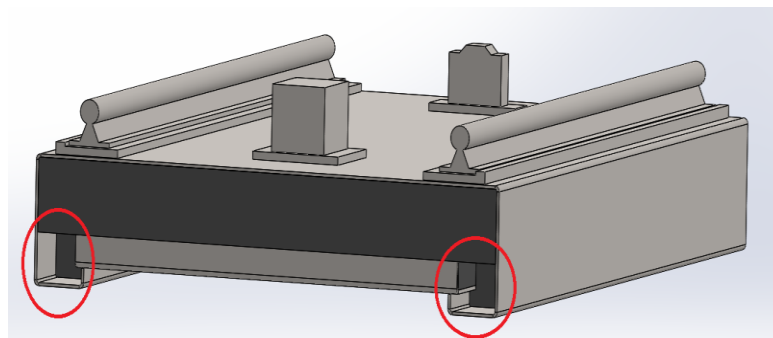


Figura 4.18 - Extremidades da mesa de posicionamento

Visto que a mesa estará apoiada sobre perfis técnicos optou-se pela sua fixação através de cantoneiras de dimensões 120x120x12 mm (Figura 4.19), de parafusos de cabeça hexagonal (ISO 4017 M16x45) – 8.8 e porcas hexagonais (ISO 4032-M16-8). Para a fixação das cantoneiras ao perfil técnico serão usadas ligações “Profile conector”. As cantoneiras escolhidas correspondem a aço estrutural S275JR, cujas características são apresentadas na Tabela 25 e são capazes de satisfazer as cargas máximas que a mesa pode exercer (Figura 4.20).

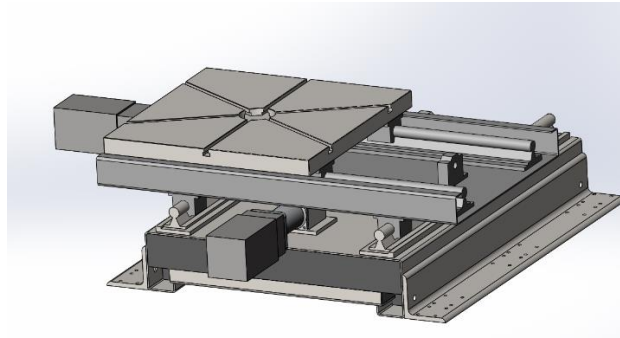


Figura 4.19 - Aplicação das cantoneiras para a fixação da mesa

Tabela 25 - Características do aço estrutural S275JR

Tensão de cedência	[MPa]	275
Tensão de rotura	[MPa]	410
Coefficiente de Poisson	[-]	0.2
Densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]	7800

A tensão equivalente máxima é de 9.15 MPa (Figura 4.20), um valor baixo quando comparado com a tensão de cedência do material.

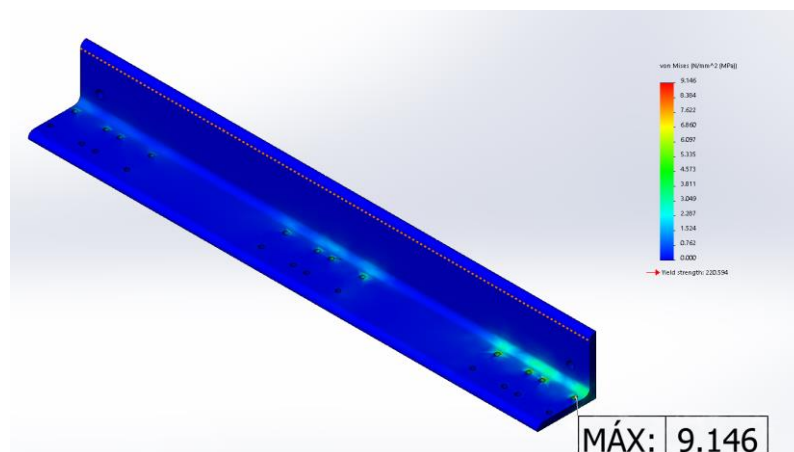


Figura 4.20 - Distribuição de tensões na cantoneira

### 4.3 Análise estática

A análise estática teve como objetivo conhecer os valores máximos das tensões na estrutura e dos deslocamentos impostos por estas cargas na cabeça do *spindle* uma vez que determinaram a qualidade final das peças maquinadas pela máquina.

Nesta análise o programa calcula as tensões e deformações nas diferentes direções incluindo o valor da tensão de *Von Mises* que pode ser comparada com o valor da tensão de cedência do material e deste modo se verificar se o componente está em colapso quando sujeito a uma determinada solicitação.

Foram considerados todos os corpos como infinitamente rígidos, exceto a estrutura, para avaliar o comportamento desta numa situação mais desfavorável de solicitação e não existir dissipação de energia pelos diferentes componentes constituintes da máquina.

Numa primeira análise foram consideradas como referência as forças provenientes dos processos de maquinagem ( $F_x=F_y=100\text{ N}$ ). Considerando a estrutura fixa pelos pés e o eixo vertical posicionado o mais próximo possível da mesa de posicionamento, visto que simula um processo de corte na máxima distância entre a aplicação das forças e o ponto de onde os esforços são transmitidos à estrutura (Figura 4.21). O sentido das forças foi escolhido de forma a não ser compensado pelos pesos das massas móveis do eixo vertical.

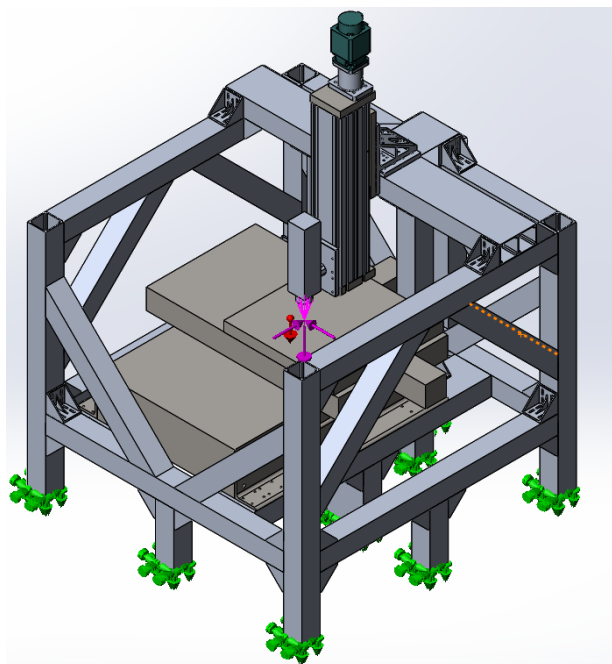


Figura 4.21 - Aplicação das forças e fixação da estrutura

Nesta análise obtiveram-se valores da tensão equivalente máxima de 4.66 MPa (Figura 4.22) e deslocamentos de 0.054 mm na cabeça do *spindle* (Figura 4.23).

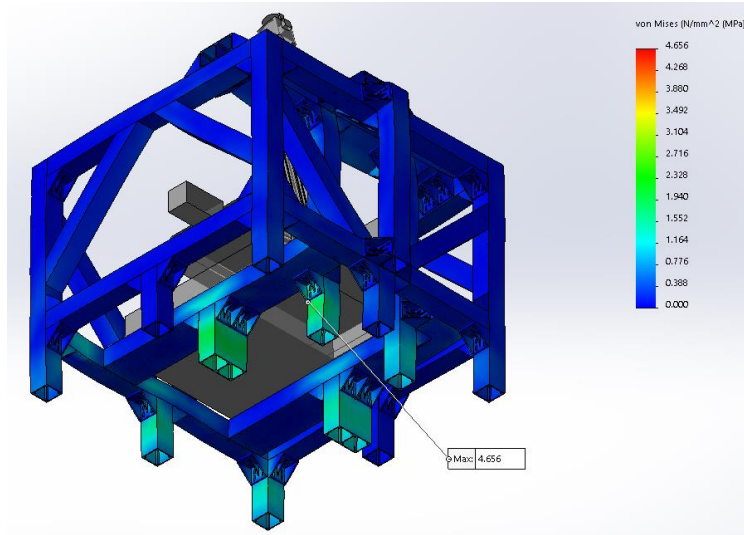


Figura 4.22 - Distribuição de tensões na estrutura para solicitações de maquinagem

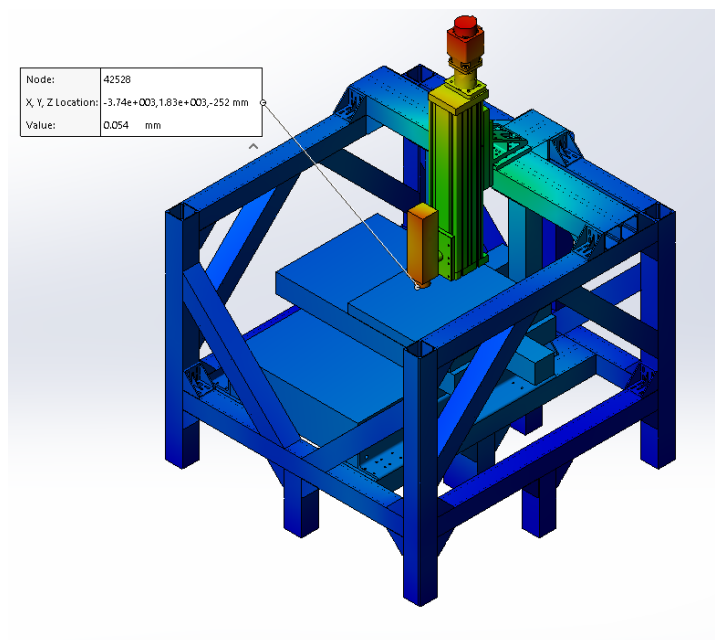


Figura 4.23 - Deslocamento da cabeça do *Spindle*

Na segunda análise foram consideradas as forças máximas geradas pela mesa. Apesar de não ser possível aplicar estes esforços ao *spindle* existente, a realização deste estudo tem o intuito de averiguar, caso o *spindle* seja substituído por um com maior capacidade de corte, se a estrutura estará dimensionada para resistir às solicitações máximas geradas pela mesa.

Verifica-se que através desta análise a tensão equivalente máxima toma um valor de 16.2MPa (Figura 4.24) e um deslocamento na extremidade inferior do módulo MKK-165 de 0.209 mm (Figura 4.25).

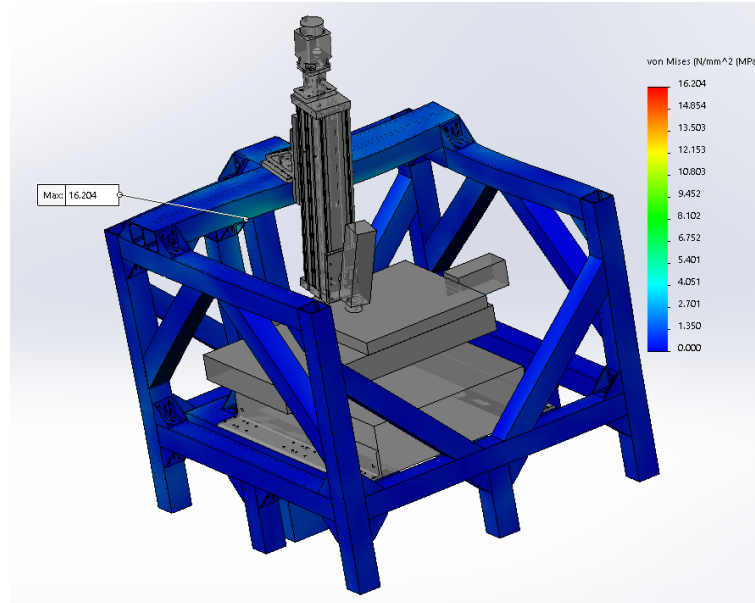


Figura 4.24 - Distribuição de tensões na estrutura para solicitações da mesa de posicionamento

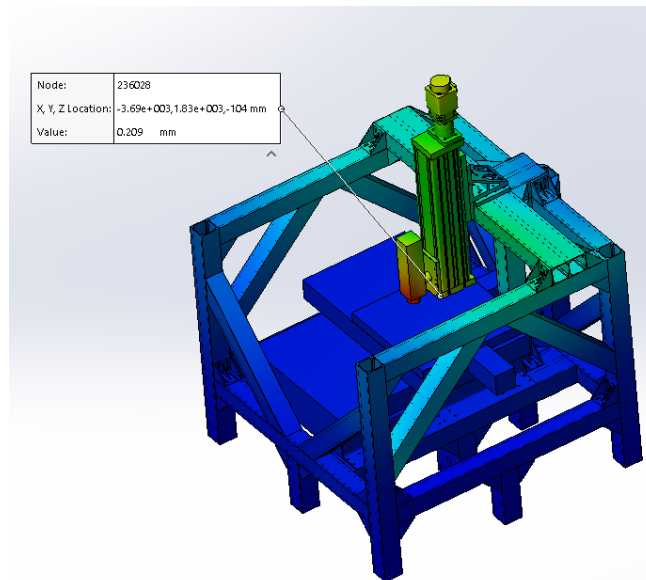


Figura 4.25 - Deslocamento na parte inferior do MKK 165

Através das duas análises estáticas realizadas verifica-se que ao nível da tensão equivalente máxima a estrutura não apresenta qualquer tipo de problema visto que o valor máximo de tensão equivalente se encontra muito abaixo do valor de cedência do material da estrutura. Os resultados obtidos em termos de deslocamentos no pior dos casos (0.2 mm) está longe do comportamento esperado em máquinas de alta exatidão, no entanto estes valores correspondem a

solicitações extremas. Por outro lado, os deslocamentos obtidos com a solicitação de força de maquinagem mais baixa (100 N) será mais realista dadas as aplicações em vista. Neste caso o deslocamento de 0,05 mm já se pode considerar dentro dos valores para máquinas deste tipo de utilização corrente [30].

#### 4.4 Análise dinâmica

O objetivo da análise dinâmica foi conhecer o comportamento da estrutura tendo em consideração as várias velocidades de funcionamento dos equipamentos, as solicitações dinâmicas resultantes do processo de fresagem, movimentos da mesa de posicionamento e do eixo vertical. Convertendo para frequência de funcionamento dos diversos componentes da máquina são apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26 - Frequências de funcionamento dos vários componentes da máquina

Equipamento	Frequência máxima [Hz]	Frequência de funcionamento [Hz]
Motores FXM31	67	0-33
<i>Spindle</i> PDS XLC-070	666	0-333
Fresa com 2 dentes e n=3797 rpm	[-]	127
Fresa com 3 dentes e n=3797 rpm	[-]	190

#### **Estudo dos modos naturais de vibração da estrutura**

Os modos de vibração da máquina, caracterizados pelas várias frequências naturais e pelos vetores modais, foram obtidos utilizando a funcionalidade do SolidWorksSimulation e são apresentados na Tabela 27. Verifica-se que a estrutura apresenta valores baixos pelo que é necessário prever velocidades de funcionamento durante os processos de fresagem que não coincidam com os modos naturais de vibração.

Tabela 27 - Modos naturais de vibração da Estrutura

Modo de vibração n°	Unidades	Valor
1	[Hz]	66.5
2	[Hz]	70
3	[Hz]	78.3
4	[Hz]	88.7
5	[Hz]	113.1
6	[Hz]	130.4
7	[Hz]	148.7
8	[Hz]	169.2
9	[Hz]	196.3

Estes valores foram obtidos após alterações na estrutura adicionando quatro perfis na estrutura base de modo a elevar o valor do primeiro modo de vibração de 31Hz para 66.5 Hz, permitindo assim que os três eixos de movimento não tenham qualquer restrição de velocidade de funcionamento. A forma de vibração da frequência fundamental de vibração é apresentada na Figura 4.27.

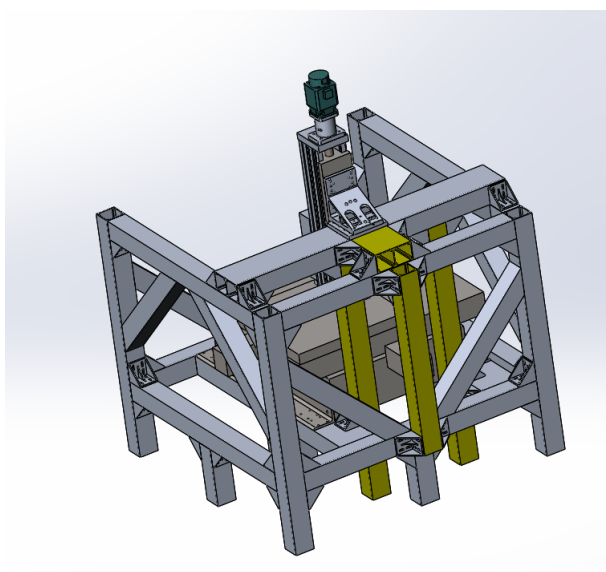


Figura 4.26 - Adição de quatro perfis à estrutura de base

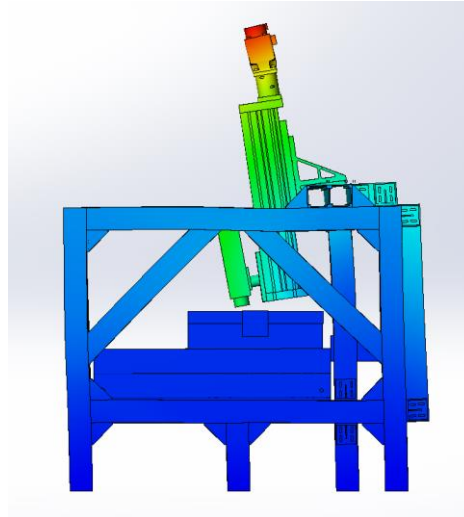


Figura 4.27 - Forma do primeiro modo de vibração

### **Análise das solicitações dinâmicas provenientes do processo de maquinagem**

A realização de uma análise estática assume que as solicitações são constantes ou aplicadas de forma muito lenta até atingirem o valor máximo. Assim as análises estáticas não têm em consideração as forças inerciais e de amortecimento. No processo de maquinagem as solicitações dinâmicas estão sempre presentes, em particular na fresagem devido à utilização de múltiplas arestas de corte.

Na análise dinâmica desta estrutura foram consideradas as solicitações provenientes dos processos de maquinagem (amplitude da força máxima igual a 100N) com a frequência de 190 Hz, correspondente à frequência com que um dente da fresa contacta o material durante um processo de maquinagem. Através do gráfico da Figura 4.28 verifica-se que a amplitude máxima do deslocamento da cabeça do *spindle* tem o valor de 0.26 mm e é obtido à frequência de 169.2 Hz, correspondente ao oitavo modo de vibração da estrutura.

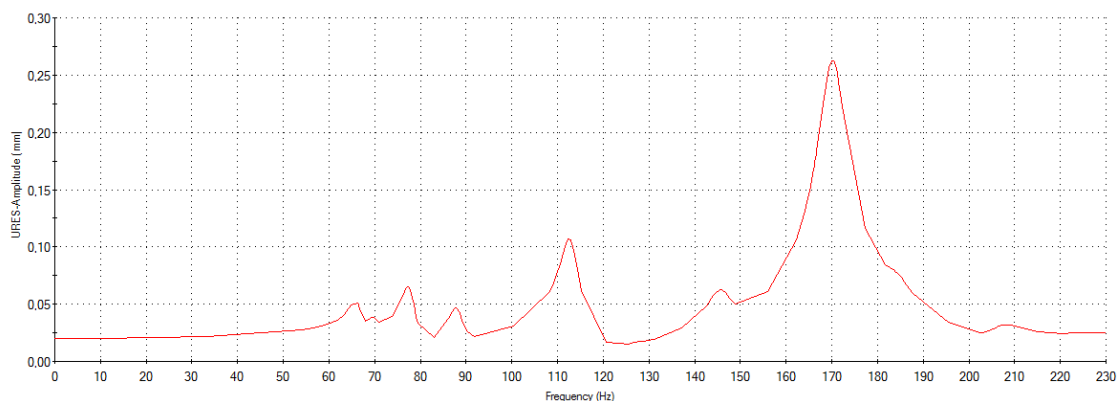


Figura 4.28 - Gráfico amplitude-frequência

No gráfico da Figura 4.29 verifica-se que o valor da tensão equivalente máxima toma um valor de 57.8 MPa, sendo a sua aplicação no mesmo local em que ocorre a tensão equivalente máxima na análise estática e é obtida à frequência de 169.2 Hz, correspondente ao oitavo modo de vibração. Na Figura 4.30 é apresentada a forma de vibração do oitavo modo de vibração da estrutura.

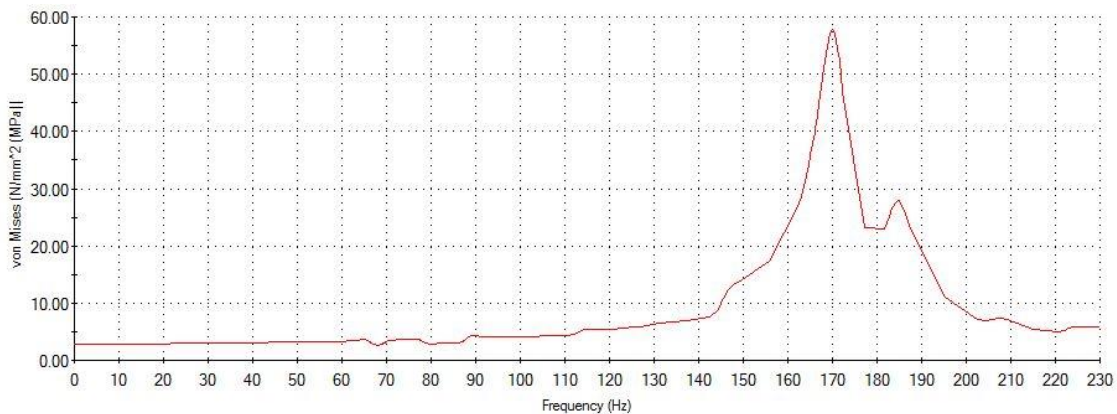


Figura 4.29 - Gráfico tensão equivalente máxima-frequência

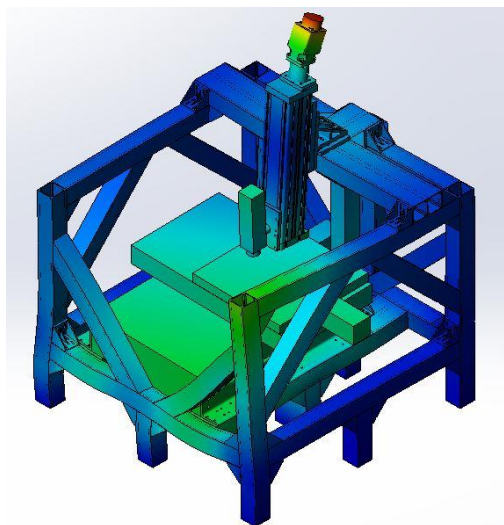


Figura 4.30 - Forma de vibração do oitavo modo de vibração

Os resultados obtidos com a análise dinâmica, tendo em conta a aplicação da força de maquinagem de 100 N permite concluir que em casos extremos de solicitações da força de maquinagem com frequências próximas da frequência de ressonância será inferior a 0,3 mm. Este valor já se pode considerar um valor excessivo tendo em conta os valores típicos [30] para este tipo de máquinas, no entanto são valores que só ocorreram em situações de ressonância. Fora destes valores conseguem-se resultados que se podem considerar mais próximos dos valores típicos. Quando a máquina for implementada, possivelmente os valores de frequência de

ressonância não corresponderão aos valores desta simulação, no entanto é de esperar que o comportamento em termos de deslocamentos não seja muito diferente.

#### 4.5 Apresentação da estrutura de suporte detalhada

Nas Figura 4.31 e Figura 4.32 é apresentada a estrutura final que contempla um portacabos para as ligações provenientes do eixo vertical e pés ajustáveis ligados aos perfis através de uma interface própria. Os pés ajustáveis permitem um ajuste de 62 mm e as interfaces permitem suportar até 20000 N. As características gerais da máquina são apresentadas na Tabela 28.

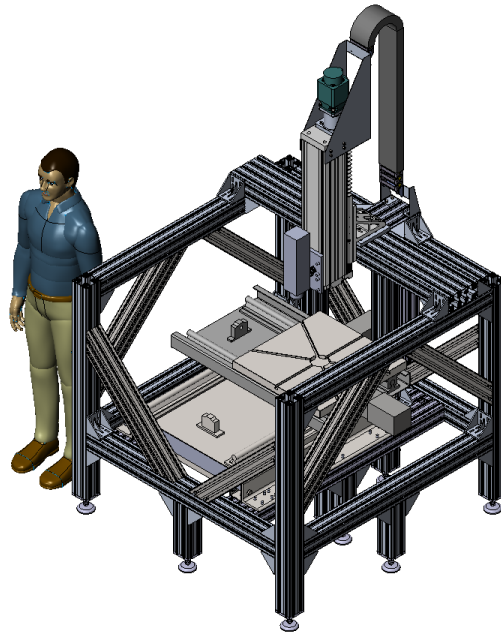


Figura 4.31 - Estrutura final

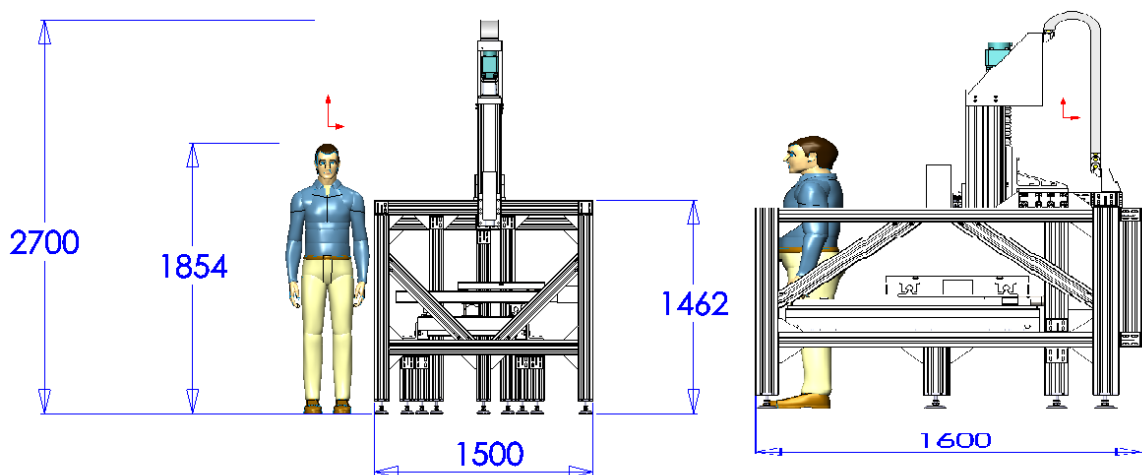


Figura 4.32 - Dimensões gerais da estrutura

Tabela 28 - Características gerais da máquina

Dimensões	[mm <sup>3</sup> ]	1500x1600x2700
Massa	[kg]	1331
Curso X	[mm]	380
Curso Y	[mm]	380
Curso Z	[mm]	250
Distância da cabeça do <i>spindle</i> à mesa	[mm]	150-400
Velocidade máx. X	[m/min]	10
Velocidade máx. Y	[m/min]	10
Velocidade máx. Z	[m/min]	10



## 5 Conclusões e perspetivas de trabalho futuro

Nesta dissertação foi efetuado o estudo de concepção de um eixo vertical e estrutura de suporte para uma mesa de posicionamento CNC existente. A solução encontrada vai de encontro aos requisitos de facilidade de instalação e montagem, de utilização para fins académicos e de investigação, bem como de requisitos de funcionamento.

A solução baseada em perfis técnicos e eixos integrados foi modelada num *software* de CAD (SolidWorks), com base nos desenhos reais de componentes disponíveis no mercado e também dos componentes do sistema existente, o que permite validar a sua implementação. Foi ainda elaborada uma lista dos componentes e materiais a adquirir, juntamente com o respetivo orçamento de aproximadamente onze mil euros.

A estrutura proposta permite uma visibilidade e acesso a todos os elementos do equipamento final, cumprindo os objetivos académicos em que se insere este equipamento. Permite uma boa acessibilidade para a mudança de ferramenta e peça a maquina, boa inspeção visual durante o processo de maquina e é adequada para acomodar soluções que garantam uma maior segurança para a máquina e para o utilizador. Permite ainda a sua evolução ou adaptação futura tendo em conta aumentar o nível de automatização da máquina.

A análise estática e dinâmica efetuada permite concluir que a solução proposta é capaz de satisfazer os requisitos de funcionamento em termos de exatidão típicos destes equipamentos.

Em relação a possibilidade de realização de trabalhos futuros sugerem-se os seguintes desenvolvimentos:

- Implementação da solução e integração com os elementos do controlador CNC, incluindo a definição dos vários parâmetros envolvidos.
- Análise da incorporação de sistemas de proteção e segurança, por exemplo através da aplicação de foles de proteção dos eixos da mesa, do isolamento da área de trabalho através de painéis transparentes incorporados na estrutura e de barreiras de segurança.
- Validação experimental dos resultados obtidos nas simulações.



## Referências

1. *The Father of the Second Industrial Revolution.* URL: <http://www.sme.org/Tertiary.aspx?id=36002>.
2. Suh, S.-H. et al, *Theory and Design of CNC Systems.* Springer Science & Business Media, agosto de 2008. ISBN: 9781848003361.
3. Fagor Automation. CNC 8065 catalog. 2011. URL: [http://www.fagorautomation.com/downloads/catalogos/en/cat\\_cnc\\_8065.pdf](http://www.fagorautomation.com/downloads/catalogos/en/cat_cnc_8065.pdf).
4. SHARP, P.M.T.. SHARP Model SV-2414 Mini Mill - Box Way, I. Industries, Editor. Junho de 2014. URL: [http://www.sharp-industries.com/sites/default/files/product-file/SHARP%20Vertical%20Machining%20Center%20-%20Model%20SV-2414\\_0.pdf](http://www.sharp-industries.com/sites/default/files/product-file/SHARP%20Vertical%20Machining%20Center%20-%20Model%20SV-2414_0.pdf).
5. Siemens. SINUMERIK 840D sl Type 1B catalog. 2016. URL: [http://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentcenter/mc/Documentsu20Catalogs/NC62\\_2012/\\_E2.pdf](http://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentcenter/mc/Documentsu20Catalogs/NC62_2012/_E2.pdf).
6. HEIDENHAIN, TNC 640 - Contouring Control for Machining Centers and Milling/Turning Machines. 2015. URL: [http://www.heidenhain.de/de\\_EN/php/documentationinformation/brochures/popup/media/media/file/view/file-0355/file.pdf](http://www.heidenhain.de/de_EN/php/documentationinformation/brochures/popup/media/media/file/view/file-0355/file.pdf).
7. Haas Automation, Inc., *The Mini Mill & Super Mini Mill.* 2015. URL: [http://int.haascnc.com/DOCLIB/datasheets/INT/PT\\_DS\\_MM.pdf](http://int.haascnc.com/DOCLIB/datasheets/INT/PT_DS_MM.pdf).
8. Haas Automation, Inc., *Série Haas VF-12.* 2012. URL: [http://int.haascnc.com/we\\_spec1.asp?intLanguageCode=1046&id=VF-12/50&sizeID=120\\_150INCH\\_VMC](http://int.haascnc.com/we_spec1.asp?intLanguageCode=1046&id=VF-12/50&sizeID=120_150INCH_VMC).
9. Chiaverini, V., *Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento.* Vol. II 1986.
10. Gerling, H., *À volta da Máquina Ferramenta.* 1967.
11. OBERG, F.D.J.L.H.e.H.H.R.E., *Machinery's Handbook 29th Edition.* 2012: New York: Industrial Press.
12. Fagor Automation. URL: <http://www.fagorautomation.com/>.
13. Precision Drive Systems. URL: <http://www.pdsspindles.com/>.
14. SCHUNK. URL: [http://us.schunk.com/us\\_en/gripping-systems/#/](http://us.schunk.com/us_en/gripping-systems/#/).
15. Gonçalves, D.J.d.R., *Montagem e Teste de um CNC Modular.* Setembro de 2015, Universidade do Porto.
16. Fagor Automation. *Servo-Drive System: General manual. Versão 0112.* 2000.
17. ELECTRONICS, D., *VFD\_VE User Manual, T. Delta Electronics, Editor.* URL: <http://www.deltaww.com/default.aspx?hl=zh-TW>.
18. SCHUNK, *Tool Changing, Quick-change System.*
19. PDS, *XLA/C-070 Operator Manual.* Janeiro de 2011.
20. Schaeffler. *Vis à billes roulées. Vis trapézoïdales roulées.* 2008 URL : [http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/catalogue\\_1/downloads\\_6/vis\\_fr\\_fr.pdf](http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/catalogue_1/downloads_6/vis_fr_fr.pdf).
21. Bosch Rexroth; URL: <https://www.boschrexroth.com/en/xc/home/index>.
22. Sandvik.C, *Ferramentas Rotativas.* 2012. URL: <http://www.sandvik.coromant.com/>.
23. Bosch Rexroth., *Basic Mechanic Elements.* 2015. URL: <http://www.equinotec.com/web/galeria/family/pdf/144889189023628.pdf>.
24. Bosch Rexroth., *Módulos lineares.* 2013. URL: <http://www.equinotec.com/web/galeria/family/pdf/144173109479160.pdf>.
25. BOSSONI, S., *Geometric and Dynamic Evaluation and Optimization of Machining Centers.* 2009, ETH ZURICH.

26. MAGLIE, P., *Parallelization of Design and Simulation: Virtual Machine Tools in Real Product Development*. 2012, ETH ZURICH.
27. RULAND. URL: <http://www.ruland.com/>.
28. *International Electrotechnical Commission. IEC 60072-1, Dimensions and output series for rotating electrical machines*. 1991.
29. KMS - Comércio de materiais técnicos. Brochura Web. URL: <http://www.kms.com.pt/images/KMS%20-%20Brochura%20-%20Web.pdf>.
30. Geoffrey Boothroyd, W.A.K., *Fundamentals of machining and machine tools*. 2º ed. 1989.

## **ANEXO A: Orçamento da estrutura**



Item N°	Designação	QTY.	Mate- rial	Preço/uni	Preço [€]	Forn.
1	Parafuso CHC M8x20	16	Aço	0,07	1,12	HILTI
2	Anilha plana M16	4	Aço	0,08	0,32	HILTI
3	Porca Hexagonal M16-8	4	Aço	0,22	0,88	HILTI
4	Parafuso CHC M8 x 40	8	Aço	0,12	0,96	HILTI
5	Parafuso CHC - M10x20	4	Aço	0,13	0,52	HILTI
6	Anilha plana M8	4	Aço	0,02	0,08	HILTI
7	Porca Hexagonal M8-8	4	Aço	0,06	0,24	HILTI
8	Parafuso c. Hexagonal M16 x 45	4	Aço	0,61	2,44	HILTI
9	Porca T M8	12	Aço	0,06	0,72	HILTI
10	Porta cabos 124x45x1320	1		79,7	79,7	EQUI- NOTEC
11	Chapa 2,5x1,5x0,0015 m	1	Al.	52,34	52,34	CHAGAS
12	Módulo linear MKK-165	1		2846,22	2846,22	EQUI- NOTEC
13	Perfil 100x100x958	1		78,27	78,27	EQUI- NOTEC
14	Perfil 100x200x218	1		38,17	38,17	EQUI- NOTEC
15	Perfil 100x200x1500	1		262,65	262,65	EQUI- NOTEC
16	Esquadro	1		472,51	472,51	EQUI- NOTEC
17	Acoplamento MBCK51-25-19	1		217,33	217,33	RULAND
18	Luneta MKK165	1	Al7075	84	84 <sup>1</sup>	
19	Interface Esquadro Perfil	1	Al 7075	64	64 <sup>2</sup>	
20	Interface entre SWS-011 e MKK165	1	Al 7075	55	55 <sup>3</sup>	

<sup>1</sup> Preço estimado para bloco de alumínio de 106 x 150 x 131 mais maquinaria

<sup>2</sup> Preço estimado para bloco de alumínio de 214 x 200 x 20 mais maquinaria

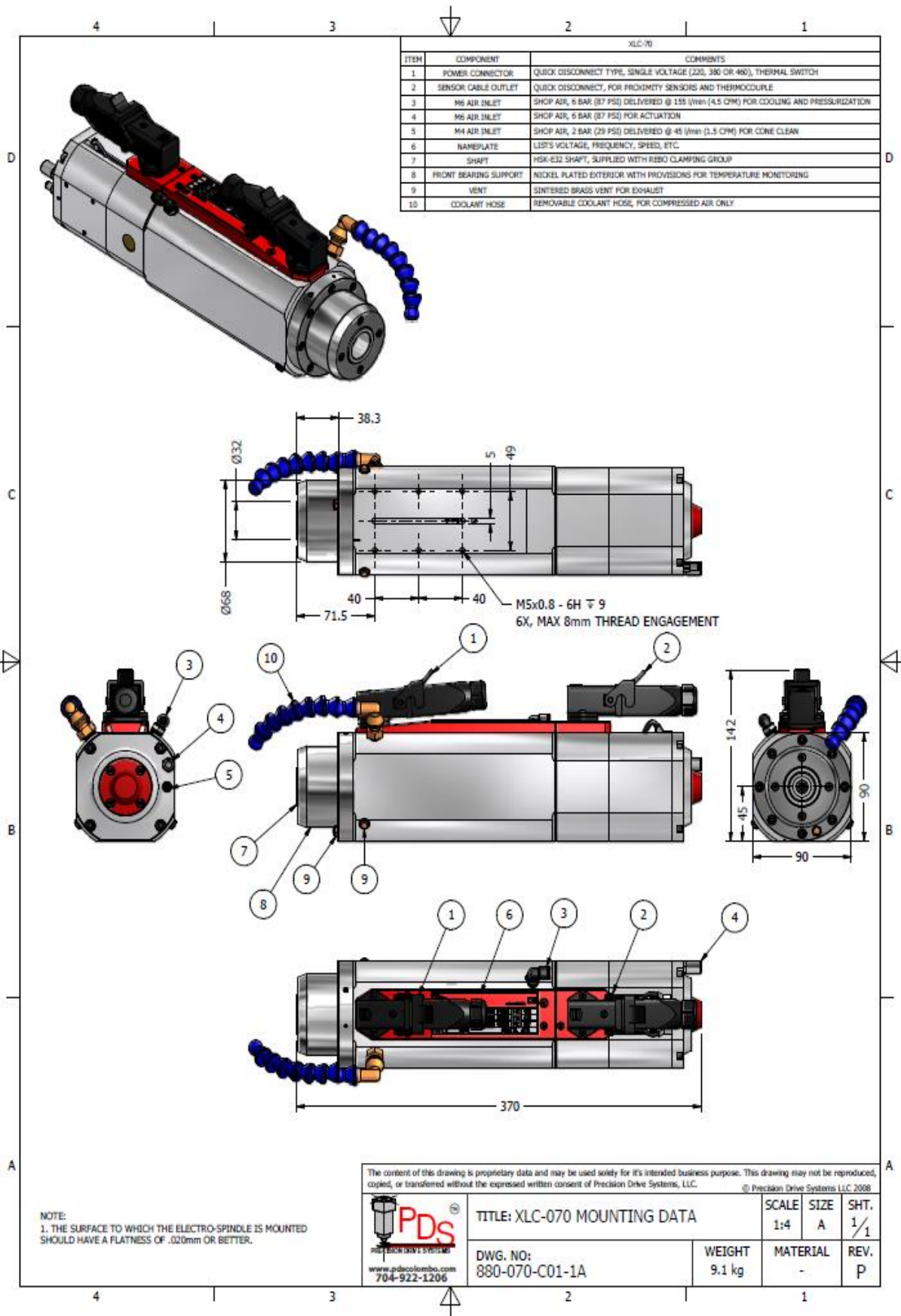
<sup>3</sup> Preço estimado para bloco de alumínio de 150 x 120 x 20 mais maquinaria

21	Conetor angular (-) 45°	32		5,84	186,88	EQUI- NOTEC
22	Conetor angular 45°	32		5,84	186,88	EQUI- NOTEC
23	Perfil 100x100x849_45	8		104,363	834,904	EQUI- NOTEC
24	Perfil 100x100x1262	6		103,11	618,66	EQUI- NOTEC
25	Bracket 100X100	69		13,87	957,03	EQUI- NOTEC
26	Base plate	14		17,79	249,06	EQUI- NOTEC
27	Perfil 100x200x304	2		53,23	106,46	EQUI- NOTEC
28	Perfil 100x100x304	4		24,84	99,36	EQUI- NOTEC
29	Leveling foot	14		8,75	122,5	EQUI- NOTEC
30	Perfil 100x100x1300	7		106,21	743,47	EQUI- NOTEC
31	Profile connector 180	18		8,35	150,3	EQUI- NOTEC
32	Perfil 100x200x1300	2		227,63	455,26	EQUI- NOTEC
33	Bolt connector	16		6,21	99,36	EQUI- NOTEC
34	Cantoneira 120x120x12	2	S275JR	13,42	26,84	CHAGAS
Total (s/ IVA) €					9094,43	
Total (c/ IVA) €					11186,20	

## **ANEXO B: Desenhos de definição e características dos componentes existentes**

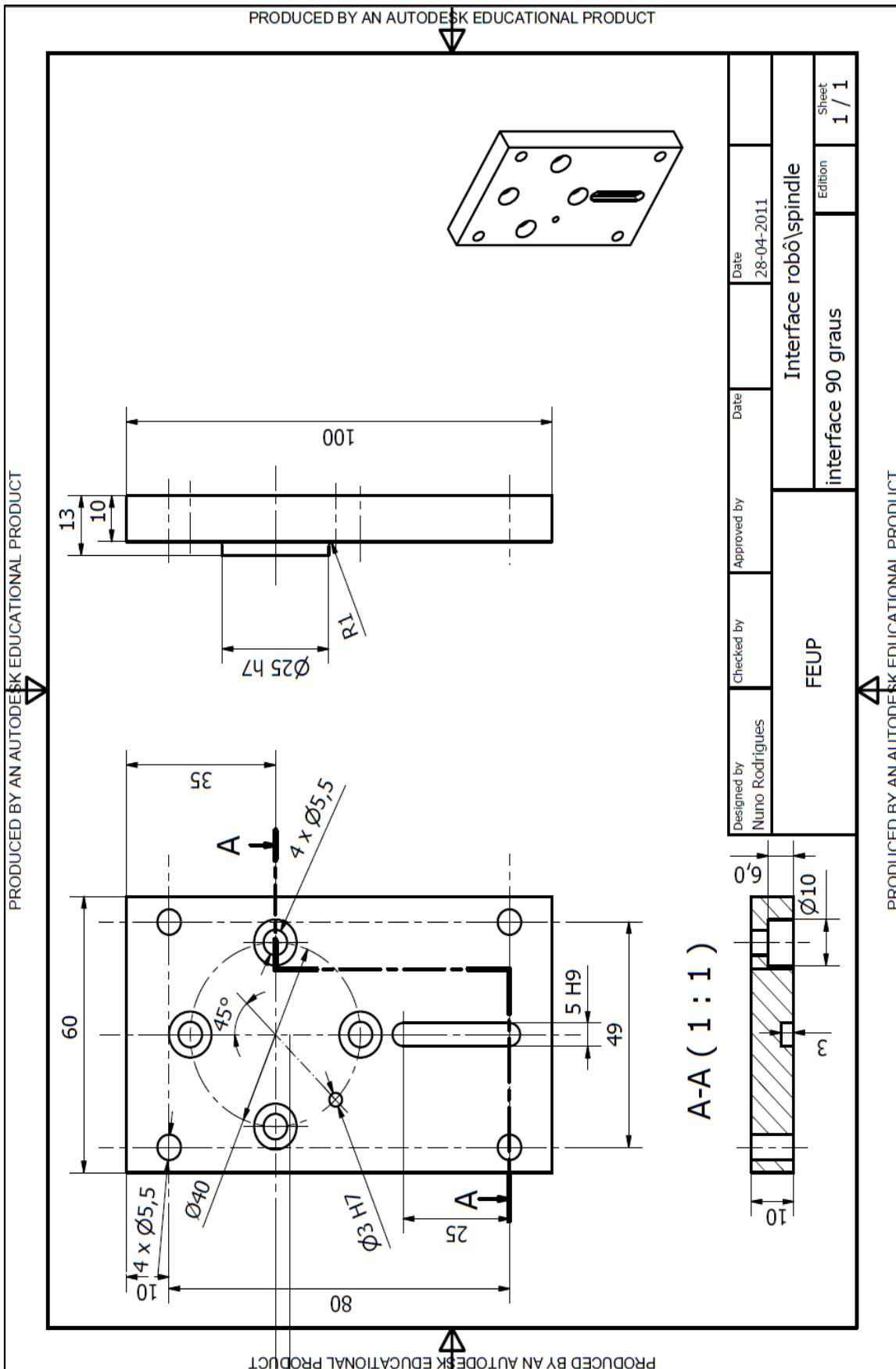


**Spindle PDS XXL-070**



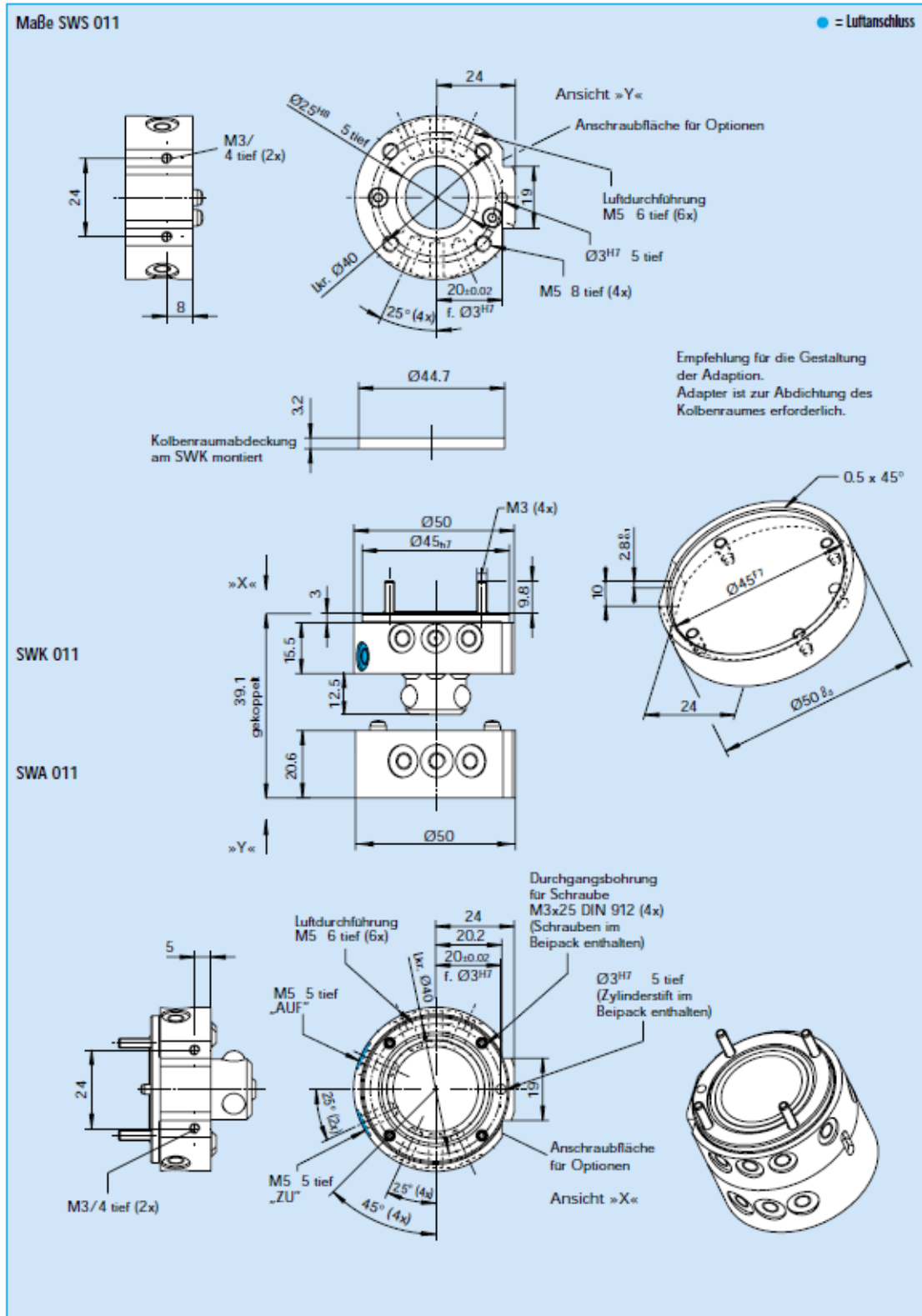
Limitações de materiais a maquinar		
Material	Formato	Utilização
Titânio	Folha	Não apropriado
Aço-níquel	Chapa	Não apropriado
Aço inoxidável (300 Series)	Chapa	Não apropriado
Aço inoxidável (400 Series)	Chapa	Não apropriado
Aço-Carbono	Chapa	Não apropriado
Chapas de aço leves	Chapa	Não apropriado
Pedra, Granito, Mármore	Blocos e lajes	Não apropriado
Alumínio e ligas leves	Tudo	Com precaução
Plástico rígido de policarbonato	Chapa	Com precaução
Madeiras sólidas, Carvalho etc.	Chapa	Com precaução
Contraplacados & OSB	Tudo	Aplicação normal
Pinho, abeto, etc.	Chapa	Aplicação normal
Plástico flexível e PVC	Tudo	Aplicação normal
MDF	Chapa	Aplicação normal
Aglomerado	Chapa	Aplicação normal
Espuma rígida	Blocos	Aplicação normal

**Interface spindle XLC-070/ SCHUNK SWS – 011**



**Características do sistema pneumático SCHUNK SWS – 011**

# SWS 011



# SWS-011

## Tool Changing - Quick-change System - Light Load



### Product description

Light, small and compact with extremely high locking force

#### No-Touch-Locking™

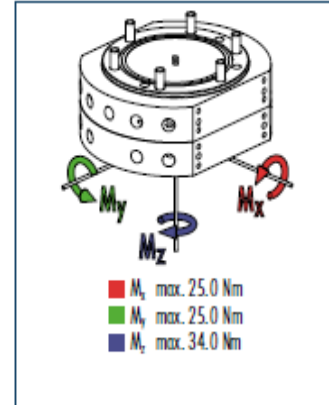
Locking without touching. Ensures that the SWS is securely locked even when the SWK and SWA do not touch. A maximum distance of 3 mm is possible.

#### Patented, self-retaining locking system

A larger piston diameter and the OD locking mechanism increase the permissible moment load. Steel components made from stainless Rc 58.

Air feed-through with specially developed rubber seals

### Moment load



① The dynamic moment load can be up to three times larger than the static moment load. Tests have shown that the system will only begin to fail in the event of 12-fold static moment.

### Technical data

Designation		SWS-011	
Maximum payload	[kg]	16	A larger payload is possible with smaller moments
Static moment load $M_{sx}$	[Nm]	25	
Static moment load $M_{sy}$	[Nm]	34	
Dynamic moment load $M_{dx}$	[Nm]	75	
Dynamic moment load $M_{dy}$	[Nm]	102	
Locking force (at 6 bar)	[N]	1068	In the event of higher tensile forces the system "falls" into the self-locking position
Repeat accuracy	[mm]	0.01	Tested at 1 million cycles
Weight	[kg]	0.21	0.13 kg head; 0.08 kg adapter
Max. distance on locking	[mm]	3.0	No-Touch-Locking™ technology allows the parts to be coupled without the head and the adapter touching
Pneumatic energy transmission		6x pneumatic M5	Max. 7 bar
Maximum permissible XY offset	[mm]	± 1	Maximum permissible XY offset when locking
Maximum permissible angular offset	[°]	± 2	Maximum permissible angular offset around the Z axis when locking

### Information on moment load

Selecting the correct quick-change system depends on the moment load which the system is subject to.

Proceed as follows to calculate the maximum moments.

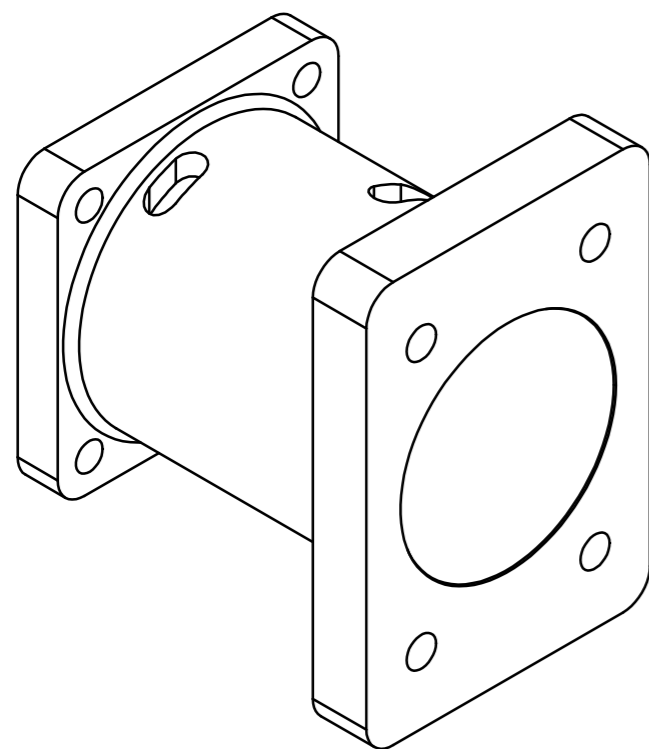
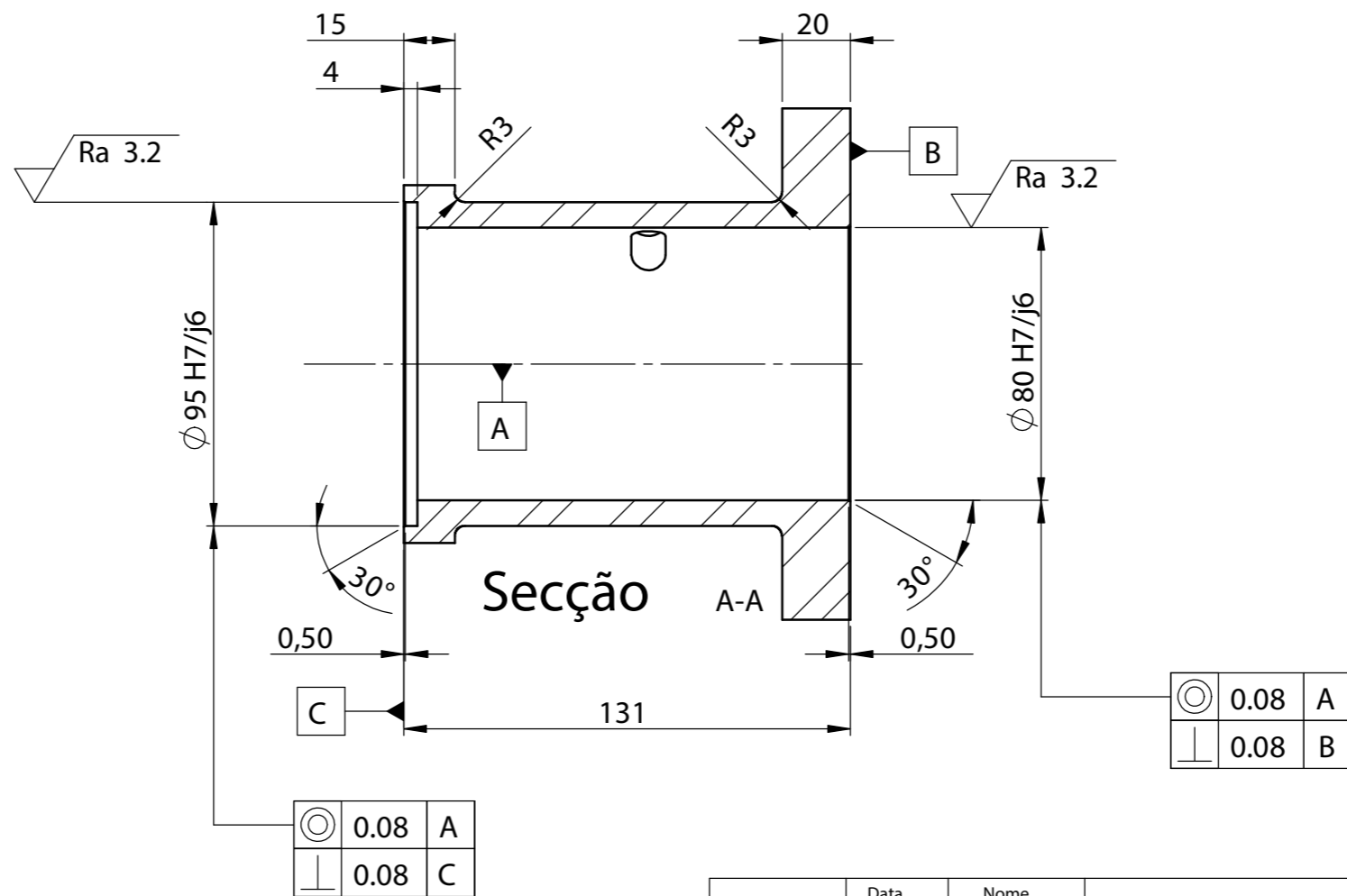
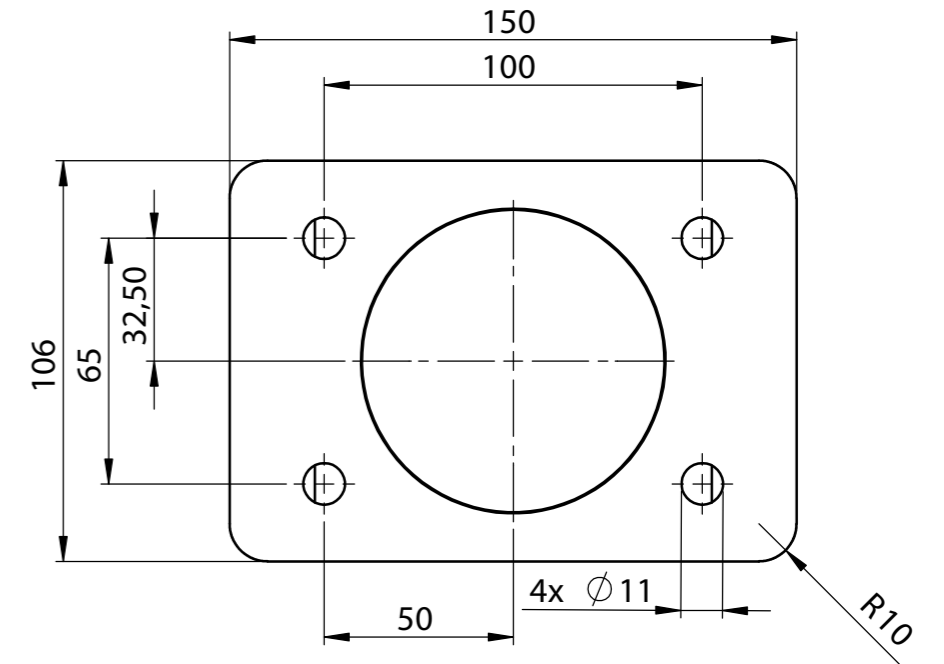
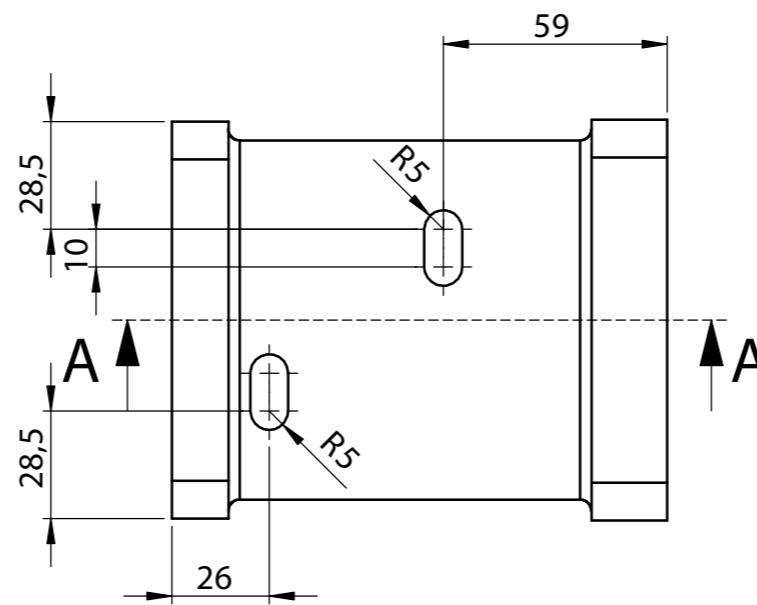
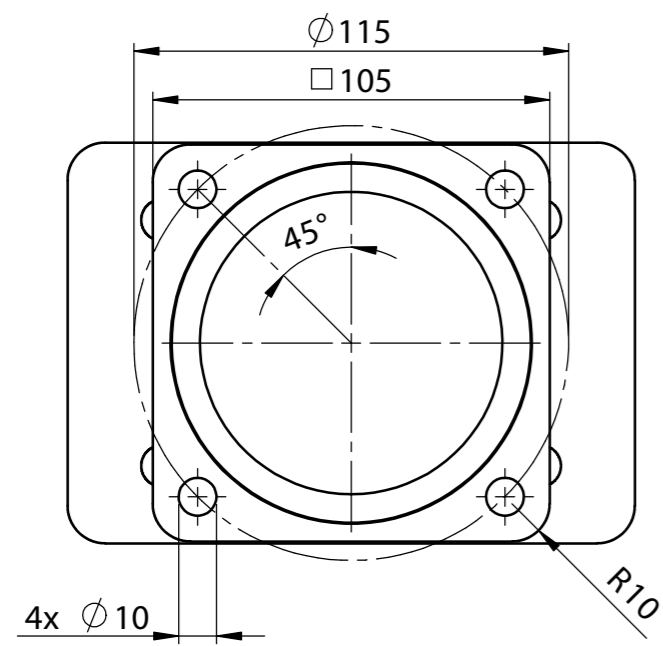
- Determine the center of gravity and the weight (m in Newtons) of your heaviest tool (gripper, adapter plate and tool)
- Determine the distance (D in meters) from the center of gravity to the underside of the quick-change adapter (SWA)
- Calculate the static moment (m x D)
- Select a quick-change system with a permissible moment that is equal to or greater than the moment you have calculated

Robot movements can also have an effect on the change system. Dynamic moments can come into effect which are 2 - 3 times greater than the static moments you have calculated. The SWS quick-change systems are designed for handling dynamic moments which can be up to three times greater than the static moments.



## **ANEXO C: Desenhos de definição dos componentes e estrutura de suporte**

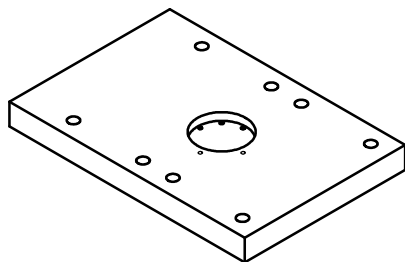
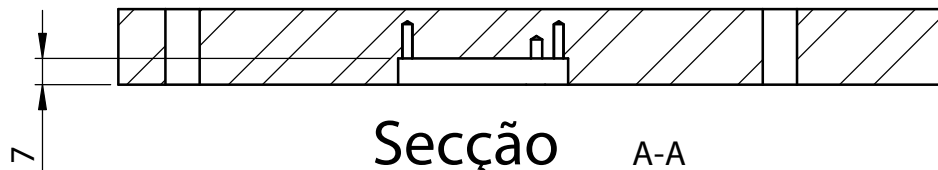
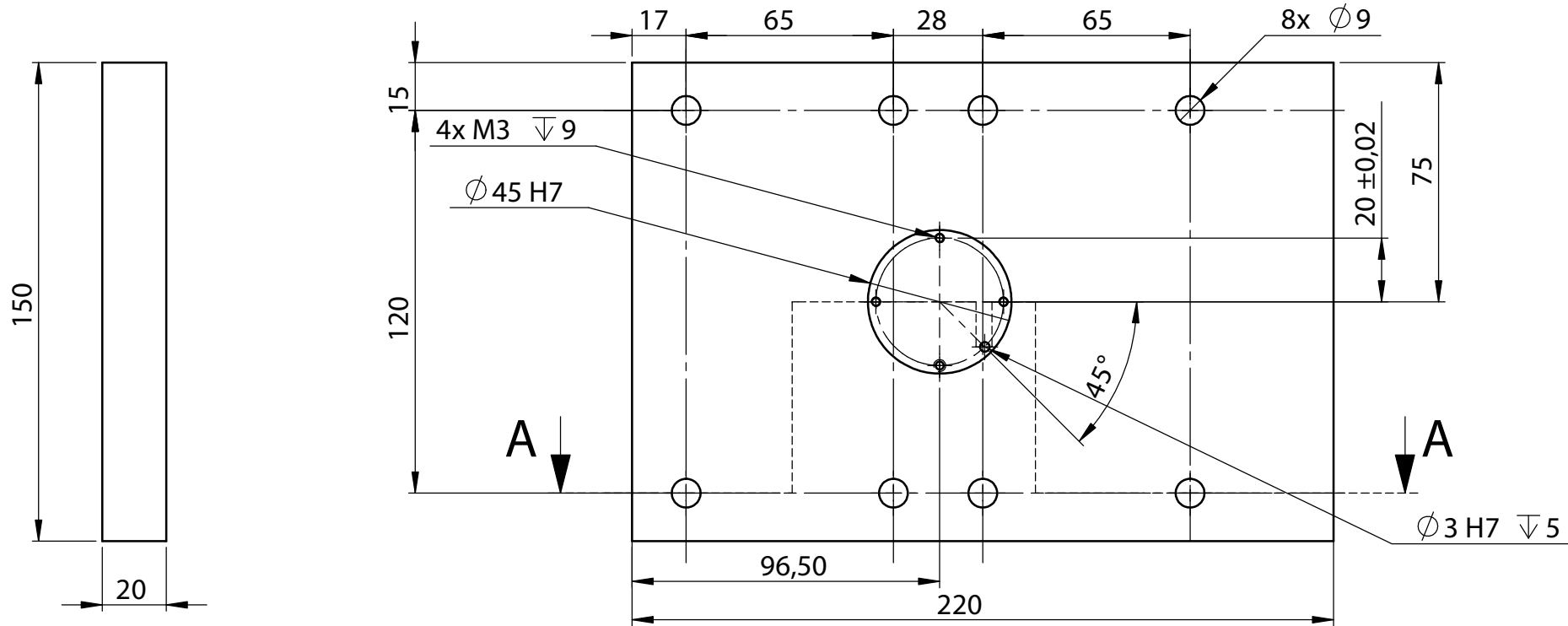




	Data	Nome
Desenhou	27/08/16	Diogo Costa
Verificou		
Homologou		
Escalas		
	1:2	
	A3	

F.E.U.P  
Faculdade de Engenharia da Universidade  
do Porto

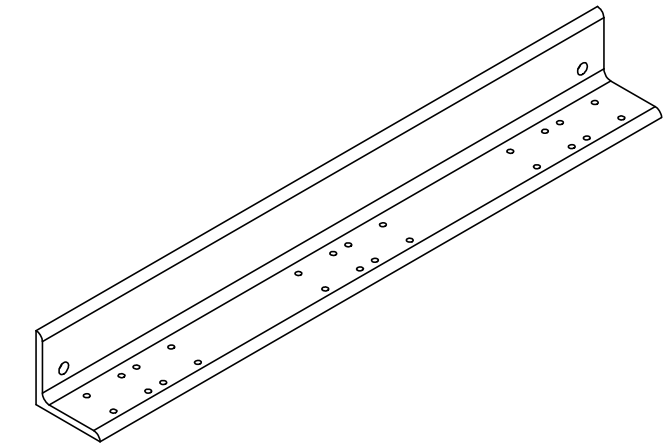
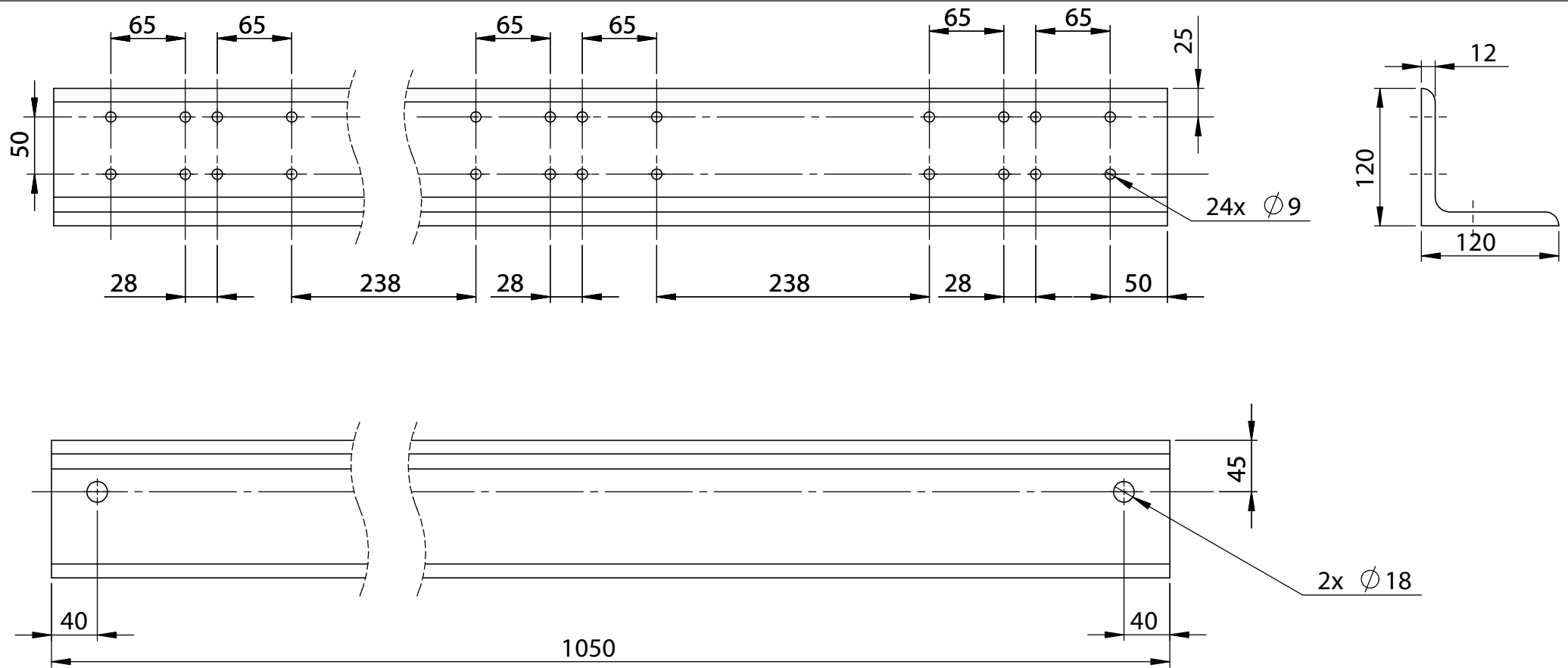
Luneta para módulo linear MKK-165



	Data	Nome
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa
Verificou		
Homologou		
Escalas		
	1:2	
	A4	

F.E.U.P  
Faculdade de Engenharia da Universidade  
do Porto

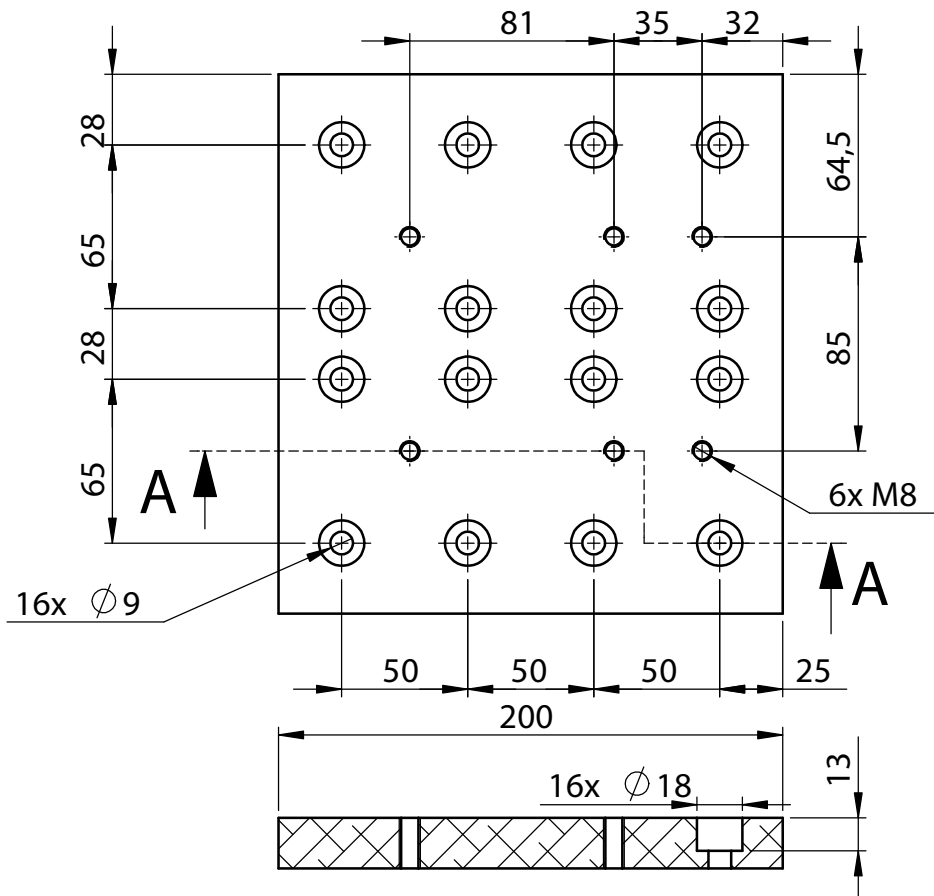
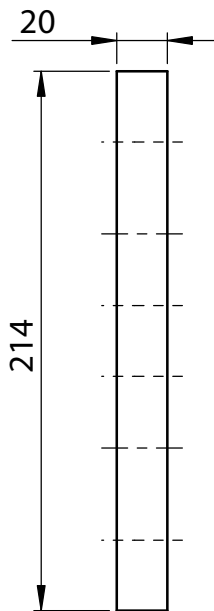
Interface entre acoplamento pneumático  
e módulo linear MKK-165



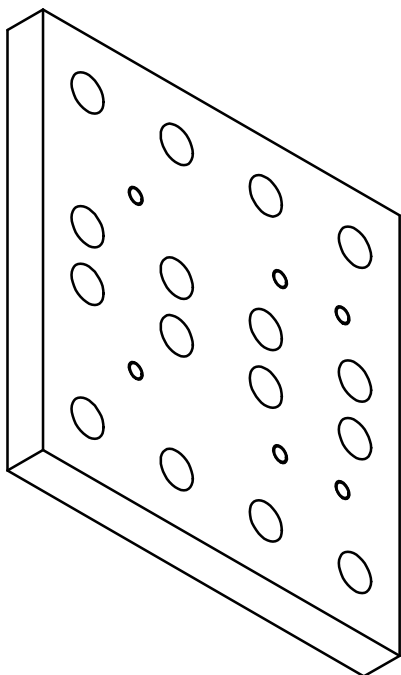
	Data	Nome
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa
Verificou		
Homologou		
Escalas		
	1:5	
	A4	

F.E.U.P  
 Faculdade de Engenharia da Universidade  
 do Porto

Cantoneira 120 x 120 x 12



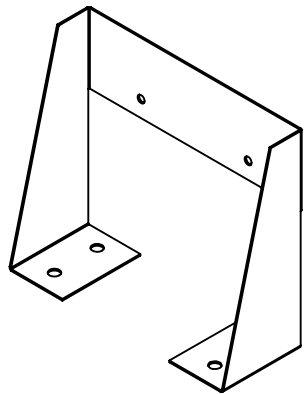
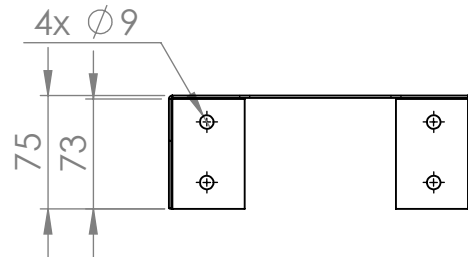
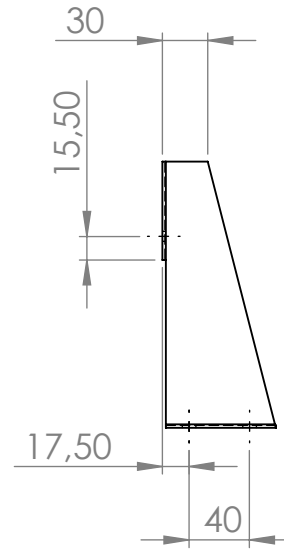
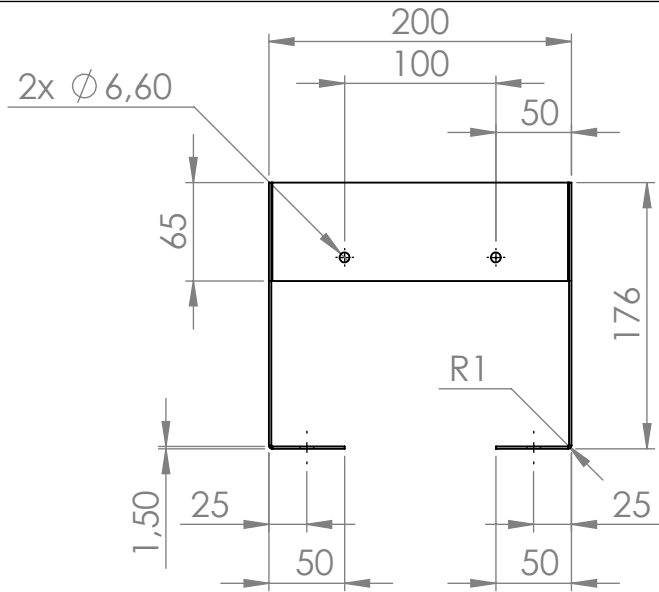
Secção A-A



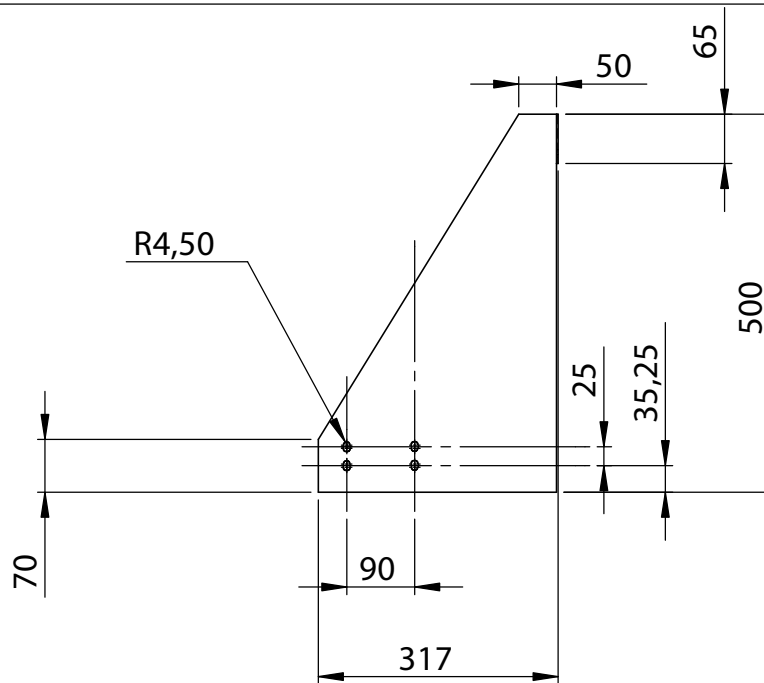
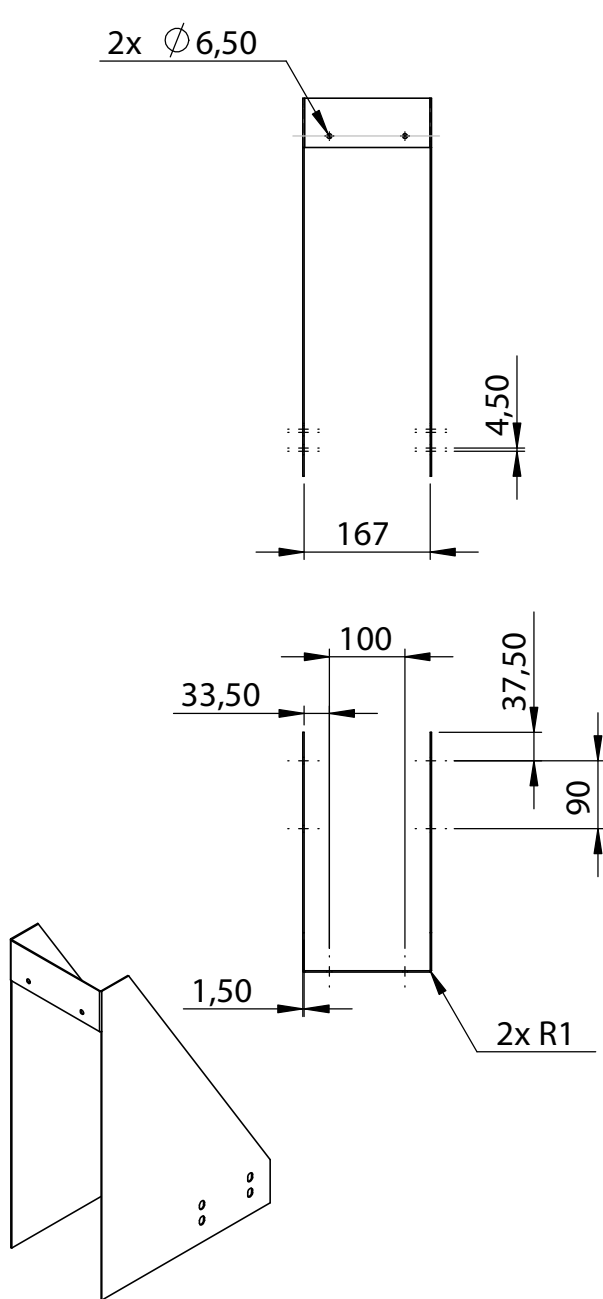
	Data	Nome
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa
Verificou		
Homologou		
Escalas		
1:3		
A4		

F.E.U.P  
Faculdade de Engenharia da Universidade  
do Porto

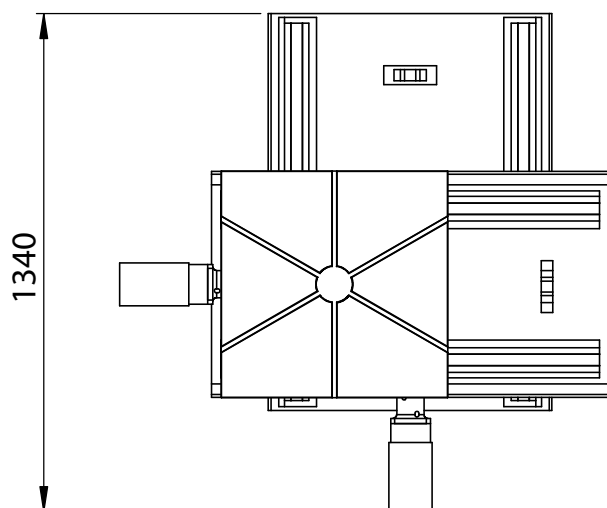
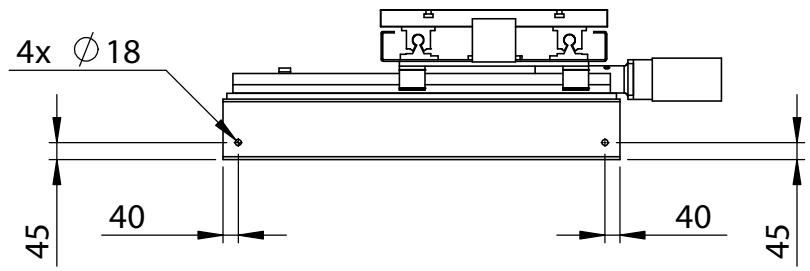
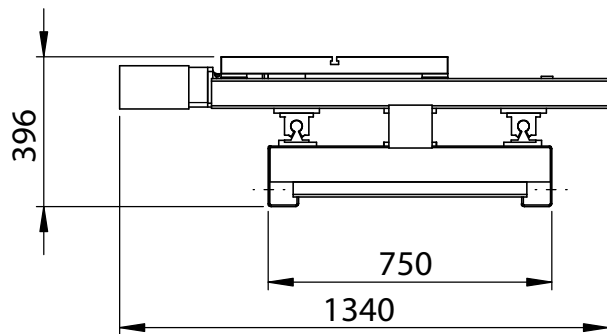
Interface entre o esquadro do módulo linear e o perfil



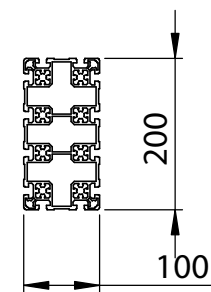
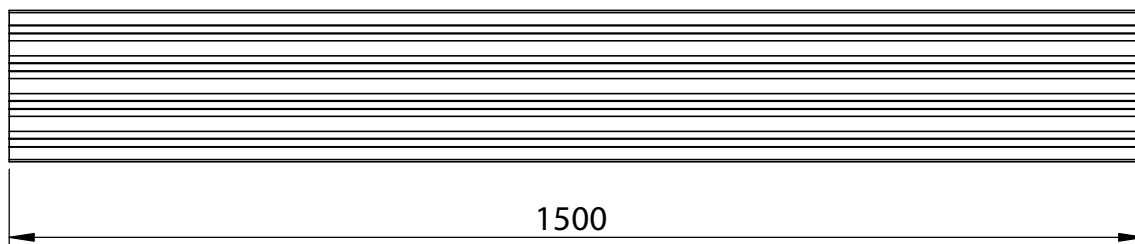
	Data	Nome	
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Verificou			
Homologou			
Escalas	Apoio entre perfil e porta cabos		
1 : 10			
A4			



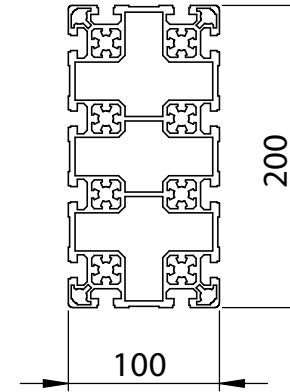
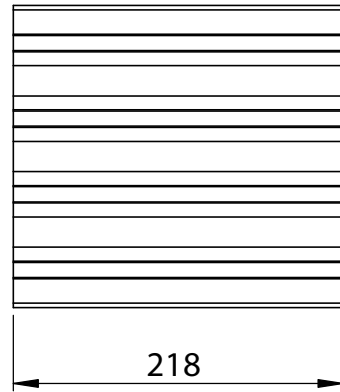
	Data	Nome	
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Verificou			
Homologou			
Escalas			
1:10			
A4	Apio entre módulo linear e porta cabos		



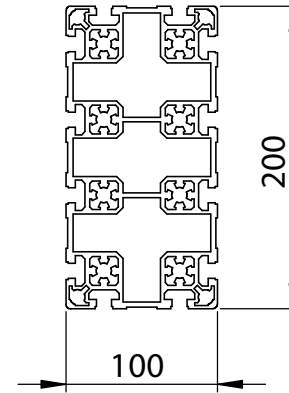
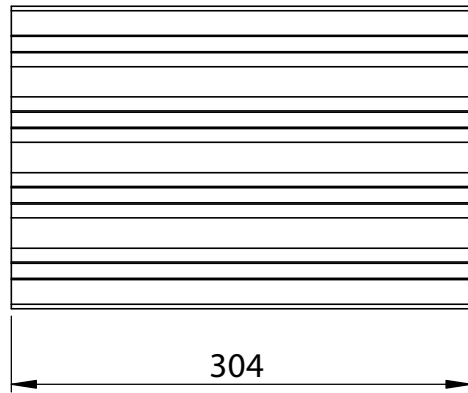
	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa	
Verificou			
Homologou			
Escalas	Mesa de posicionamento		
1 : 20			
A4			



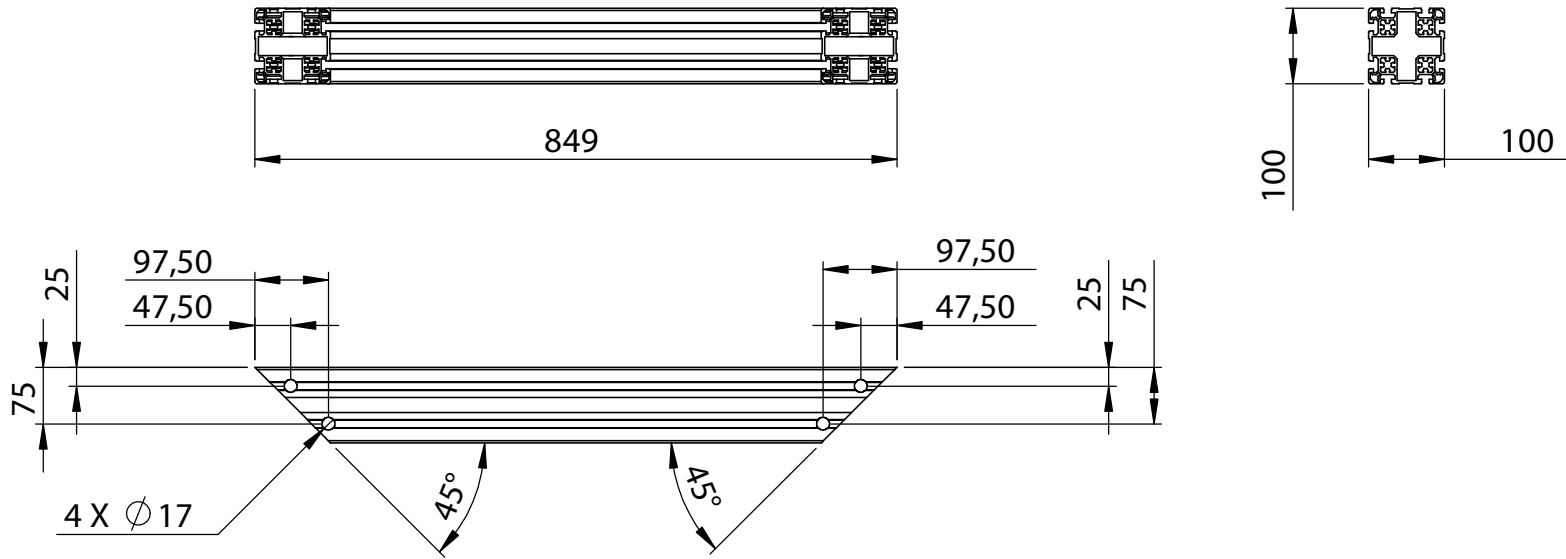
	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa	
Verificou			
Homologou			
Escalas	Perfil 100x200x1500		
1 : 10			
A4			



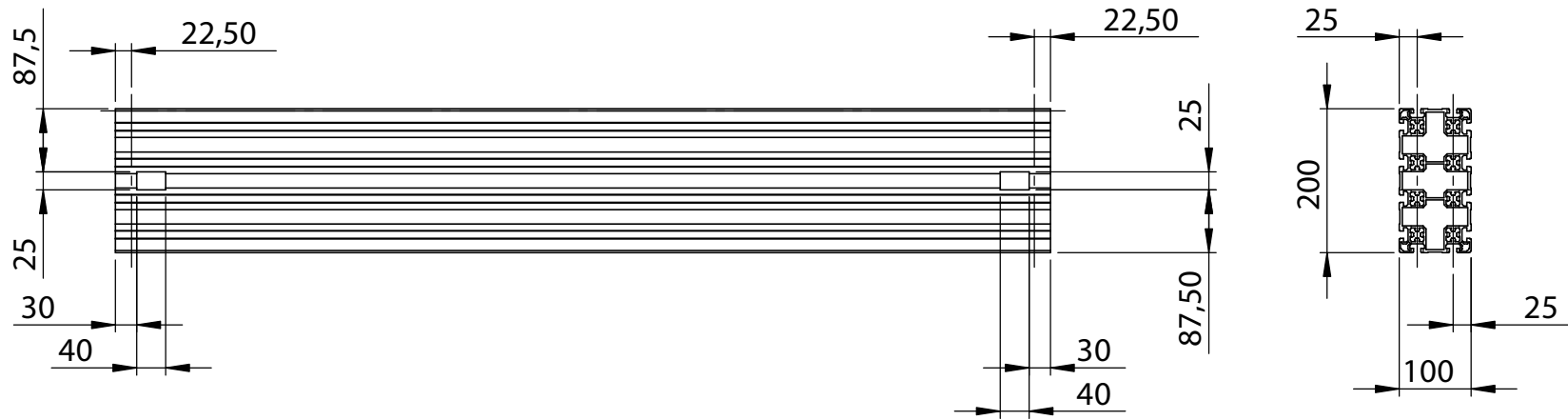
	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa	
Verificou			
Homologou			
Escalas	Perfil 100x200x218		
1:5			
A4			



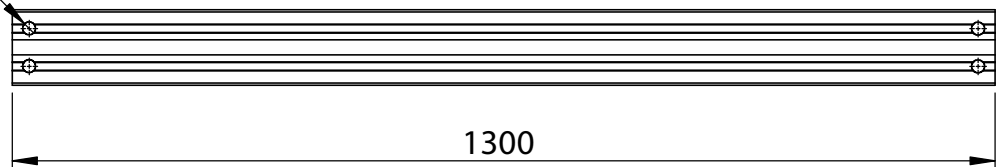
	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa	
Verificou			
Homologou			
Escalas	Perfil 100x200x304		
1:5			
A4			



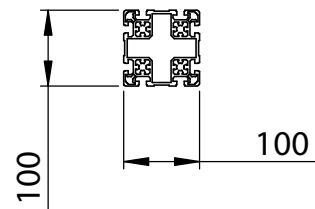
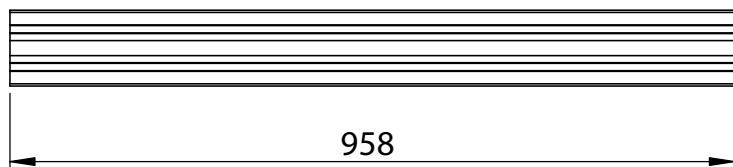
	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa	
Verificou			
Homologou			
Escalas	Perfil 100x100x849 45°		
1:10			
A4			



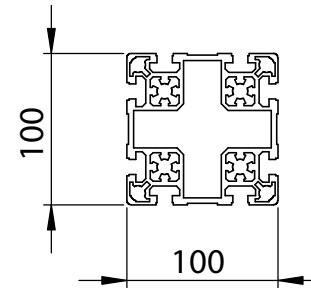
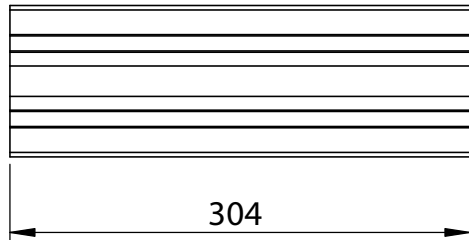
4X  $\varnothing 17$



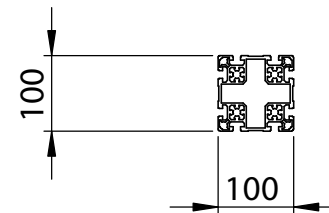
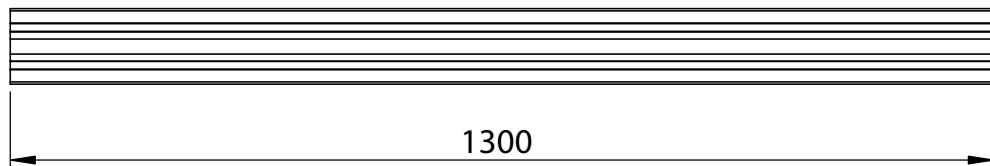
	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa	
Verificou			
Homologou			
Escalas	Perfil 100x200x1300		
1:10			
A4			



	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa	
Verificou			
Homologou			
Escalas	Perfil 100x100x958		
1 : 10			
A4			



	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa	
Verificou			
Homologou			
Escalas	Perfil 100x100x304		
1:5			
A4			

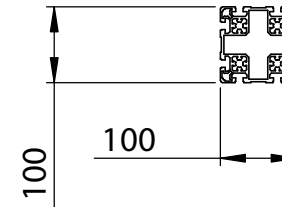
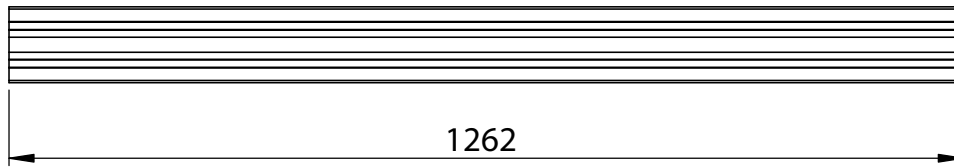


	Data	Nome
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa
Verificou		
Homologou		

F.E.U.P  
Faculdade de Engenharia da Universidade  
do Porto

Escalas
1 : 10
A4

Perfil 100x100x1300



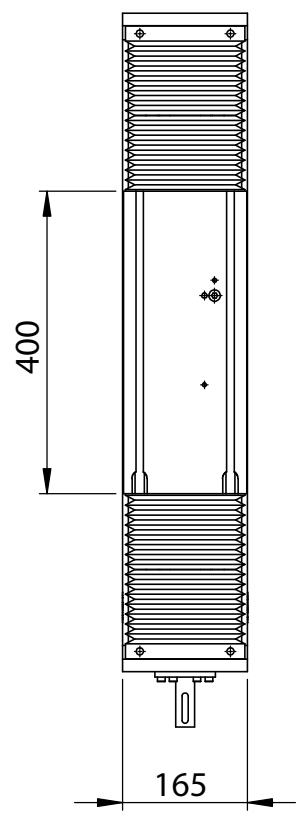
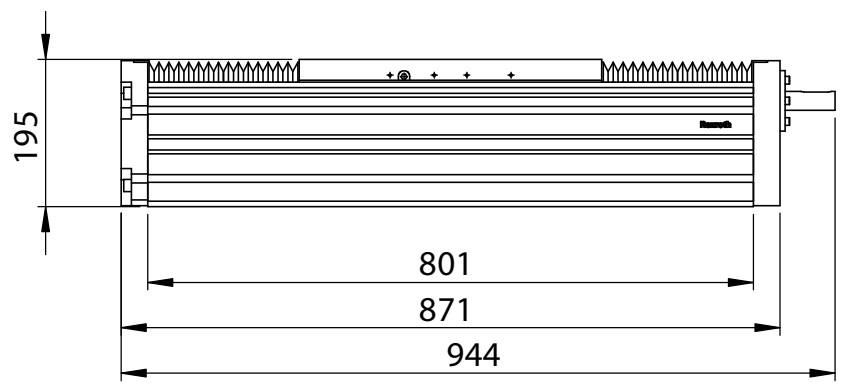
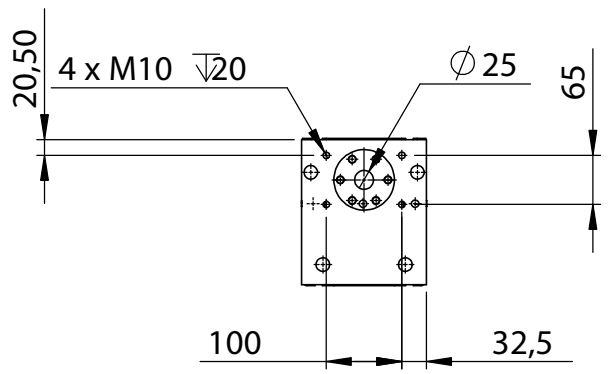
	Data	Nome
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa
Verificou		
Homologou		

F.E.U.P  
 Faculdade de Engenharia da Universidade  
 do Porto

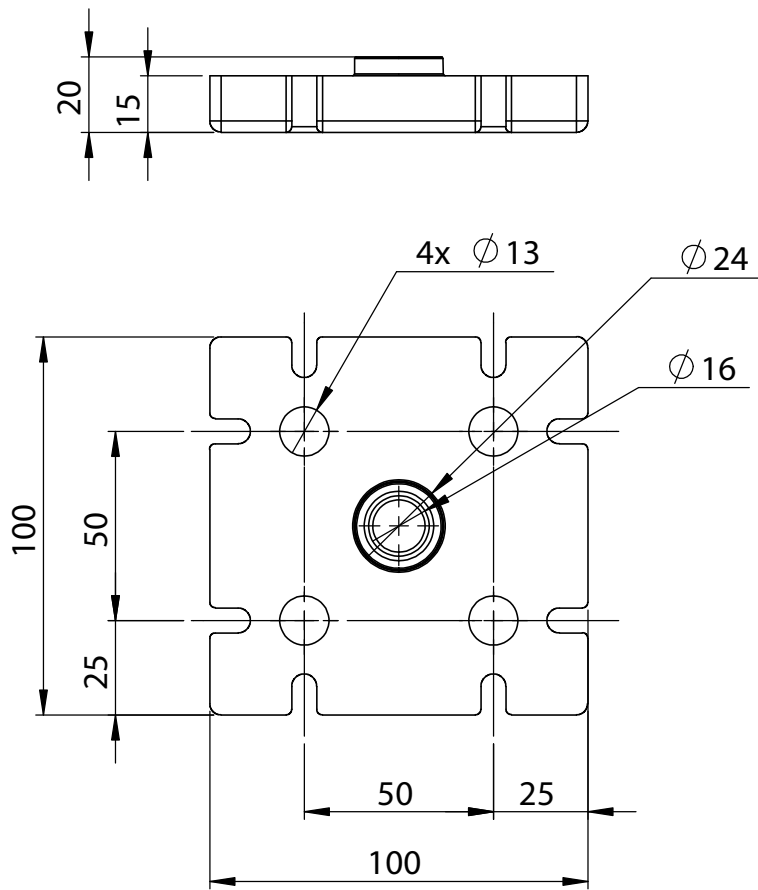
Escalas  
 1 : 10

A4

Perfil 100x100x1262



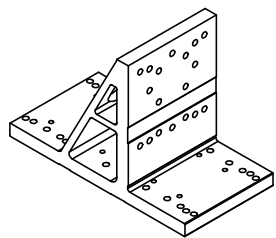
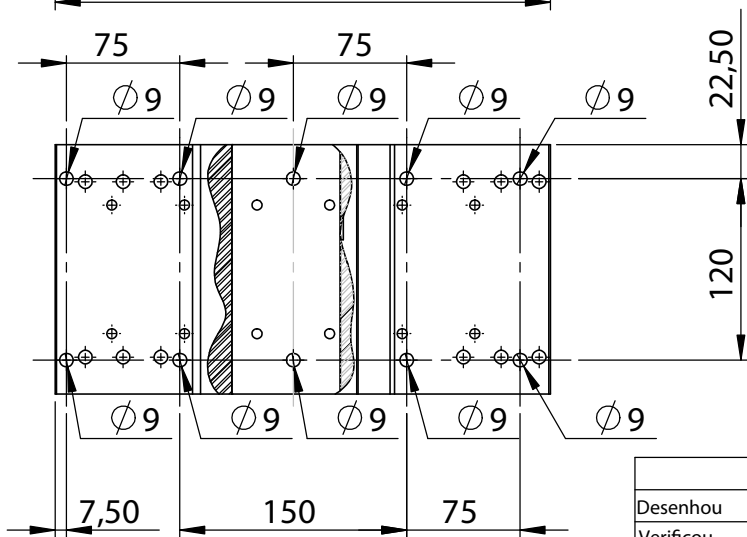
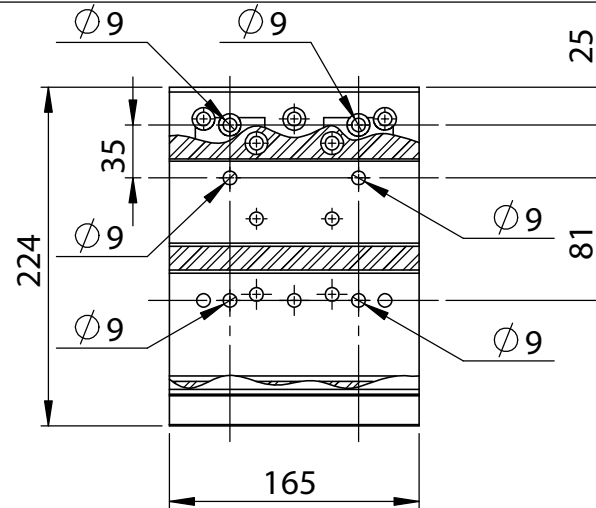
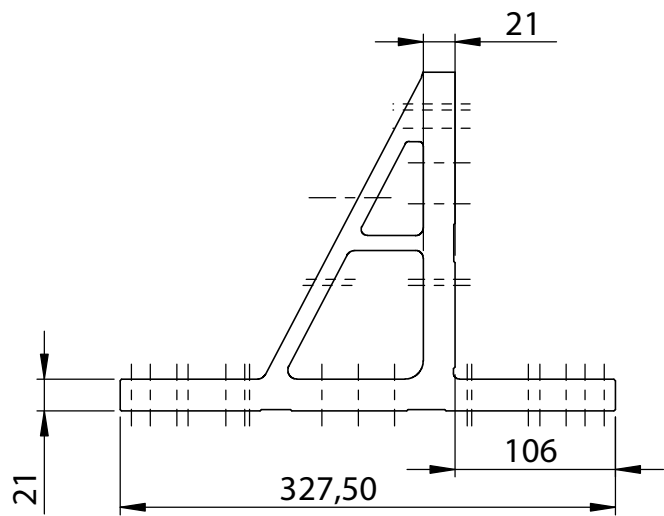
	Data	Nome	
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Verificou			
Homologou			
Escalas	Módulo linear MKK 165		
1 : 10			
A4			



	Data	Nome
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa
Verificou		
Homologou		
Escalas		
1:2		
A4		

F.E.U.P  
Faculdade de Engenharia da Universidade  
do Porto

Base Plate

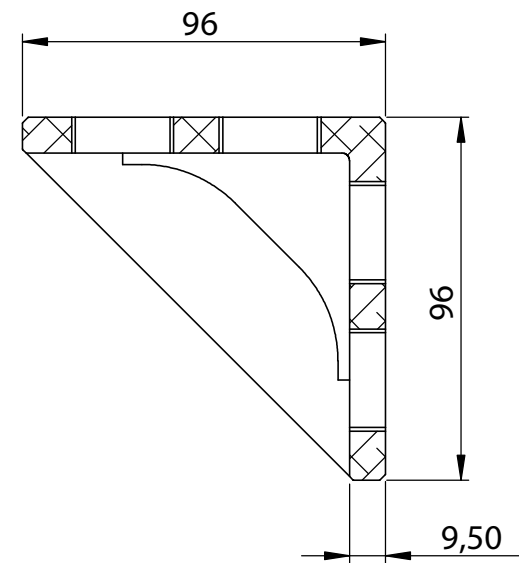
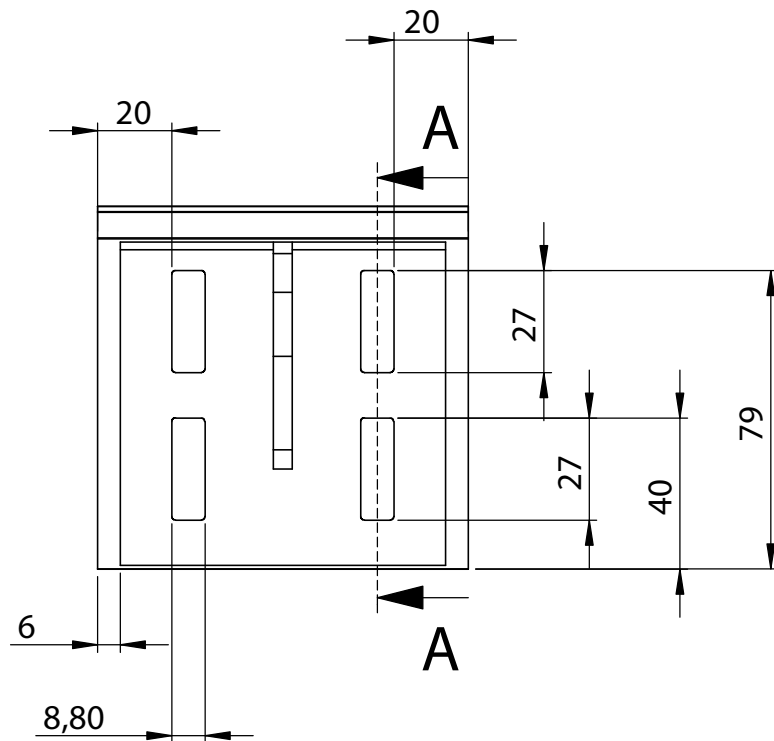


	Data	Nome
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa
Verificou		
Homologou		

F.E.U.P  
Faculdade de Engenharia da Universidade  
do Porto

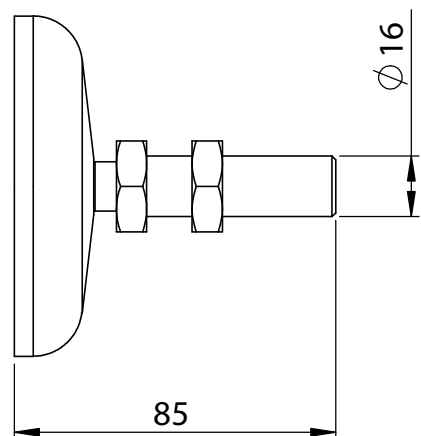
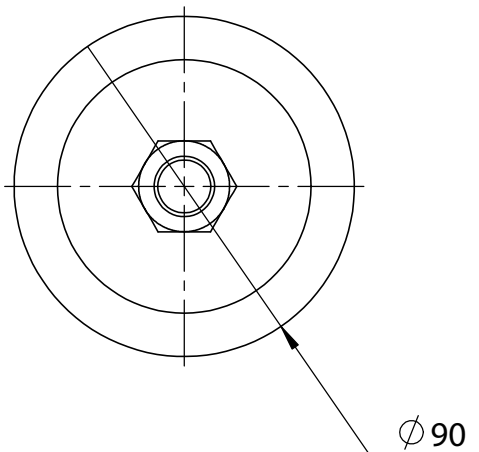
Escalas	
1:5	
A4	

Esquadro

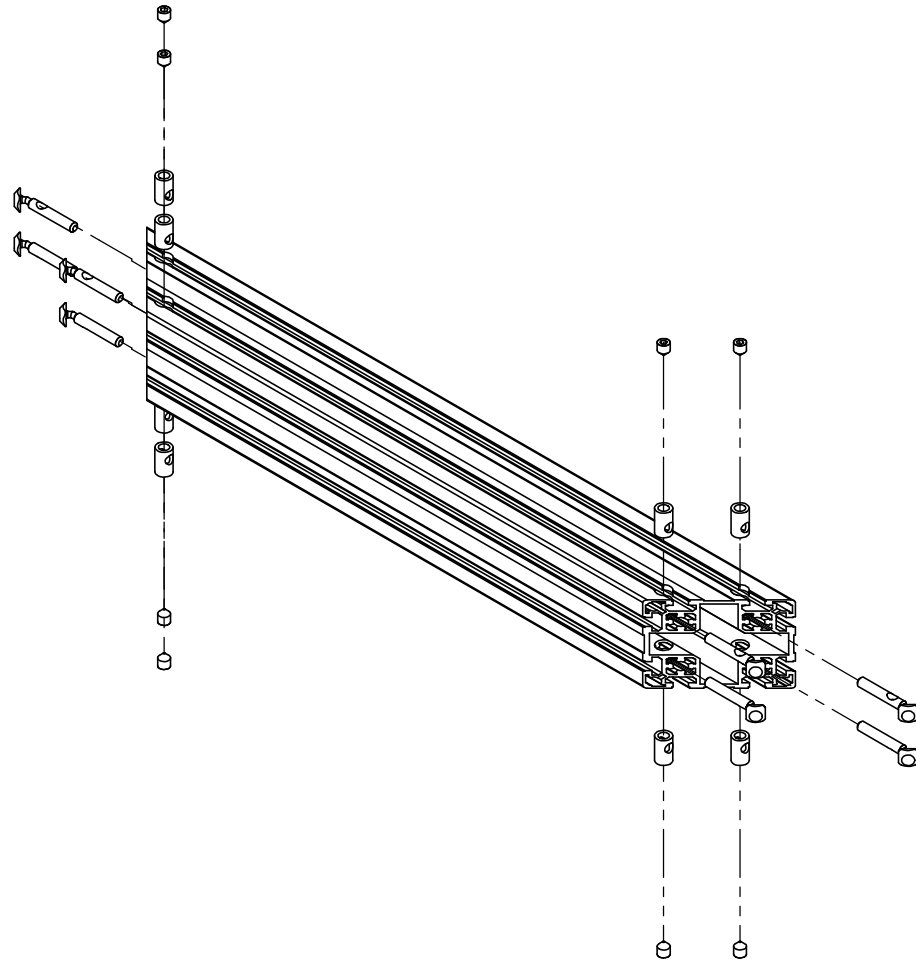


Secção A-A

	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa	
Verificou			
Homologou			
Escalas	Bracket 100X100		
1:2			
A4			



	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa	
Verificou			
Homologou			
Escalas	Leveling foot		
1:2			
A4			

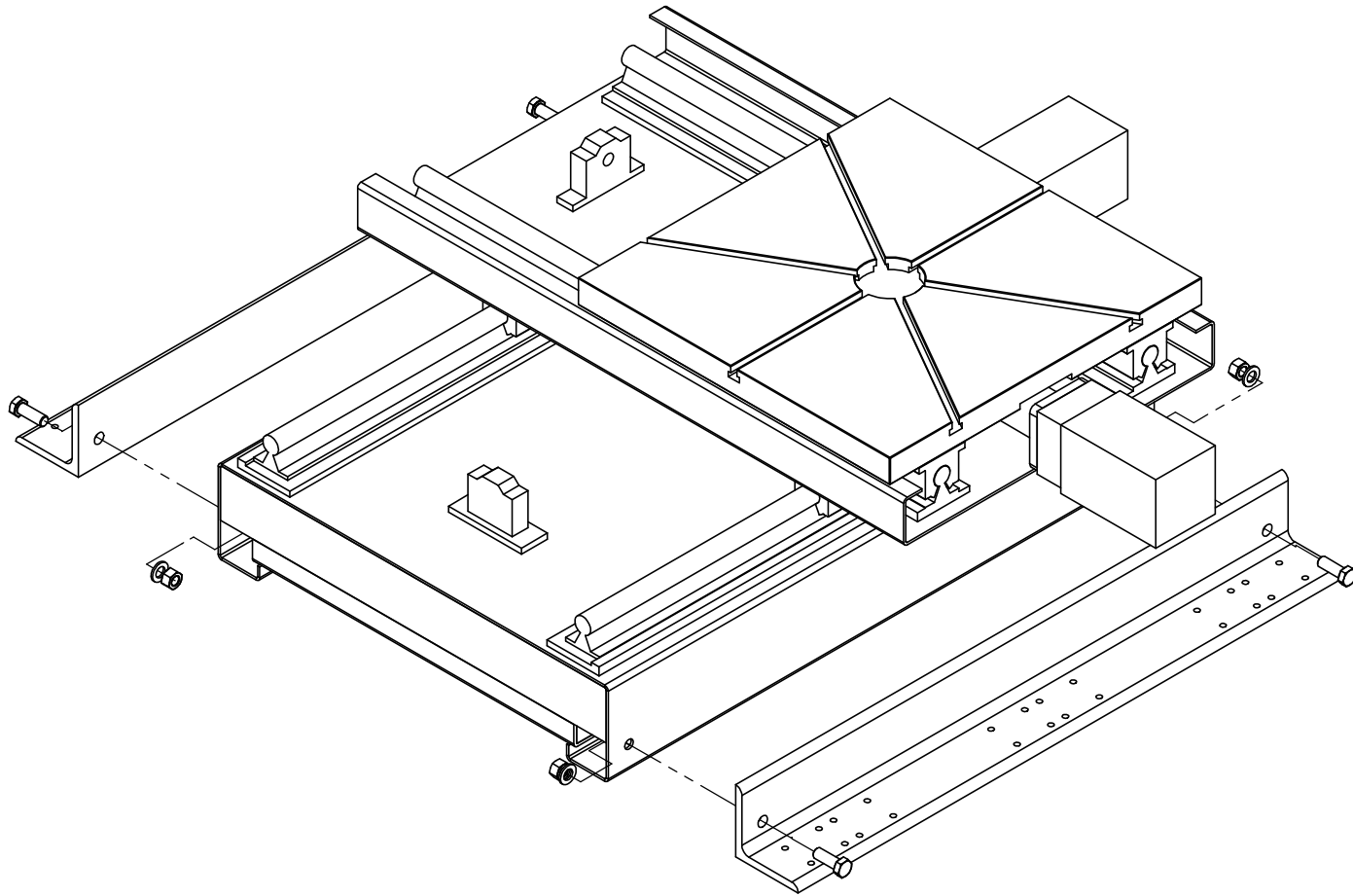


	Data	Nome
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa
Verificou		
Homologou		

F.E.U.P  
Faculdade de Engenharia da Universidade  
do Porto

Escalas
1:10
A4

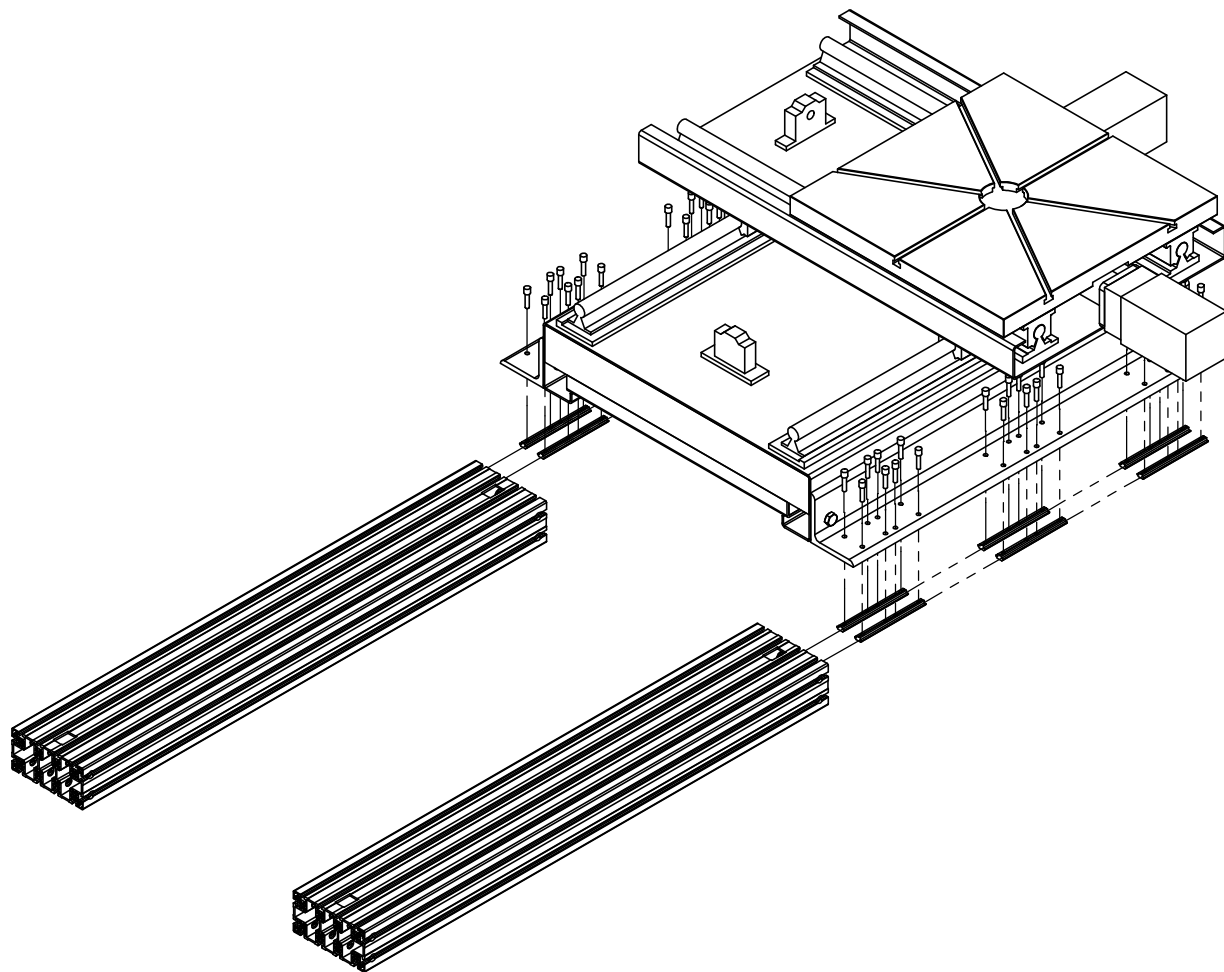
Montagem dos conetores angulares nos perfis



	Data	Nome
Desenhou	27/08/2016	Diago Costa
Verificou		
Homologou		
Escalas		
	1:10	
	A4	

F.E.U.P  
 Faculdade de Engenharia da Universidade  
 do Porto

Montagem das cantoneiras  
 na mesa de posicionamento

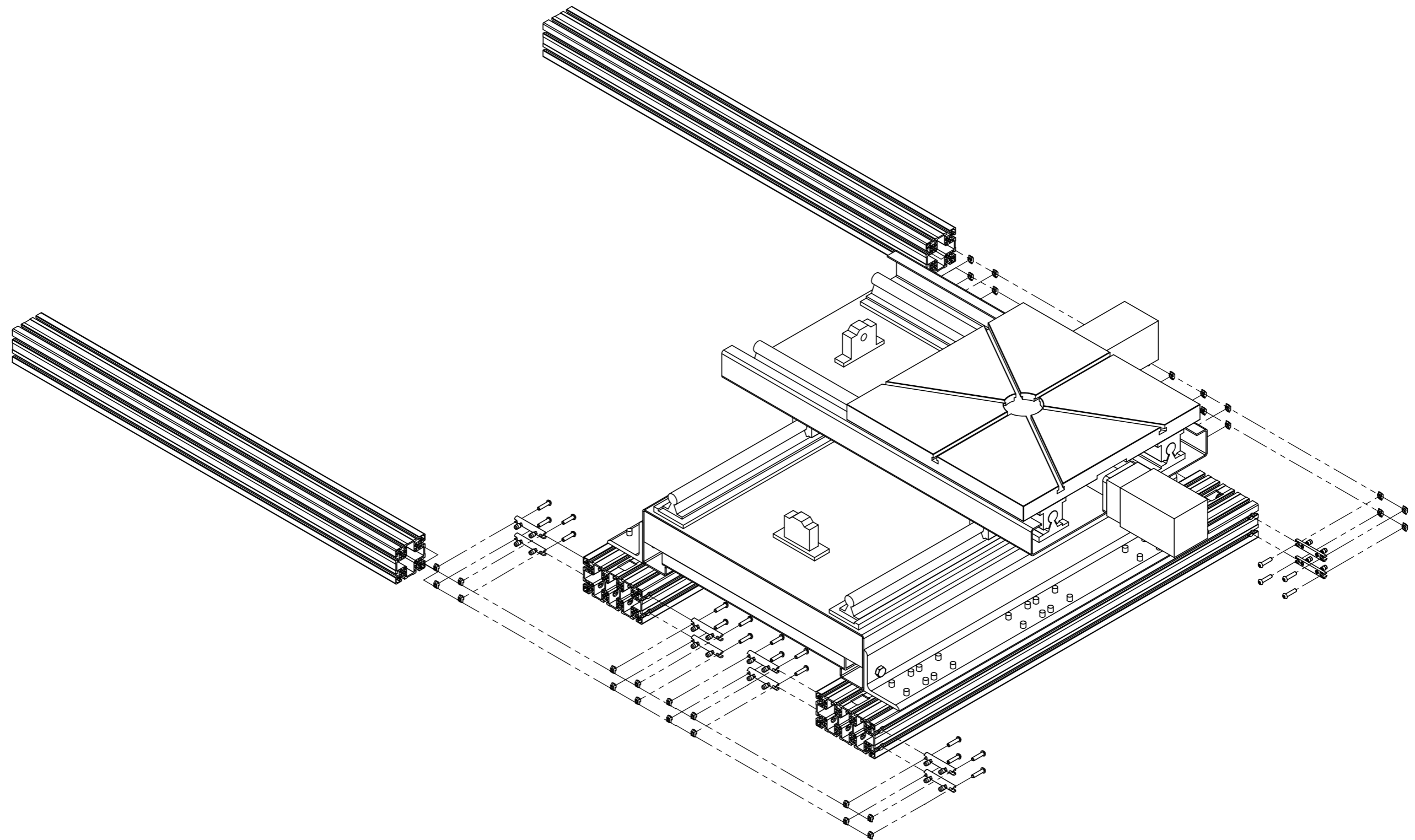


	Data	Nome
Desenhou	27/08/2016	Diogo Costa
Verificou		
Homologou		

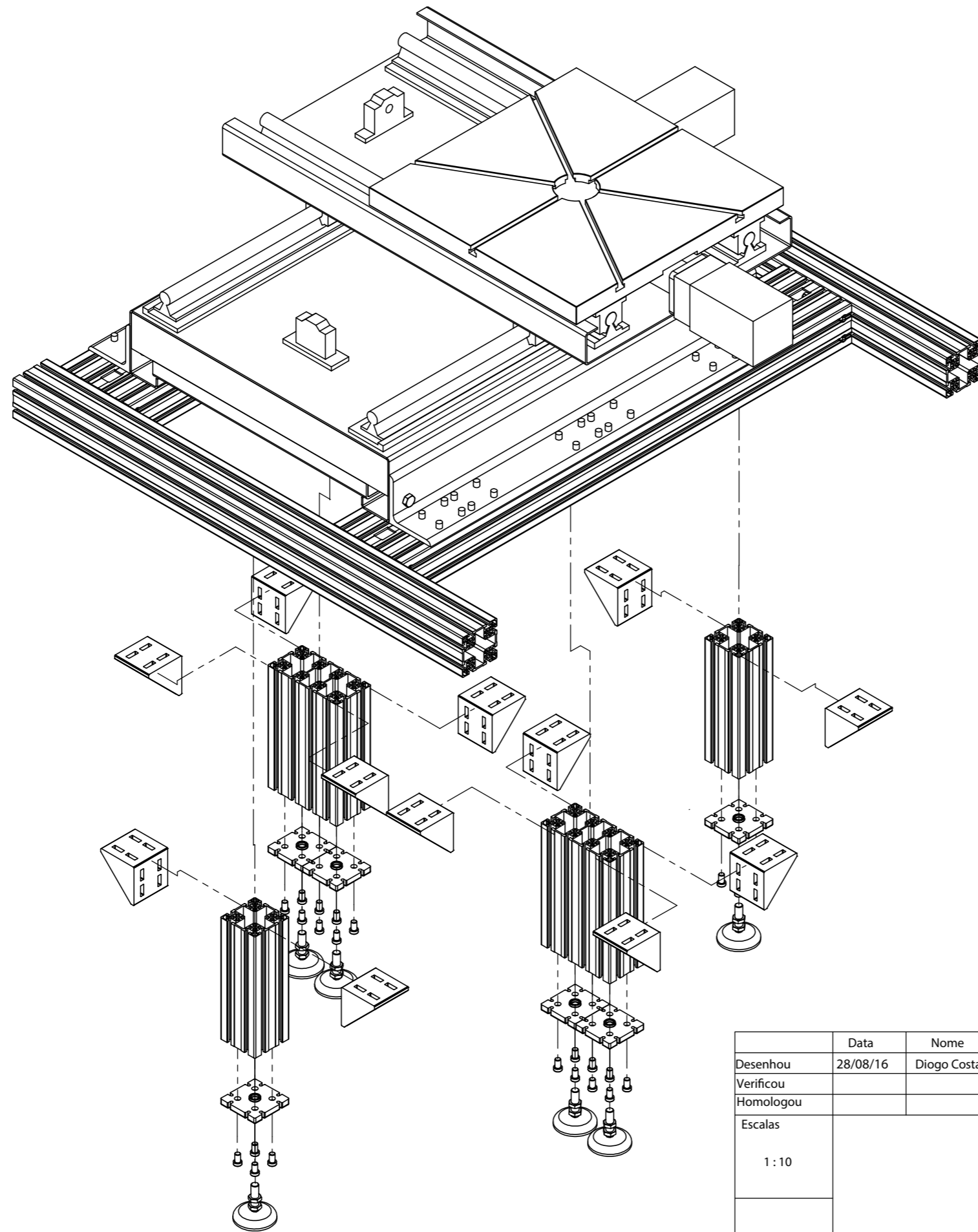
F.E.U.P  
Faculdade de Engenharia da Universidade  
do Porto

Escalas
1 : 15
A4

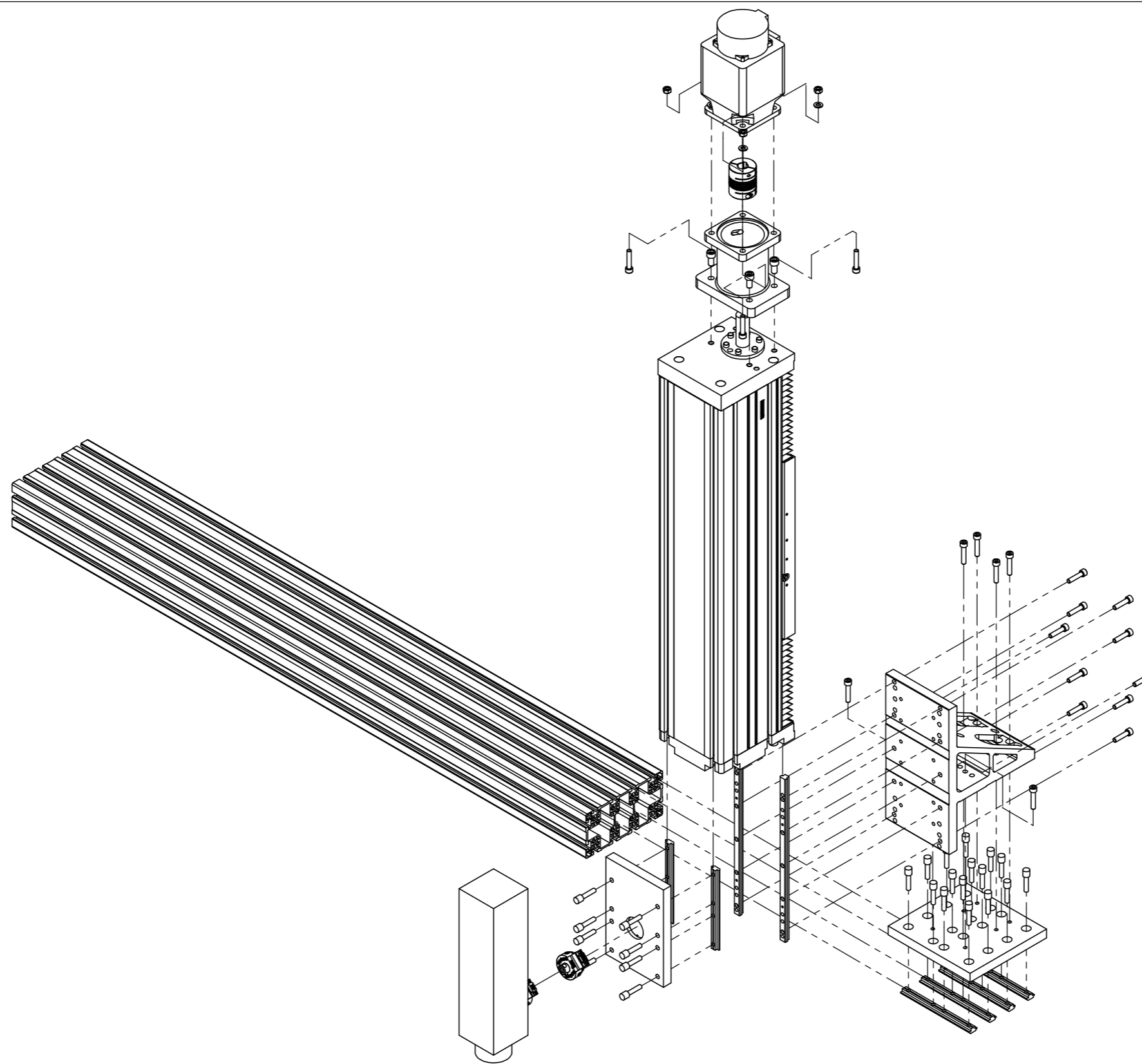
Montagem da mesa de posicionamento  
aos perfis 100x100x1300mm



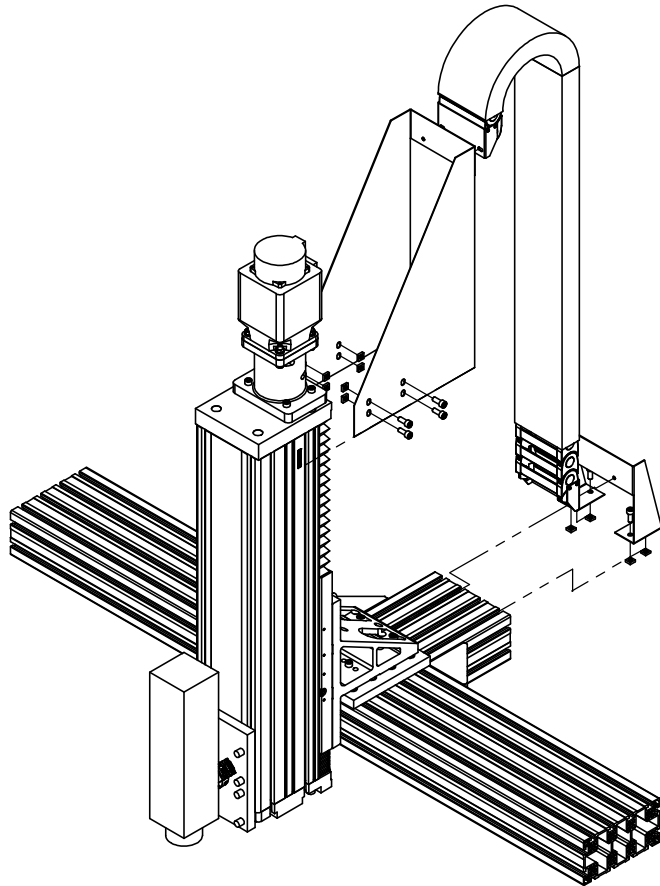
	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Desenhou	28/08/16	Diogo Costa	
Verificou			
Homologou			
Escalas	Montagem da mesa de posicionamento na estrutura		
1:10			
A3			



	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto	
Desenhou	28/08/16	Diogo Costa		
Verificou				
Homologou				
Escalas				Folha
1:10	Montagem das bases na mesa			
A3				



	Data	Nome	F.E.U.P	
Desenhou	28/08/16	Diogo Costa	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto	
Verificou				
Homologou				
Escalas				Folha
1:10	Montagem do eixo vertical			
A3				

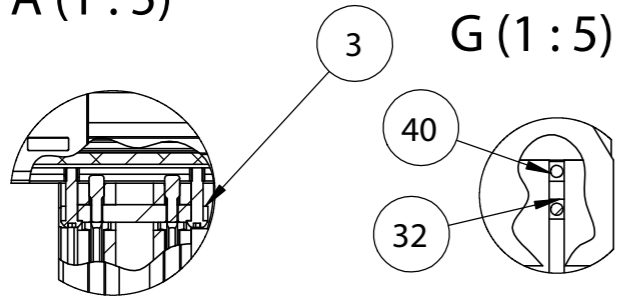


	Data	Nome
Desenhou	28/08/2016	Diogo Costa
Verificou		
Homologou		
Escalas		
1:14		
A4		

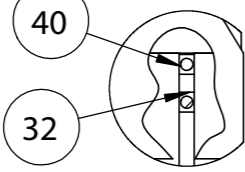
F.E.U.P  
 Faculdade de Engenharia da Universidade  
 do Porto

### Montagem do porta cabos

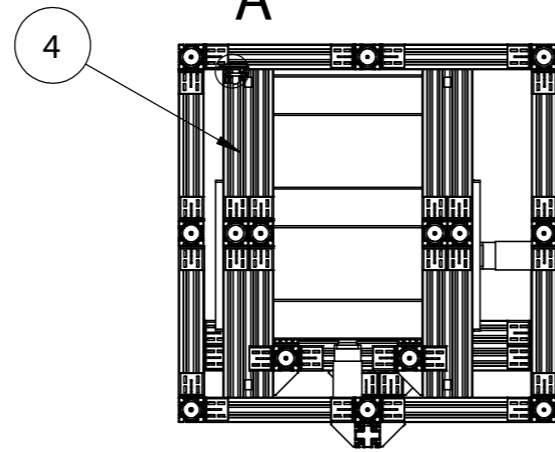
A (1:5)



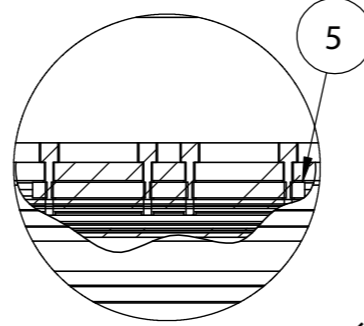
G (1:5)



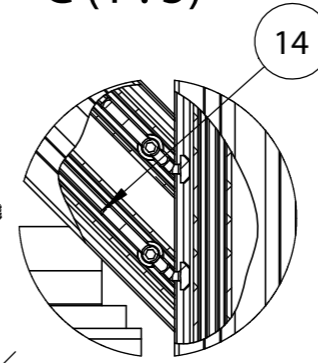
A



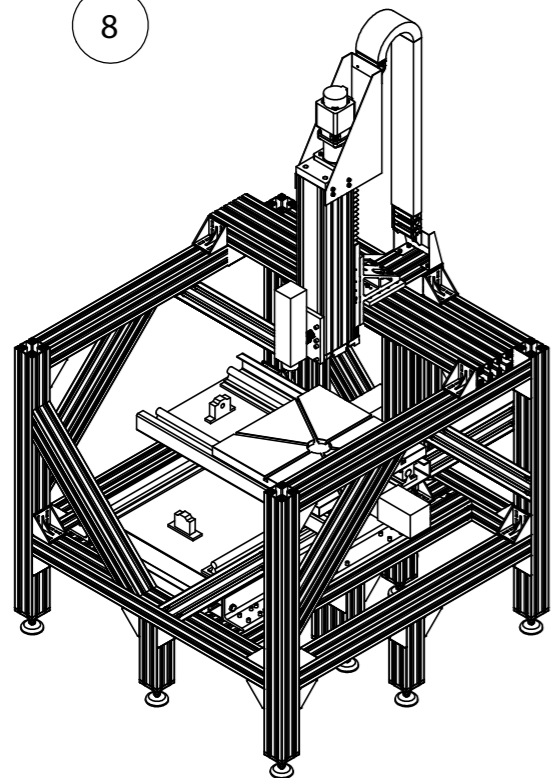
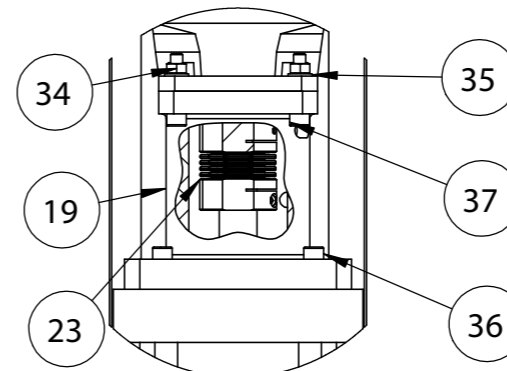
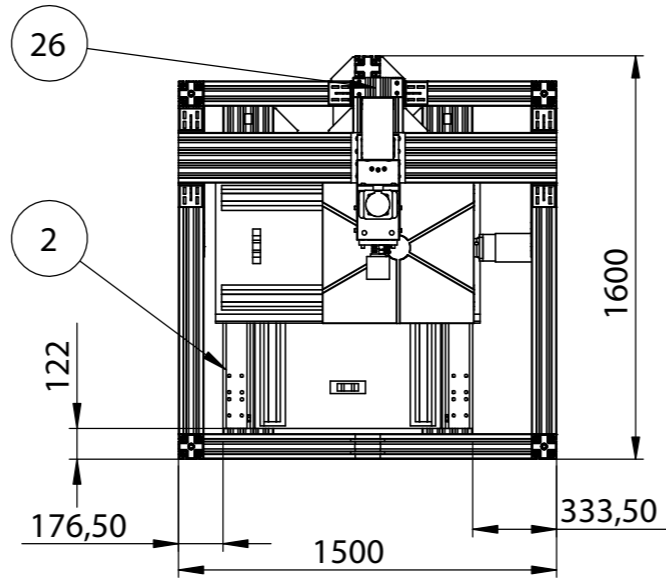
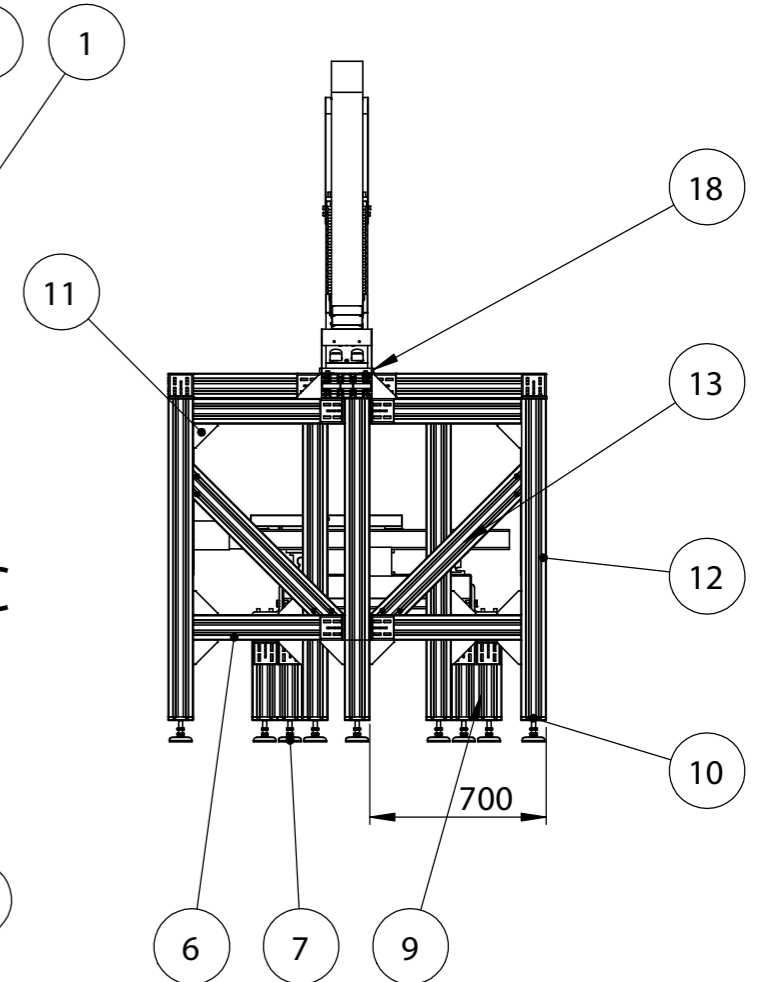
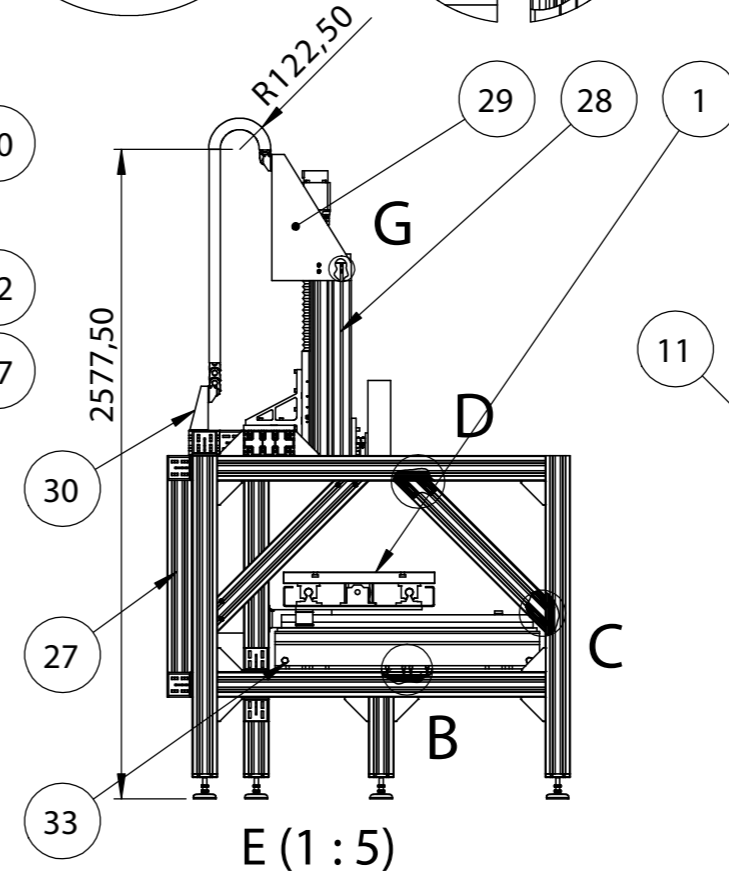
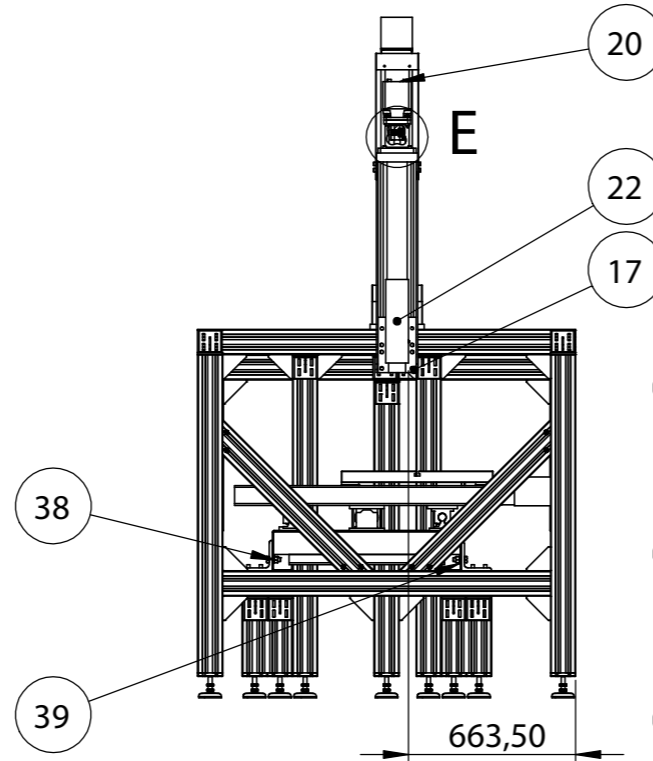
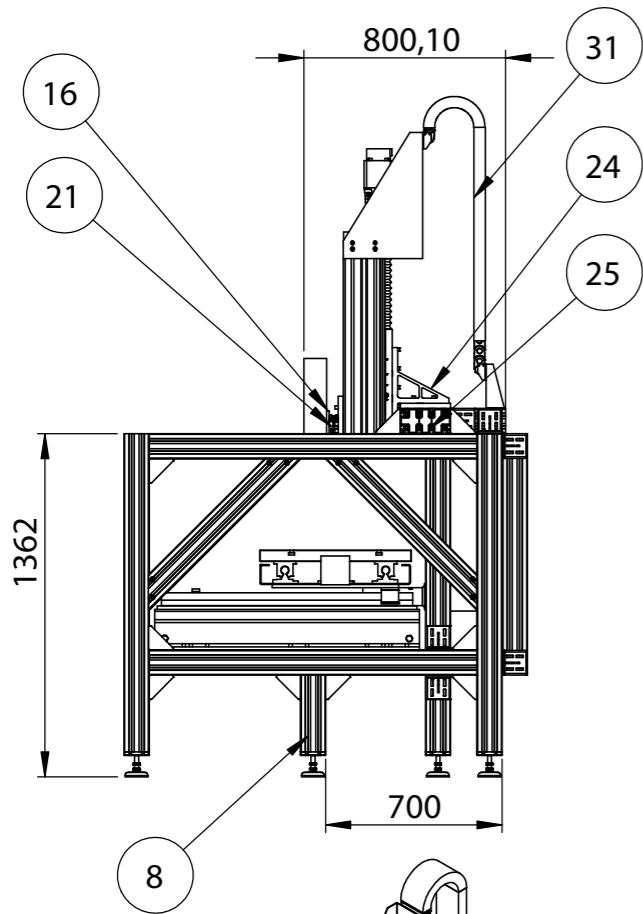
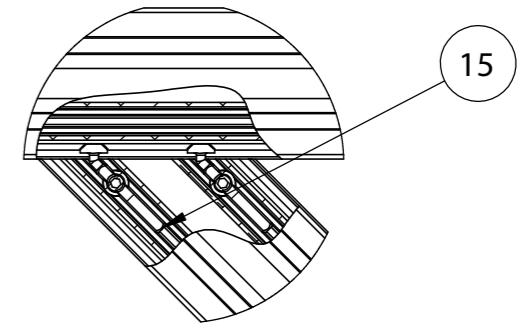
B (1:5)



C (1:5)



D (1:5)



		Data	Nome	F.E.U.P	
Desenhou		28/08/16	Diogo Costa	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto	
Verificou					
Homologou					
Escala					Folha
1:30					1 / 3
A3		Estrutura de suporte			

32	Porca TM8	ISO 299	12	Aço	Galvanizado
31	Porta cabos 124x45x1320		1		
30	Apoio perfil porta cabos		1	Alumínio	
29	Apoio MKK porta cabos		1	Alumínio	
28	Módulo linear MKK1-65		1		
27	Perfil 100x100x958		1		
26	Perfil 100x200x218		1		
25	Perfil 100x200x1500		1		
24	Esquadro		1		
23	Acoplamento MBCK51-25-19		1		
22	Spindle		1		
21	SCHUNK SWS-011		1		
20	Motor FXM31		1		
19	luneta _mkk165		1	Al7075	
18	Interface Esquadro Perfil		1	Al 7075	
17	interface entre SWS-011 e MKK165		1	Al 7075	
16	interface 90 graus		1	Al 7075	
15	Conetor angular (-)45°		32		
14	Conetor angular 45°		32		
13	Perfil 100x100x849_45		8		
12	Perfil 100x100x1262		6		
11	Bracket 100X100		69		
10	Base plate		14		
9	Perfil 100x200x304		2		
8	Perfil 100x100x304		4		
7	Leveling foot		14		
6	Perfil 100x100x1300		7		
5	Profile connector 180		18		
4	Perfil 100x200x1300		2		
3	Bolt connector		16		
2	Cantoneira 120x120x12		2	S275JR	Pintado
1	Mesa de posicionamento		1		
ITEM NO.	Designação	Norma	QTY.	Material	Obs.
	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto		
Desenhou	28/08/2016	Diogo Costa			
Verificou					
Homologou					
Escalas					Folha
A4	Estrutura de suporte-Lista de artigos				2 / 3

40	Parafuso CHC M8x20	ISO 4762	16	Aço	Galvanizado
39	Anilha plana M16	ISO 7089	4	Aço	Galvanizado
38	Porca Hexagonal M16-8	ISO 4032	4	Aço	Galvanizado
37	Parafuso CHC M8 x 40	ISO 4762	8	Aço	Galvanizado
36	Parafuso CHC - M10x20	ISO 4762	4	Aço	Galvanizado
35	Anilha plana M8	ISO 7089	4	Aço	Galvanizado
34	Porca Hexagonal M8-8	ISO 4032	4	Aço	Galvanizado
33	Parafuso c. hexagonal M16 x 45	ISO 4017	4	Aço	Galvanizado
ITEM NO.	Designação	Norma	QTY.	Material	Obs.
	Data	Nome	F.E.U.P Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto		
Desenhou	28/08/2016	Diogo Costa			
Verificou					
Homologou					
Escalas	Estrutura de suporte-Lista de artigos				Folha
A4					