



**Pedro Miguel Oliveira  
Duarte**

**Projeto de máquina de fabrico aditivo de metais**

"Engineering isn't about perfect solutions. It's about doing the  
best you can with limited resources."

Randy Pausch





**Pedro Miguel Oliveira  
Duarte**

**Projeto de máquina de fabrico aditivo de metais**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de António Manual de Bastos Pereira, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Este trabalho teve o apoio financeiro dos projetos UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020 - FCT - Fundação para Ciência e Tecnologia; e CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), no âmbito do Acordo de Parceria Portugal 2020, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional



## **O júri / The jury**

Presidente / President

**Prof. Doutor António Manuel Godinho Completo**

Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

**Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira**

Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro (orientador)

**Doutor Francisco José Gomes da Silva**

Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto (arguente)



**Agradecimentos /  
Acknowledgements**

Um especial agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira por toda a sua disponibilidade e conhecimento transmitido ao longo deste período.

Aos meus pais por me proporcionarem esta oportunidade de ensino.

Aos meus amigos por terem sido essenciais ao longo destes anos, contribuindo para um bem-estar e toda a ajuda necessária.

Por fim, à Universidade de Aveiro e ao Departamento de Engenharia Mecânica pelas condições que me proporcionaram durante a minha formação.





**Palavras-chave**

DMLS; Sinterização; Pó Metálico; Projeto Mecânico; Elementos Finitos; Ansys.

**Resumo**

O presente projeto tem como principal objetivo o desenvolvimento da componente mecânica de uma máquina de fabrico aditivo (FA) de metais, para posterior construção e operação no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Aveiro. É uma tecnologia de fabricação de peças metálicas recente, com crescente utilização em torno de geometrias complexas. Inicialmente é realizada a otimização do sistema de fabrico de uma máquina já existente no departamento, com vista a melhorar os tempos e custos de fabrico. De seguida, é proposta uma nova e melhorada versão da máquina, com um design inovador e com dispositivos que permitam uma melhor operação desta, contribuindo para uma maior qualidade dos componentes produzidos. Mais tarde, a validação dos componentes mecânicos é realizada recorrendo a uma análise numérica, usando o software de elementos finitos Ansys.



**Keywords**

DMLS; Sintering; Metal Powder; Mechanical Project; Finite Elements; Ansys.

**Abstract**

The main goal of the current project it is to develop the mechanical components of a metal sintering machine, for future construction and operation in the Mechanical Engineering Department of Aveiro's University. It is a recent technology for metal parts fabrication, with increasing usage around complex geometries. Initially, it is performed the optimization of an already develop machine, currently operating in the department, with the intention of improving manufacturing time and costs. After, a new and innovated design is developed, with devices controlling its operation, in order to increase the quality of the final product. Afterwards, to validate all systems, Ansys software is used to perform a finite element analysis.



# Índice

<b>Índice</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>vi</b>
<b>Siglas e Abreviaturas</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento . . . . .	2
1.2 Objetivos . . . . .	6
1.3 Estrutura . . . . .	7
<b>2 Otimização do Sistema Existente</b>	<b>9</b>
2.1 Área de Trabalho e Reservatório . . . . .	10
2.2 Varredor . . . . .	12
2.3 Gás Inerte . . . . .	13
2.4 Síntese . . . . .	14
<b>3 Solução Proposta</b>	<b>17</b>
3.1 Descrição Geral . . . . .	17
3.2 Varredor . . . . .	19
3.3 Distribuição do Pó . . . . .	22
3.4 Mesa de Construção . . . . .	25
3.4.1 Êmbolo de Trabalho . . . . .	27
3.4.2 Área de Trabalho . . . . .	29
3.5 Estrutura de Isolamento . . . . .	29
3.6 Estrutura de Suporte . . . . .	34
3.7 Sensorização . . . . .	37
3.7.1 Concentração de Oxigénio . . . . .	37
3.7.2 Homogeneidade da Câmara . . . . .	37
3.7.3 Controlo Visual . . . . .	38

<b>4</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>41</b>
4.1	Condições de Utilização . . . . .	41
4.1.1	Acionamento . . . . .	41
4.1.2	Necessidades . . . . .	43
4.2	Suportes . . . . .	49
4.2.1	Esforços . . . . .	49
4.2.2	Rolamentos . . . . .	51
4.2.3	Casquilhos . . . . .	53
4.3	Elementos de Transmissão de Potência . . . . .	53
4.4	Ligações Mecânicas . . . . .	55
4.4.1	Chavetas . . . . .	55
4.4.2	Acoplamentos . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Modelação Numérica</b>	<b>59</b>
5.1	Rolo Distribuidor . . . . .	60
5.2	Varredor . . . . .	62
5.3	Mesa de Construção . . . . .	64
5.4	Estrutura de Suporte . . . . .	66
5.5	Síntese . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos futuros</b>	<b>69</b>
6.1	Conclusões . . . . .	69
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	71
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>74</b>
<b>A</b>	<b>Anexos</b>	<b>75</b>
A.1	Solução Otimizada . . . . .	75
A.2	Solução Proposta . . . . .	95

# Lista de Tabelas

1.1	Condições e parâmetros controláveis no processo <i>Direct Metal Laser Sintering</i> (DMLS) [6]. . . . .	6
2.1	Síntese das modificações. . . . .	14
2.2	Custo da implementação da otimização. . . . .	14
4.1	Condições de utilização admissíveis. . . . .	42
4.2	Necessidades motoras. . . . .	47
4.3	Seleção dos motores elétricos. . . . .	47
4.4	Reações nos apoios. . . . .	50
4.5	Cálculos para o dimensionamento dos rolamentos. . . . .	52
4.6	Rolamentos selecionados. . . . .	53
4.7	Dimensionamento das porcas em polímero. . . . .	55
4.8	Ligações mecânicas. . . . .	56
4.9	Acoplamentos selecionados. . . . .	58
6.1	Comparação entre as diversas máquinas do tempo no varredor. . . . .	69
6.2	Custo do sistema proposto. . . . .	70
A.1	Lista de produtos a adquirir. . . . .	95





# Lista de Figuras

1.1	Diagrama de fabrico aditivo (FA) metálico (imagem adaptada de [1]). . . . .	1
1.2	Aplicações usando o FA de metais. . . . .	2
1.3	Máquina de FA DMLS EOS M400-4 [1]. . . . .	2
1.4	Esquema de funcionamento geral de FA [6]. . . . .	3
1.5	Utilização de suportes geométricos (imagem adaptada de [2]). . . . .	4
1.6	Descrição do <i>balling phenomena</i> (imagem adaptada de [10]). . . . .	5
1.7	Processo <i>Hot Isostatic Pressing</i> (HIP) (imagem adaptada de [8]). . . . .	7
1.8	Máquina de FA existente no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM). . . . .	8
2.1	Descrição funcional da máquina de FA existente no DEM. . . . .	9
2.2	Descrição funcional dos sistemas motorizados nas plataformas elevatórias. . . . .	10
2.3	Mesa de trabalho de menores dimensões. . . . .	11
2.4	Plataformas de menor dimensão. . . . .	11
2.5	Montagem da nova mesa de trabalho. . . . .	12
2.6	Alterações realizadas ao sistema de distribuição de pó. . . . .	12
2.7	Sistema de fluxo de gás inerte. . . . .	13
2.8	Renderização final da otimização. . . . .	15
3.1	Novo design da máquina DMLS. . . . .	18
3.2	Descrição geral do novo sistema. . . . .	18
3.3	Sistema varredor lateral. . . . .	19
3.4	Detalhes do sistema varredor lateral. . . . .	19
3.5	<i>Design</i> final do varredor. . . . .	20
3.6	Descrição funcional do varredor. . . . .	21
3.7	Utilização de rolos no varredor (imagem adaptada de [15]). . . . .	22
3.8	Distribuidor de pó. . . . .	23
3.9	Detalhe do mecanismo de distribuição. . . . .	23
3.10	Mecanismo de distribuição de pó. . . . .	24
3.11	Varredor no interior da câmara de fabrico. . . . .	25
3.12	Plataforma da mesa de construção. . . . .	26
3.13	Descrição funcional da mesa de trabalho. . . . .	26
3.14	Sistema de aquecimento do êmbolo de trabalho. . . . .	27
3.15	Placa de aquecimento cerâmico. . . . .	28
3.16	Área de trabalho removível. . . . .	29
3.17	Estruturas de isolamento. . . . .	30
3.18	Análise térmica da câmara de fabrico usando o método de elementos finitos. . . . .	31
3.19	Interior da câmara de trabalho. . . . .	32

3.20	Equipamento de filtragem de gás. . . . .	33
3.21	Cabeça galvanométrica. . . . .	33
3.22	Estrutura de suporte. . . . .	34
3.23	Montagem dos mecanismos responsáveis pela movimentação do pó. . . . .	35
3.24	Detalhe da montagem dos mecanismos. . . . .	35
3.25	Renderização final. . . . .	36
3.26	Sensor de oxigénio. . . . .	37
3.27	Instalação do sensor de oxigénio. . . . .	37
3.28	Termopar utilizado. . . . .	38
3.29	Localização dos termopares. . . . .	38
3.30	Aplicações de utilização da câmara. . . . .	39
3.31	Câmara de infravermelhos usada. . . . .	39
3.32	Instalação da câmara de infravermelhos. . . . .	40
4.1	Perfil de velocidade de um motor elétrico. . . . .	41
4.2	Comparação entre modelação rígida e flexível. . . . .	45
4.3	Configurações das análises dinâmicas de corpo rígido das necessidades motoras para os diferentes sistemas. . . . .	46
4.4	Curva velocidade-binário do motor STM23R-2E. . . . .	48
4.5	Motor de passo com <i>encoder</i> e placa de controlo integrados. . . . .	49
4.6	Configurações das análises dinâmicas de corpo rígido dos esforços nos suportes dos diferentes sistemas. . . . .	50
4.7	Acoplamentos usados nas ligações aos motores elétricos. . . . .	57
5.1	<i>Setup</i> da análise numérica ao rolo distribuidor. . . . .	60
5.2	Tensões e deformações no rolo distribuidor. . . . .	61
5.3	Verificação das ligações mecânicas. . . . .	62
5.4	<i>Setup</i> da análise numérica ao varredor. . . . .	62
5.5	Tensões e deformações no varredor. . . . .	63
5.6	Verificação das deformações em y. . . . .	63
5.7	Verificação das ligações mecânicas. . . . .	64
5.8	<i>Setup</i> da análise numérica na mesa de trabalho. . . . .	64
5.9	Tensões e deformações na mesa de trabalho. . . . .	65
5.10	Verificação das ligações mecânicas. . . . .	66
5.11	<i>Setup</i> da análise numérica à estrutura de suporte. . . . .	66
5.12	Tensões e deformações na estrutura de suporte. . . . .	67
5.13	Verificação das ligações mecânicas. . . . .	68

# Siglas e Abreviaturas

**CAD** *Computer Aided Design*. Software utilizado para os projetos e desenhos digitais de componentes.

**DEM** Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

**DMLS** *Direct Metal Laser Sintering*. Processo de fabrico aditivo recorrendo à sinterização de camadas de pó.

**FA** Fabrico aditivo. Técnica de fabrico de componentes por adição de material.

**HIP** *Hot Isostatic Pressing*. É um processo utilizado para melhorar as propriedades mecânicas de componentes, recorrendo à pressão isostática a quente.

**SLM** *Selective Laser Melting*. Processo de fabrico aditivo recorrendo à fusão de camadas de pó.



# Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
L	Litros	l
$\varnothing$	Diâmetro	mm
$^{\circ}\text{C}$	Graus celsius	$^{\circ}\text{C}$
$\tau_n$	Binário necessário	N · m
$\tau_e$	Binário estático	N · m
$\tau_d$	Binário dinâmico	N · m
$F_{axial}$	Força axial	N
$P$	Passo do fuso	m
$m_n$	Massa do componente	kg
$g$	Aceleração gravítica	$\text{m/s}^2$
$\tau_{dx}$	Binário dinâmico movimento linear	N · m
$\tau_{dr}$	Binário dinâmico movimento rotação	N · m
$F_{dx}$	Força aceleração linear	N
$a$	Aceleração linear	$\text{m/s}^2$
$J_{ij}$	Momento de inércia do conjunto para cada eixo	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$J_{nij}$	Momento de inércia do componente $n$ no eixo $ij$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$\alpha_w$	Aceleração angular do conjunto para cada eixo de rotação	$\text{rad/s}^2$
$\tau_f$	Binário final necessário	N · m
$\tau_{max}$	Binário máximo	N · m
$\eta_s$	Rendimento do sistema de transmissão usado	-
$\eta_m$	Folga dada ao motor	-
$F_r$	Carga radial	N
$F_x$	Carga axial	N
$C_o$	Capacidade de carga estática	N
$f_s$	Coefficiente de segurança	-
$P_o$	Carga estática equivalente	N
$X_0$	Fator radial estático	-
$Y_0$	Fator axial estático	-
$C$	Capacidade de carga dinâmica	N
$f_l$	Fator de esforços dinâmicos	-
$P$	Carga dinâmica equivalente	N
$f_n$	Fator de rotação	-
$f_t$	Fator de temperatura	-
$X$	Fator radial dinâmico	N
$Y$	Fator axial dinâmico	N
$F_{a.max}$	Força axial máxima na porca	N

$P_{max}$	Pressão superficial máxima	MPa
$A_r$	Área resistente	mm <sup>2</sup>
$P_{Vmax}$	Pv máxima	MPa · m/s
$n$	Velocidade angular	rpm
$d_1$	Diâmetro do passo	m
$\tau_a$	Tensão de corte	MPa
$\tau_{a.adm}$	Tensão de corte admissível	MPa
$L$	Comprimento útil da chaveta	m
$b$	Largura da chaveta	mm
$d$	Diâmetro do veio	mm
$\sigma_d$	Tensão de esmagamento	MPa
$\sigma_{a.adm}$	Tensão de esmagamento admissível	MPa
$h$	Altura da chaveta	mm
$t_1$	Altura da chaveta no veio	mm
$\tau_{kmax}$	Binário máximo de operação	N · m
$f_{st}$	Fator de temperatura de funcionamento	-
$f_{sz}$	Fator de arranques por hora	-
$f_{sr}$	Fator de direcional do movimento	-
$f_{sb}$	Fator de aplicação em concreto	-



# Capítulo 1

## Introdução

O fabrico aditivo (FA) tem sofrido uma drástica evolução nas últimas duas décadas. É um processo que permite a produção de qualquer tipo de forma geométrica, devido à sua técnica de fabrico. A peça é formada por diversas camadas de material, ao invés dos comuns processos de subtração de material presentes na indústria. Existe uma grande simplicidade no início do processo de fabrico, partindo do ficheiro de modelação gráfica CAD (*Computer Aided Design*) para a máquina a produzir, com reduzidos processos intermédios, tal como descrito na figura 1.1.

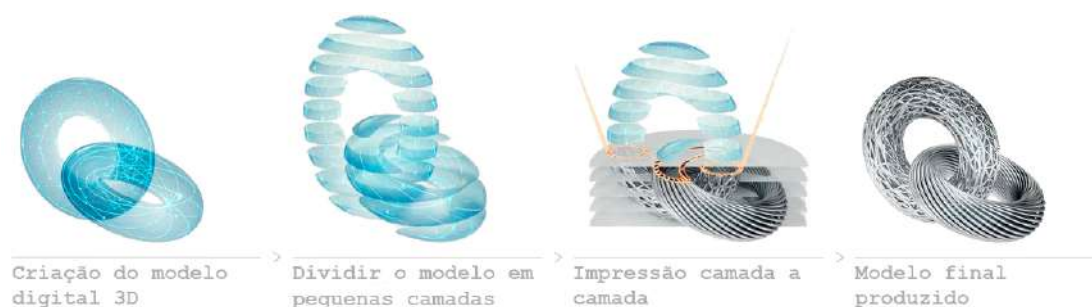


Figura 1.1: Diagrama de fabrico aditivo (FA) metálico (imagem adaptada de [1]).

Devido à liberdade geométrica que este processo de fabrico permite, é ideal para levar um produto ao limite, de modo a otimizar a sua *performance*, tirando o seu máximo partido. Tal fabrico recorrendo aos métodos tradicionais seria muito difícil ou até impossível. Com o aumento de complexidade geométrica, mais indicado este processo é, dado que o seu custo por peça não é dependente da sua complexidade, excetuando situações em que os suportes de construção são de difícil remoção e precisam de pós-processamento [2]. No entanto, o FA é dispendioso para a fabricação de geometrias simples. Para uma grande quantidade de peças e aumento da produtividade, tentando assim competir com os processos convencionais, certos fabricantes têm implementado múltiplos lasers nas suas máquinas, permitindo também um aumento da área de trabalho e tamanho máximo das peças [1].

Esta área do FA tem recebido especiais aplicações por parte da indústria aeroespacial, medicinal e até automóvel [3]. Na figura 1.2 encontram-se alguns exemplos mais notáveis das suas aplicações.





(a) Fabrico do travão do Bugatti Chiron usando *Selective Laser Melting* (SLM) [4].



(b) Fabrico de um componente da câmara de combustão do foguete SuperDraco da SpaceX, usando *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) [5].

Figura 1.2: Aplicações usando o FA de metais.

## 1.1 Enquadramento

O método *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) é um processo específico de muitos dedicados ao FA de metais e tem por base a sintetização de finas camadas de pó e a sua sobreposição, até formar a peça. Foi desenvolvido em 1994 pela empresa EOS e RPI e começou a ser comercializado no ano seguinte [6]. O mais comum é utilizar camadas de pó com espessura entre 20 e 50  $\mu\text{m}$ , permitindo atingir resoluções até 20  $\mu\text{m}$  [6]. É capaz de produzir peças com elevada densidade material, até 95 % [7]. Os materiais mais comuns a serem processados são aços de liga, aços inoxidáveis, alumínio, titânio, bronze, cobalto-cromo e alguns aços para ferramentas. Na figura 1.3 é possível observar uma das máquinas da empresa EOS.



Figura 1.3: Máquina de FA DMLS EOS M400-4 [1].

A figura 1.4 apresenta um esquema de funcionamento geral deste processo de FA. É composto principalmente por três diferentes plataformas. A primeira, à direita, é a plataforma dedicada ao pó. É aí que é armazenado o pó necessário para fabricar a peça. No centro, encontra-se a mesa principal, junto da qual está a mesa de trabalho, onde ocorre a sinterização. Mais à esquerda, encontra-se o depósito de excesso de pó que não é necessário no fabrico, dado que é distribuído pó em excesso sobre a zona de trabalho de modo a garantir pó suficiente e homogêneo repartido. Destas três plataformas, apenas as duas primeiras é que tem de ser necessariamente motorizadas, de modo a garantir a correta quantidade de pó. A variação de altura de cada uma das plataformas entre cada camada de pó, corresponde à sua espessura. Esta variação é de igual magnitude para ambas, em que a plataforma de reservatório possui movimento ascendente e a de trabalho possui movimento descendente. A sua distribuição é garantida usando um varredor, podendo ser em formato de lamina, reto ou até pequenos rolos motorizados.

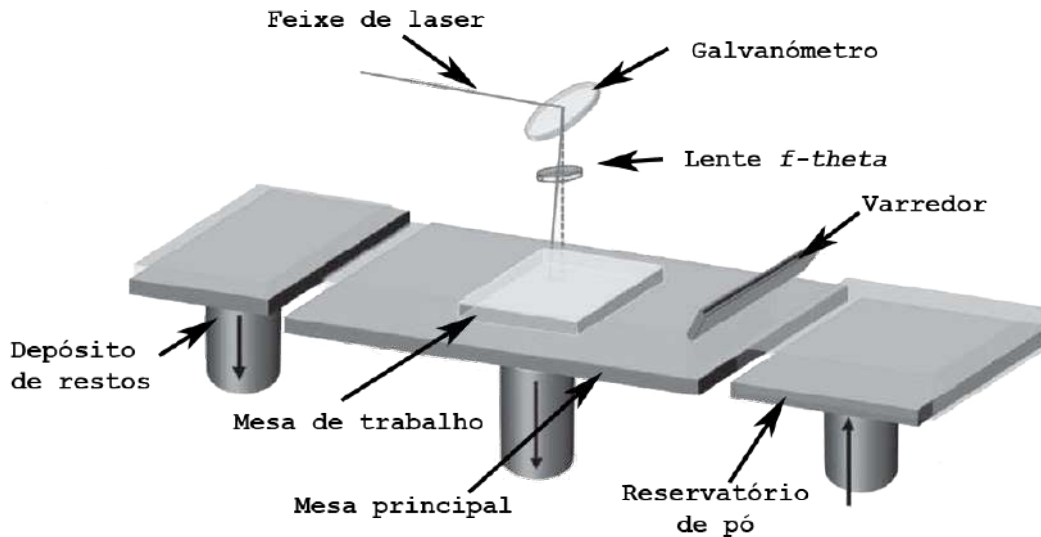


Figura 1.4: Esquema de funcionamento geral de FA [6].

A sinterização é garantida utilizando um laser, normalmente de fibra, que se encontra instalado sobre a mesa de trabalho. A direção do feixe de laser é ajustada por um galvanómetro de dois eixos, constituído principalmente por dois espelhos refletores. Antes deste incidir sobre o pó, é focalizado recorrendo a uma lente  $f$ -theta, compensando assim as regiões na área de trabalho não centradas no galvanómetro. Todo o processo é realizado sob uma atmosfera de gás inerte, de modo a que o pó não reaja com o oxigénio. Esta é constituída por argón ou azoto, dependendo do grau de reatividade do material usado, sendo o último para os mais reativos, tais como o alumínio e titânio. O azoto possui um elevado coeficiente de transmissão térmica, contribuindo para um maior arrefecimento da câmara de fabrico [8]. Esta propriedade é importante quando são usados materiais reativos, dado que estes possuem um elevado índice de explosividade [9]. A percentagem de oxigénio na câmara tem de se situar no máximo a 2% [8], caso contrário o material oxida, aumentando a sua porosidade e impurezas, degradando a sua microestrutura e qualidade final. Está também associada uma questão de segurança devido ao risco de combustão em consequência do fumo libertado durante o processo, sendo estes efeitos mais devastadores no caso de metais reativos devido ao seu elevado índice de explosividade.

De modo a garantir estabilidade da estrutura aquando o seu fabrico, muitas das vezes suportes denominados por naturais são suficientes, referindo-se ao pó que se encontra na mesa de trabalho, mas que não é sinterizado. No entanto, no caso de estruturas muito complexas ou de elevado peso, estes suportes podem não ser suficientes e então é necessário aplicar suportes geométricos. Estes traduzem-se em estruturas de pequenas dimensões e que são adicionadas à geometria a fabricar de forma automática pelo software de FA, antes de esta ser introduzida na máquina. São tidas em conta as condições de fabrico e a peça a fabricar (tal como o seu peso). Por vezes, este tipo de suporte é também utilizado com o intuito de remover o calor da peça durante o seu fabrico, permitindo um arrefecimento mais gradual e controlado, contribuindo para a redução das tensões térmicas. Estes são elaborados de modo a serem facilmente removidos (estrutura reticulada ou treliçada - *lattice*, no inglês), evitando ao máximo os métodos de pós-processamento (Figura 1.5).

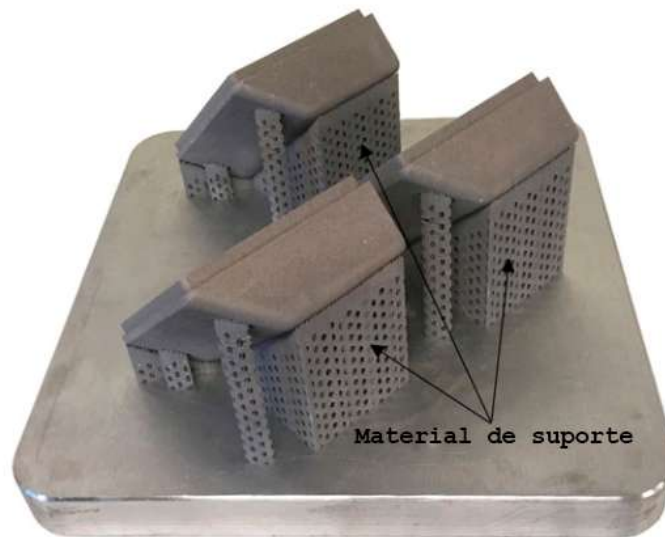


Figura 1.5: Utilização de suportes geométricos (imagem adaptada de [2]).

O DMLS é muito semelhante a um outro processo de FA, denominado *Selective Laser Melting* (SLM), com a principal distinção de este último fundir a camada de pó na totalidade. Sinterizar ao invés de fundir totalmente, garante um processo que consome menos energia, garantindo um maior controlo e consistência da zona de trabalho, dado que o material não se encontra em estado líquido. O SLM tem diversas desvantagens entre as quais se salienta a necessidade de tratamentos térmicos para aliviar as tensões residuais, resultantes das elevadas temperaturas. Deste modo, é possível destacar que a grande vantagem do método DMLS é a capacidade de produzir peças com reduzidos defeitos internos e tensões residuais, dado que as suas partículas de metal são unidas sem recorrer à sua fusão completa, a temperaturas correspondentes a 80 % da temperatura de fusão do metal [6]. No entanto, se a aplicação justificar a necessidade de uma densidade da peça superior àquela obtida normalmente com a sinterização, tratamentos térmicos ou outro tipo de pós-processamento podem ser aplicados com o objetivo de melhorar a qualidade final do produto. Existe também uma diferença relativa aos diferentes materiais suportados pelos dois processos, havendo uma maior variedade no método DMLS.

Pelo facto de ser realizada apenas a sinterização das partículas de pó, surge uma desvantagem deste método, um fenómeno denominado por *balling phenomena*, que resulta da incompleta fusão e ligação entre o pó (Figura 1.6). Tal ocorrência pode ser evitada conjugando os parâmetros da sinterização, tais como a potência do laser, velocidade de varrimento do galvanómetro e com a espessura de cada camada utilizada [10].

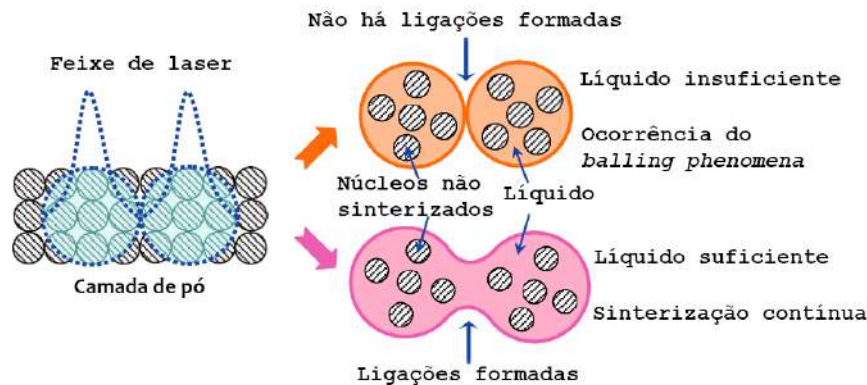


Figura 1.6: Descrição do *balling phenomena* (imagem adaptada de [10]).

Há outros tipos de problemas que são comuns aos diferentes processos de FA de metal, nomeadamente ao DMLS, entre os quais partículas não sinterizadas, poros, fissuras, tensões residuais e elevada rugosidade, e que podem ser controlados tendo em conta os diversos fatores de fabrico e o ambiente na câmara em que estes ocorrem [2]. Na tabela 1.1 estão descritos os principais fatores a ter em atenção neste específico processo de fabrico.

Dependendo da sua finalidade, os componentes produzidos podem ser submetidos a diversos métodos de pós-processamentos, de modo a aperfeiçoar a sua qualidade final, superando certas limitações deste processo de fabrico. De entre estes salientam-se :

- Melhoramentos a nível mecânico, recorrendo a processos térmicos.
- Remoção de suportes, pois dependendo do tipo utilizado, este pode ser de difícil remoção e poderá ser necessário recorrer a ferramentas mais complexas, tais como maquinagem ou serras.
- Melhoramentos de aspeto, nomeadamente maquinagem CNC ou processos abrasivos tais como retificadoras, para diminuir a sua rugosidade quer interior, quer exterior.

Há um processo térmico muito utilizado, denominado por *Hot Isostatic Pressing* (HIP), o qual permite atingir elevadas densidades de material (perto dos 100 %), reduzindo as tensões residuais, porosidades e anisotropias, removendo defeitos no componente [2]. Deste modo aumentam as qualidades mecânicas dos materiais assim como a sua funcionalidade. Este consiste em submeter os componentes a uma câmara com elevada temperatura e pressão provocadas por

Tabela 1.1: Condições e parâmetros controláveis no processo *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) [6].

Condições		Parâmetros de entrada		
Projeto da peça	Características do pó	Fatores na câmara de fabrico	Fatores da máquina	Galvanómetro
Localização dos suportes	Tipo de material	Temperatura e uniformidade	Alinhamento na mesa	Potência do laser
Orientação	Pureza	Concentração de oxigénio	Temperatura de pré-aquecimento	Padrão de scanner
	Tamanho e distribuição	Tipo de atmosfera inerte	Tipo de varredor	Velocidade
	Fração de pó reutilizado	Eficácia na remoção do ar e poluentes	Velocidade varredor	<i>Hatch distance</i>
	Compactação		Espessura da camada	Coerência do feixe
	Absorção e emissão			Integridade da lente

um gás inerte, de modo ao material não reagir quimicamente com o ambiente (Figura 1.7) [8]. É possível atingir porosidades perto da porosidade atingida por processos de fundição, sendo assim reduzida mas nunca eliminada.

Certas soluções podem ser implementadas por via do projeto dos componentes, de modo a combater as tensões residuais [2]. Uma outra solução é recorrer a certos softwares de elementos finitos, que tem em conta as condições de fabrico e calculam as tensões e deformações térmicas esperadas, gerando automaticamente uma geometria de modo a contrariar esse efeito.

## 1.2 Objetivos

Existem dois objetivos na elaboração deste projeto. Inicialmente é pretendido otimizar a máquina de fabrico DMLS existente no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), exposta na figura 1.8.

Existem diversos fatores a modificar e otimizar na presente máquina :

- Diminuição do volume de fabrico → Esta foi inicialmente construída para um elevado volume de fabrico. Tendo em conta a construção da máquina e os seus mecanismos de distribuição de pó, é necessário realizar um elevado investimento na quantidade deste que seja suficiente para garantir o seu funcionamento. É então pretendido uma modificação nos mecanismos de distribuição de pó e mesa de trabalho, de modo a ser necessário uma menor quantidade deste para os

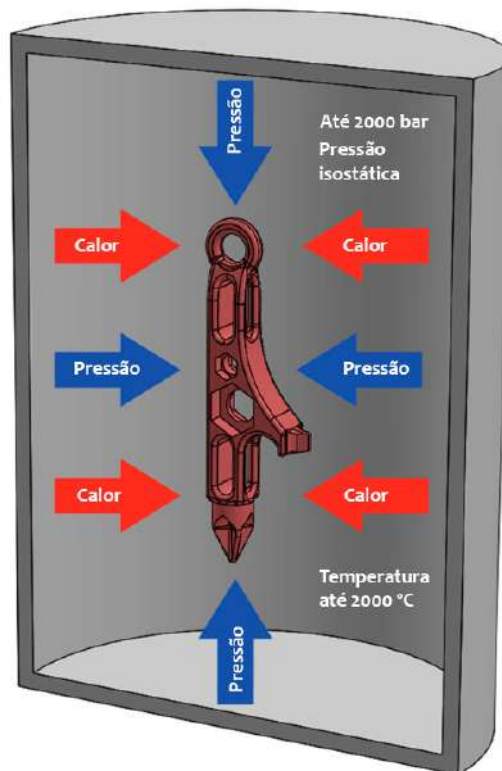


Figura 1.7: Processo *Hot Isostatic Pressing* (HIP) (imagem adaptada de [8]).

casos em que se pretende fabricar apenas pequenas peças. O novo volume de trabalho estipulado seria  $\varnothing 50 \times 50 \text{ mm}^3$ , representando assim uma redução de quase 114 vezes. Devido ao facto da máquina já se encontrar montada e pronta a testes, fazer alterações na estrutura iria ser muito pouco viável. Tendo isto em conta, é necessária uma solução modular, que permita que seja instalada e desmontada com facilidade, sem efetuar alterações no que já foi desenvolvido.

- Atmosfera Inerte → Não existe qualquer tipo de ligações ou sistema que permita à máquina operar em atmosfera inerte, que como já foi referido anteriormente, tem um papel fundamental na sua operação.

O segundo objetivo consiste em apresentar uma solução para uma máquina DMLS mais compacta, com diversas inovações a nível do projeto e controlo, contribuindo para uma melhor qualidade de fabrico das peças finais.

### 1.3 Estrutura

A estrutura deste documento está dividida em seis partes.

Inicialmente é descrito de maneira geral o processo *Direct Metal Laser Sintering*, sendo que a sua compreensão é fundamental para a descrição do restante projeto.



Figura 1.8: Máquina de FA existente no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM).

Nas segunda e terceira frações, são detalhadas as opções consideradas para atingir os dois objetivos desta dissertação.

Na quarta é procedido ao dimensionamento de todos os sistemas envolvidos, correspondentes ao objetivo dois, nomeadamente motores, elementos de transmissão de potência, ligações mecânicas, entre outros.

Na quinta é pretendido validar todo o sistema usando o software de elementos finitos Ansys.

Na última secção é pretendido sintetizar tudo o que foi desenvolvido e refletir sobre as vantagens e desvantagens de cada solução proposta, verificando a sua viabilidade com vista à produção e implementação prática.

## Capítulo 2

# Otimização do Sistema Existente

Começa-se por analisar ao pormenor o sistema já desenvolvido, presente na figura 2.1.

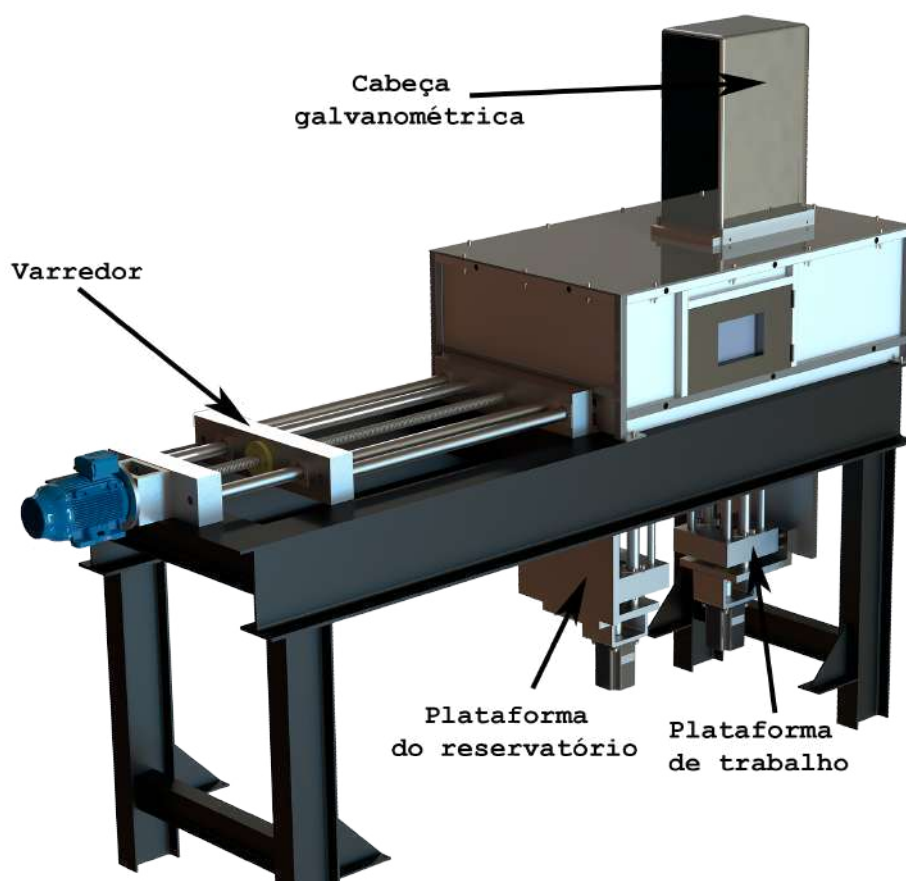


Figura 2.1: Descrição funcional da máquina de FA existente no DEM.

Cada um dos sistemas referidos na Figura 2.1, nomeadamente o varredor, as plataformas do reservatório e de trabalho, e a cabeça galvanométrica, serão discutidos ao longo deste capítulo, de modo a entender o que é possível ser melhorado. A máquina em questão segue uma estrutura muito idêntica à apresentada na figura 1.4.



## 2.1 Área de Trabalho e Reservatório

Na figura 2.2 é possível verificar em detalhe o mecanismo responsável pelo movimento ascendente e descendente da área de trabalho e reservatório.

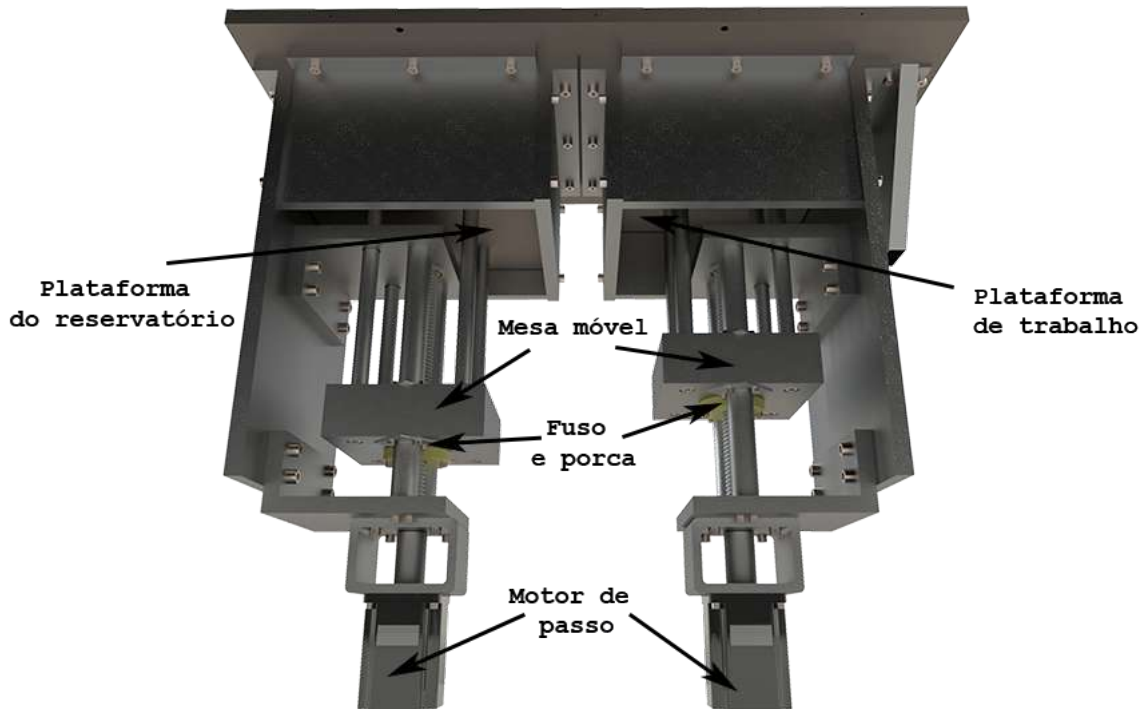


Figura 2.2: Descrição funcional dos sistemas motorizados nas plataformas elevatórias.

Esta estrutura é bastante complexa face ao pretendido, em parte devido à sua dimensão, mas sobretudo ao design estipulado. Devido à elevada quantidade de peças e ligações aparafusadas, apresentou diversas dificuldades na sua montagem e nivelamento, agravadas pelo facto de possuir ligações soldadas entre diversos componentes.

Ambas as plataformas são acionadas por um motor de passo, em que a transferência de movimento rotativo para linear é feito com o uso de um fuso e porca trapezoidal. Esta está instalada numa peça móvel, que por sua vez está ligada às plataformas do reservatório e área de trabalho, sobre as quais serão depositadas pó e ocorrerá a sinterização, respetivamente. É utilizado PTFE para fazer a vedação de cada uma das bases, evitando fugas de pó.

Tendo este sistema em consideração, a solução mais viável de modo a garantir uma menor dimensão destas duas plataformas, seria usar a estrutura já feita para servir de apoio a uma nova estrutura com as dimensões pretendidas. Esta teria de ser de fácil instalação e remoção, sendo que seria apenas usada para a fabricação de peças de pequena dimensão. A solução apresentada encontra-se descrita na figura 2.3 e a sua ligação à estrutura existente foi baseado num sistema de pré-tensão com quatro parafusos.

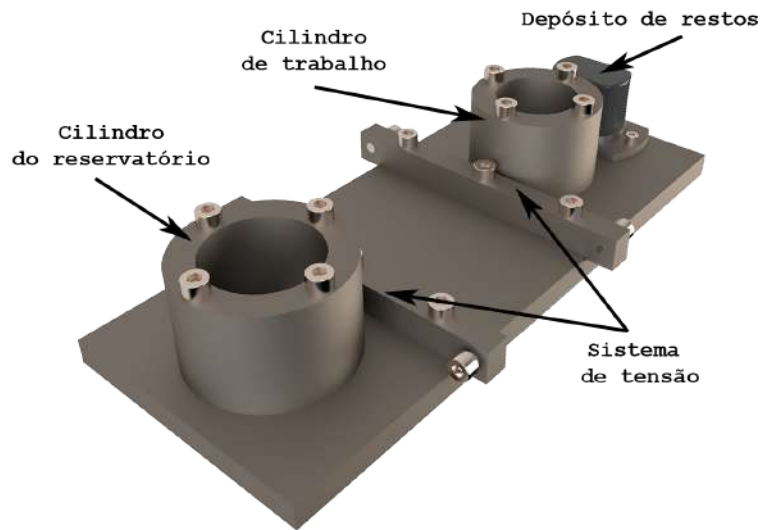
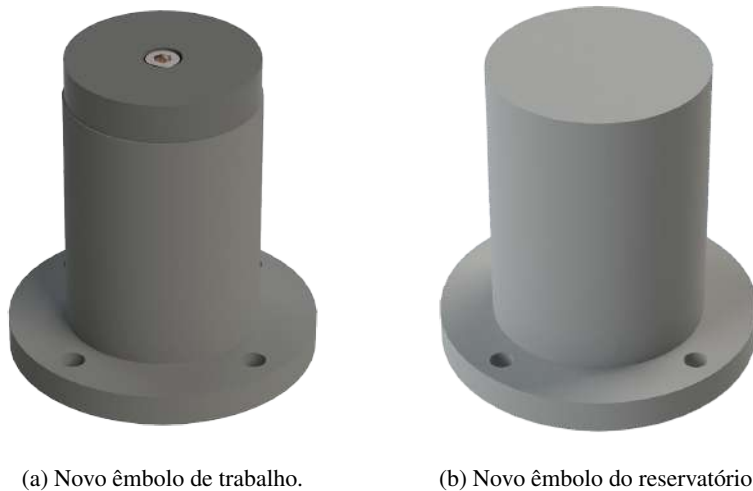


Figura 2.3: Mesa de trabalho de menores dimensões.

Esta é constituída por dois cilindros principais, um para cada plataforma, de modo a confinar o pó no novo volume de produção. Foi adicionado um novo depósito de restos e no centro desta mesa encontra-se o sistema de fixação já referido. As alterações a realizar ao presente sistema são mínimas, sendo apenas necessário pontear as paredes da mesa onde os parafusos serão tensionados, de modo a garantir uma maior estabilidade e fixação da mesa. Estas alterações não impõem qualquer limitação na utilização do sistema original.

Com esta adição é possível aproveitar o sistema de transmissão de movimento linear das duas plataformas, com a simples adição de dois êmbolos que se irão deslocar no interior dos dois cilindros existentes na nova mesa. Estes serão fixos às plataformas já existentes, garantindo o movimento ascendente e descendente (Figura 2.4).



(a) Novo êmbolo de trabalho.

(b) Novo êmbolo do reservatório.

Figura 2.4: Plataformas de menor dimensão.

Devido ao nível de esforços mecânicos serem muito reduzidos, estes são fabricados em teflon, resolvendo assim já o problema da vedação. Foi adotada uma nova geometria, cilíndrica, de modo a facilitar o processo de fabrico. O êmbolo do reservatório apresenta maior área e altura de modo a considerar excessos de pó em cada camada de 15 %.

Na figura 2.5, está demonstrado o resultado final e a montagem dos componentes na estrutura já existente.



Figura 2.5: Montagem da nova mesa de trabalho.

## 2.2 Varredor

O sistema de distribuição do pó pode ser visualizado na figura 2.6. Este tem a função de transportar o pó da plataforma do reservatório para a de trabalho. De modo a evitar o máximo de alterações, um novo varredor é pensado de modo a ser ligado a este já existente. Devido a haver uma variação na elevação da mesa de trabalho, em relação à original, esta tem de ser compensada no varredor, e por isso a parte frontal tem de ser removida, dando lugar a outro componente que permita compensar esta diferença. O contacto entre o varredor e a mesa de trabalho é realizado da mesma maneira, usando teflon. De modo a conter o pó na região e direção necessária, este novo varredor apresenta uma forma em U.



(a) Varredor original.



(b) Novo varredor.

Figura 2.6: Alterações realizadas ao sistema de distribuição de pó.

### 2.3 Gás Inerte

Conforme detalhado inicialmente, o fluxo de gás inerte é fundamental. É necessário adicionar entradas e saídas de gás que permitam o seu fluxo dentro da câmara. De um ponto de vista ambiental, o ideal seria um sistema de recirculação e filtragem de árgon ou azoto, que permitia assim um reaproveitamento do gás. No entanto, este tipo de sistema teria de ser comprado e o seu custo é bastante elevado, não estando de acordo com o orçamento disponível. Tendo isto em conta, e também o facto do custo de árgon ou azoto ser bastante reduzido, atendendo ao baixo caudal do seu consumo em funcionamento da máquina, este não é reaproveitado. Assim teríamos um fluxo de gás mais simplificado. Um fator muito importante, como já foi referido na secção 1.1, é a concentração de oxigénio, o que seria facilmente resolvido com o sistema de recirculação e filtragem de gás. Estes vêm equipados com uma bomba de vácuo, removendo o ar até serem atingidas baixas concentrações de oxigénio e só depois o gás inerte é inserido, permitindo o início da produção. Pelos mesmos motivos, uma bomba de vácuo não é opção, e por isso o fluxo de árgon tem de ser grande o suficiente de modo a expulsar o oxigénio da câmara, e manter a sua concentração a um baixo nível. Como esperado, este fluxo será muito superior àquele do que com um sistema de recirculação, prevendo-se aproximadamente 200 L/hora [11], tendo por base o consumo da máquina EOS M 100, que apresenta um volume de fabrico similar ao existente nesta máquina. Atendendo a que uma garrafa de 12 m<sup>3</sup> de árgon custa cerca de 120 €, conclui-se que o valor do gás será de 1,70 €/hora, pelo que o custo final não é agravado consideravelmente. Naturalmente, apenas com testes práticos e análise à concentração de oxigénio é que é possível concluir com mais afirmação o caudal referido anteriormente. Na figura 2.7 está demonstrado o sistema proposto.



Figura 2.7: Sistema de fluxo de gás inerte.

A circulação de gás é iniciada na garrafa do gás inerte, a qual é conectada à câmara interior de fabrico. A saída é idêntica, sendo que o gás resultante é direcionado para o exterior. Todos os

componentes são facilmente adquiridos e montados, e as modificações na câmara são mínimas. De um ponto de vista ambiental esta opção não é muito correta devido à saída de fumos e contaminantes resultantes da sinterização. Tendo isto em conta, a posição da saída de ar do interior da câmara foi colocada a um nível superior ao nível de trabalho, diminuindo ou até eliminando a saída de pó não sinterizado e respetivos contaminantes. Assim é também possível tirar proveito da diferença de densidade entre os dois gases, dado que o ar apresenta uma menor densidade do que os gases inertes, aumentando a eficácia da sua remoção de forma natural. A entrada e saída de ar encontra-se perpendicular ao movimento do varredor e centrado na zona de trabalho, de modo a maximizar a eficácia da remoção do gás, melhorando o fluxo deste. Estas questões serão detalhadas na secção 3.5.

## 2.4 Síntese

Na tabela 2.1 é possível verificar os resultados da otimização realizada. As diferenças são notáveis, sendo muito significativas para o caso de produção de peças de pequenas dimensões. Tendo em conta que as velocidades lineares dos mecanismos são iguais, ao comparar a diferença dos cursos de trabalho no varredor, é possível verificar que existe uma diminuição de 7,16 segundos por camada. Dado que cada camada tem em média 50  $\mu\text{m}$  e 50 mm de altura por peça, traduzindo-se em mil camadas, a redução do tempo total é de 2 horas. Sendo que este era precisamente o objetivo do projeto, a aplicação destas alterações seria uma solução.

Tabela 2.1: Síntese das modificações.

	Inicial	Final
Volume de trabalho ( $\text{mm}^3$ )	260 x 267 x 160	$\varnothing$ 50 x 50
Curso de trabalho do varredor (mm)	770	322
Tempo de trabalho (s)	12.32	5.16
Câmara inerte	$\times$	$\checkmark$

Foi realizado um orçamento da otimização apresentada, tendo em conta a quantidade de material a adquirir, assim como o tempo despendido para a sua maquinação (Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Custo da implementação da otimização.

Produto	Quantidade	Custo unitário (€)	Custo total (€)
Material (kg)	19.79	2.5	49.5
Maquinagem (horas)	14	30	420.0
Acessórios	-	-	15.0
Somatório (€)			484.5

Os parafusos, componentes pneumáticos, entre outros, estão incluídos nos acessórios. Com um custo de 485 euros, é possível adicionar à máquina uma plataforma que permite reduzir os custos de produção significativamente (tendo em conta o elevado custo do pó metálico), assim como a adição de uma atmosfera inerte.

O resultado da otimização está exposto na figura 2.8 e o projeto completo encontra-se no Anexo A.1.

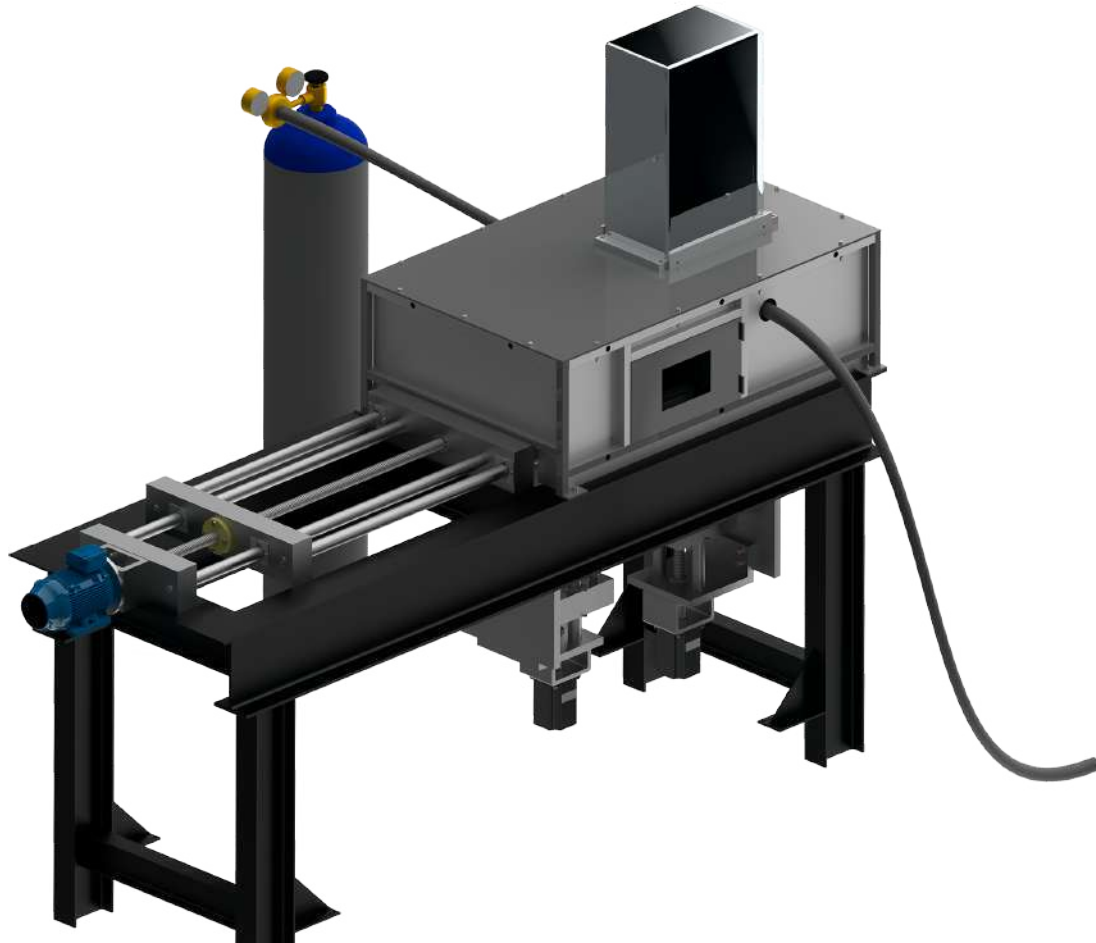


Figura 2.8: Renderização final da otimização.



## Capítulo 3

# Solução Proposta

Neste capítulo é apresentado um projeto de uma máquina DMLS que foi idealizado tendo em conta os problemas e falhas da versão anterior, já construída no departamento.

Foram considerados em especial os seguintes pontos:

- Tempo de fabrico → Os cursos são muito elevados (mesmo o melhorado), sendo possível ainda reduzir o tempo significativamente.
- Acessibilidade → Facilitar o acesso à mesa de trabalho e remoção das peças.
- Tamanho da câmara → Diminuir.
- Melhorar o isolamento térmico → Garantir um melhor isolamento da câmara, especialmente na sua base, sendo inexistente no modelo atual.
- Fluxo do gás inerte (homogeneização) → Fazer uma melhor distribuição do gás, garantindo assim uma atmosfera inerte o mais homogênea possível.
- Extração de poluentes da câmara → O pó não sinterizado que pode contaminar a peça.
- Tratamento dos poluentes → Solução para tratar todos os poluentes resultantes do processo de fabrico.
- Sensorização → Que permita o controlo do processo de fabrico e qualidade da peça. Como se trata de uma máquina para laboratório ainda requer estudos e ensaios de modo a permitir uma correta fabricação. Certos parâmetros, como os expostos na tabela 1.1, são alvo de estudo.

### 3.1 Descrição Geral

O sistema proposto está apresentado na figura 3.1, correspondendo à sua versão final.





Figura 3.1: Novo design da máquina DMLS.

Inicialmente pretende-se demonstrar uma descrição funcional dos seus constituintes (Figura 3.2), detalhando as opções tomadas e possíveis alternativas, convergindo para a versão final. Desde já, salienta-se a sua compactidade e o facto de apenas existir uma plataforma.

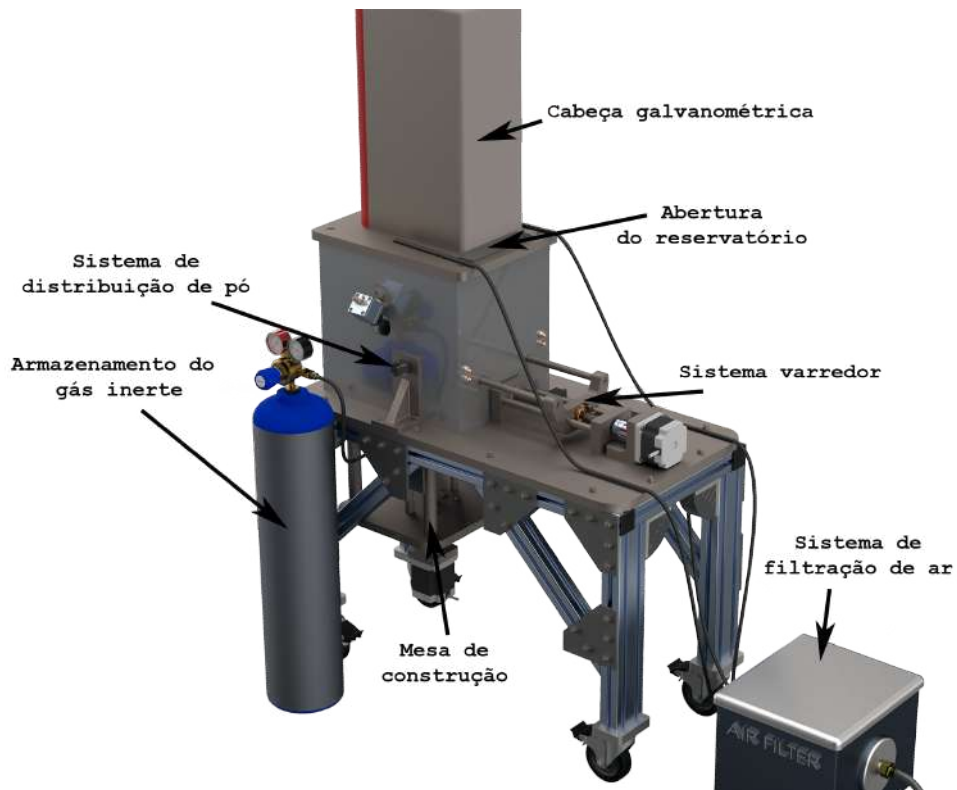


Figura 3.2: Descrição geral do novo sistema.

## 3.2 Varredor

O tempo necessário para atingir o curso total do varredor demonstrou ser o fator que mais contribui para o tempo de produção total, sendo assim fundamental diminuí-lo. Outro fator fundamental é o espaço preciso para albergar este sistema, o que se constatou ser quase metade da área útil da máquina (Figura 2.8). Tendo isto em conta, inicialmente é proposto um novo esquema de distribuição de pó, com instalação na lateral da restante estrutura (Figura 3.3).

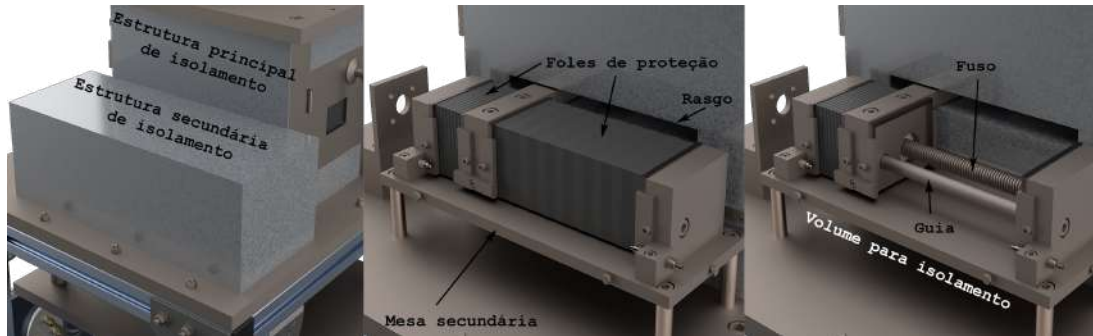


Figura 3.3: Sistema varredor lateral.

Com os elementos de transmissão de potência na sua lateral, este é o *design* ideal para reduzir ao máximo o espaço necessário para alojar o sistema. Existe um de cada lado, para garantir um varrimento de pó mais suave sem ocorrer o risco de flexão por parte da restante estrutura no interior da câmara (Figura 3.4).

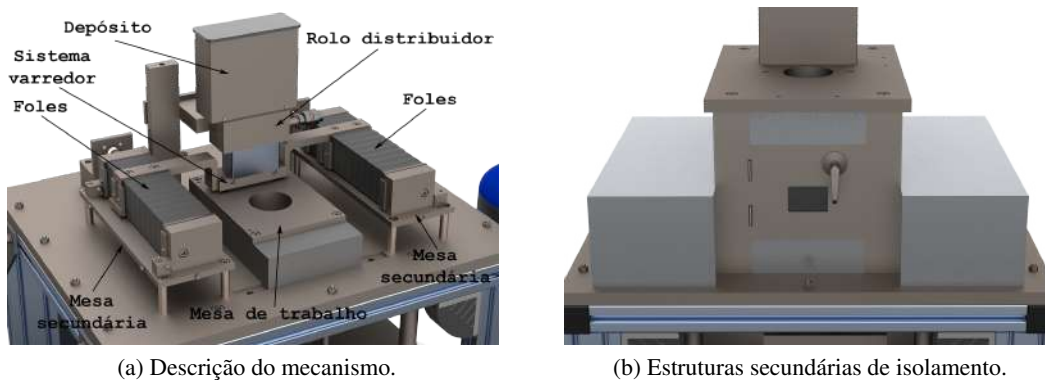


Figura 3.4: Detalhes do sistema varredor lateral.

O aspeto negativo deste sistema é haver ligação entre o ambiente e a atmosfera no interior da câmara. Deste modo, os contaminantes e calor existentes nesta, iriam se deslocar para os elementos de transmissão de potência, sendo por isso necessário um isolamento. Como se trata de um rasgo, é algo de difícil aplicação prática, mas sendo possível recorrendo a um vedante de geometria variável, em que a abertura era originada pela própria peça que transmite a ligação entre o sistema fuso/porca com o varredor no interior da câmara. Uma solução mais viável é utilizar foles de proteção, de modo a proteger os elementos de transmissão de potência. As temperaturas

no interior da câmara de fabrico podem atingir os 200°C, devido ao pré-aquecimento descrito no capítulo 3.4.1, sendo por isso necessários foles que suportem estes valores. Os rolamentos de apoio ao fuso e os seus suportes necessitam de ter isolamento. Nos apoios das guias teriam de ser evitados o uso de casquilhos de plástico, e adotar rolamentos lineares. Seria também necessário adotar duas estruturas de isolamento, uma em cada lado, de modo a dar continuidade à estrutura principal e isolar na totalidade. Devido à espessura de 50 mm de isolamento necessário em todas as direções é necessário adicionar uma mesa adicional à estrutura para permitir o seu isolamento na base. É claro que estas opções tornariam o sistema mais dispendioso, sem haver necessidade, mas aplicável se for necessário obter um sistema mais compacto, com menor comprimento e maior aproveitamento do espaço na mesa.

Para controlar o fator económico, o sistema foi deslocado para trás, e apenas usado um sistema de transmissão de potência, dado que neste caso não fazia sentido manter os dois (Figura 3.5).

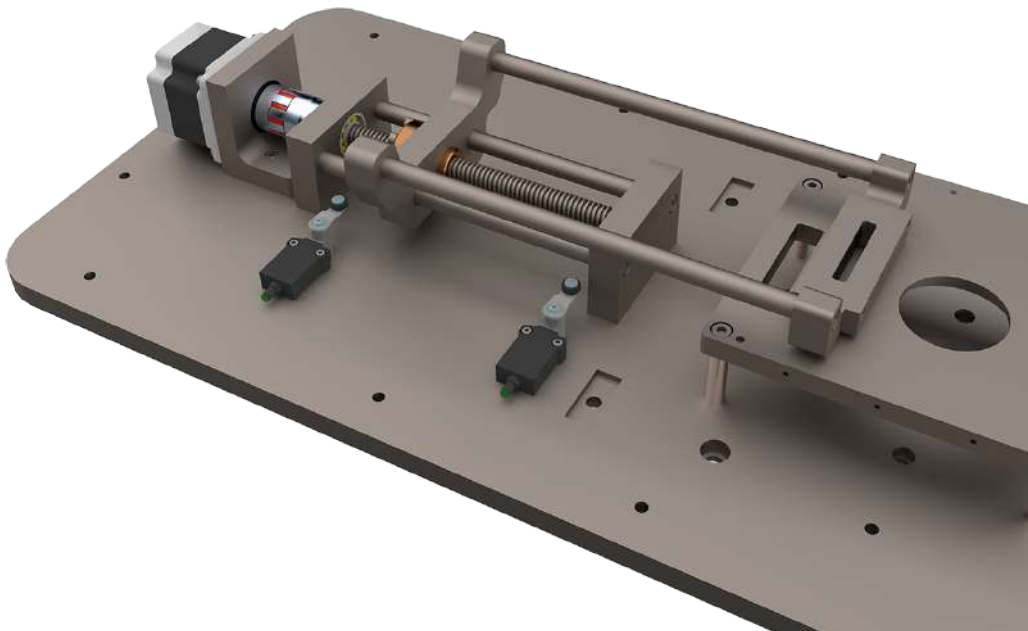


Figura 3.5: *Design* final do varredor.

Com este esquema é evitado usar foles, rolamentos lineares e isolamentos extra, dado que um furo com ligação ao varredor dentro da câmara de fabrico, é facilmente isolável com plástico de baixo atrito (autolubrificante), como por exemplo PTFE. Os componentes móveis são otimizados de modo a reduzir a sua massa, mas tendo em conta os esforços a que são submetidos.

Um dos aspetos mais importantes e benéfico deste sistema é tratar-se de uma distribuição singular, denominado também por *one way recoating*, referindo-se ao facto de ter a capacidade de distribuir uma camada por cada movimento linear ao varredor, sendo assim possível distribuir duas camadas de pó por cada deslocamento à posição inicial do varredor. Os tempos de não produtividade são assim reduzidos a metade, para além da acrescida diminuição do curso total. O tempo durante o qual o laser não pode atuar, acaba por ser na sua maioria apenas o tempo para cada camada ser distribuída na mesa.

A descrição funcional do mecanismo encontra-se detalhada na figura 3.6.

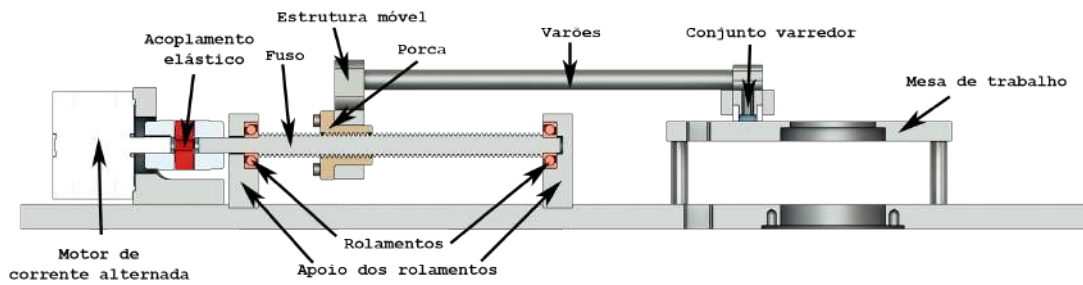


Figura 3.6: Descrição funcional do varredor.

Este encontra-se representado na sua posição inicial. O primeiro movimento é para a frente (no sentido da esquerda para a direita) em que distribuí a primeira camada. No movimento seguinte, reverso, ocorre a distribuição da segunda e conseqüente depósito dos restos.

A transmissão de potência ocorre usando um fuso e porca trapezoidal, com o seu acionamento recorrendo a um motor de corrente alternada, com uma ligação enchavetada a um acoplamento elástico e posteriormente ao fuso. Este é apoiado por dois rolamentos nas suas extremidades. A porca apresenta ligação com uma estrutura móvel que é responsável por posicionar o conjunto do varredor no interior da câmara, detalhado na secção 3.3. Foi necessário adicionar uma mesa de trabalho para garantir um bom isolamento de toda a estrutura, conforme descrito na secção 3.5.

Uma alternativa à utilização de um fuso trapezoidal é uma correia, mas apesar do seu uso corrente em aplicações horizontais, o seu custo é superior e é sujeita a uma manutenção mais periódica, devido ao tensionamento desta para um correto funcionamento. Esta poderia ser utilizada em conjunto com a disposição do mecanismo apresentada na figura 3.3, para uma maior compactidade do sistema.

De modo a garantir uma ótima vedação nos componentes responsáveis por movimentar o pó, tais como as lâminas no varredor, estes são constituídos por um material autolubrificante, nomeadamente plásticos. Devido ao desgaste sofrido por estes, é necessário verificar o seu estado, caso contrário a vedação pode não ser garantida, tendo sido estes projetados de modo a serem facilmente substituídos. Com o intuito de reduzir ao máximo a manutenção da máquina em questão, foi considerado a utilização de outros materiais, à exceção de teflon, que foi a opção na versão anterior. Este apresenta diversos problemas ao nível da resistência ao desgaste, e foi por isso substituído pelo fluorosint-207, dado que a diferença é notável [12], com o seu custo e acessibilidade no mercado idêntico ao comum teflon.

Certos fabricantes têm recorrido à utilização de materiais cerâmicos e aços rápidos na substituição do plástico para a vedação, principalmente devido ao seu desgaste e possível contaminação da peça por parte deste [13]. A grande desvantagem da utilização destes materiais é devido à sua sensibilidade de tolerar desalinhamentos, sendo por isso necessário garantir uma maior precisão e alinhamento dos componentes a produzir, traduzindo num aumento considerável dos

custos de produção. O mesmo se aplica na substituição das lâminas por rolos motorizados, em que estes apresentam movimento de rotação contrário ao movimento linear varredor (Figura 3.7). Salientam-se as vantagens de uma maior compactação do pó, assim como a diminuição da possibilidade de danificar a peça em casos de falha por parte do êmbolo de trabalho ou problemas de alinhamento [14]. Enquanto uma lamina tende a deslocar a peça em caso de impacto, o rolo apenas o compactava. No entanto, dado que se usa uma lâmina de plástico, este problema não iria existir devido à sua baixa rigidez. Porém, se este problema for verificado, consegue ser eliminado facilmente ao adicionar suportes geométricos à peça a produzir (Figura 1.5).

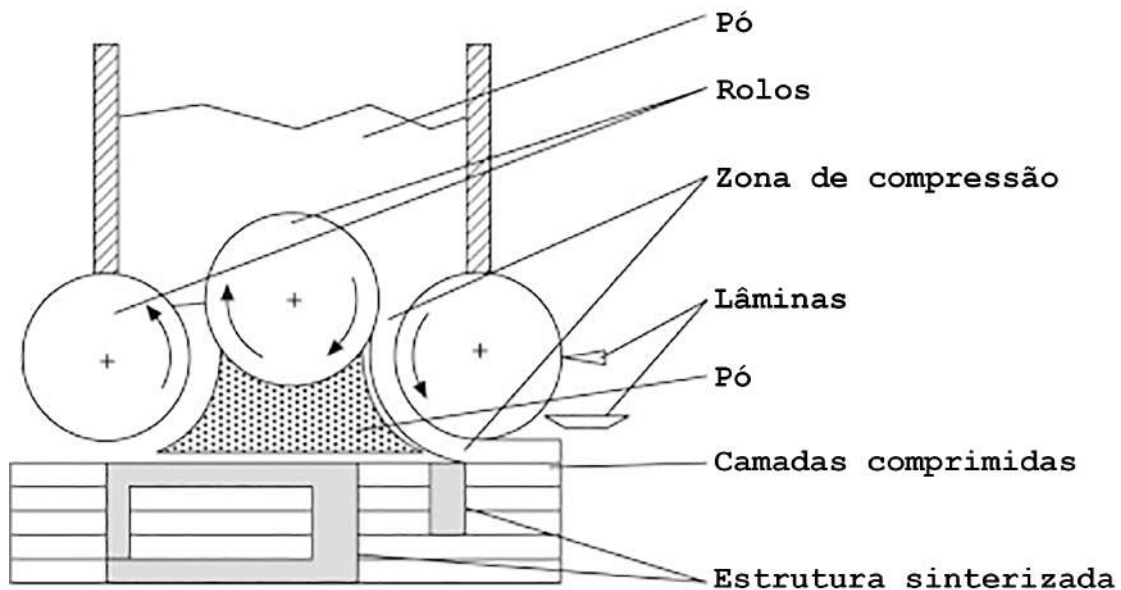


Figura 3.7: Utilização de rolos no varredor (imagem adaptada de [15]).

O seu funcionamento consiste na utilização de três motores de passo pequenos, cada um ligado a uma peça cilíndrica (rolos), responsável pela compactação, existindo uma maior qualidade na camada depositada, permitindo obter maiores densidades comparativamente à utilização de uma lamina.

Concluindo, a contaminação e desgaste mais intensificado dos plásticos, pelo uso de lâminas de fluorosint-207, acabam por ser as desvantagens mais significativas comparativamente aos restantes materiais e soluções referidas, mas é atenuado devido à sua fácil manutenção, apresentando um custo e complexidade muito inferior.

### 3.3 Distribuição do Pó

As alterações sofridas pelo mecanismo de distribuição de pó foram fundamentais na redução do curso total do varredor, e conseqüentemente, o tempo. Tal deveu-se a não ser necessário uma plataforma para o pó, sendo que agora a distribuição é feita por cima (Figura 3.8).

O mecanismo tem por base um rolo plástico com vazios na sua constituição, em que cada um destes vazios corresponde ao volume de uma camada com uma espessura  $25 \mu m$ , com 35

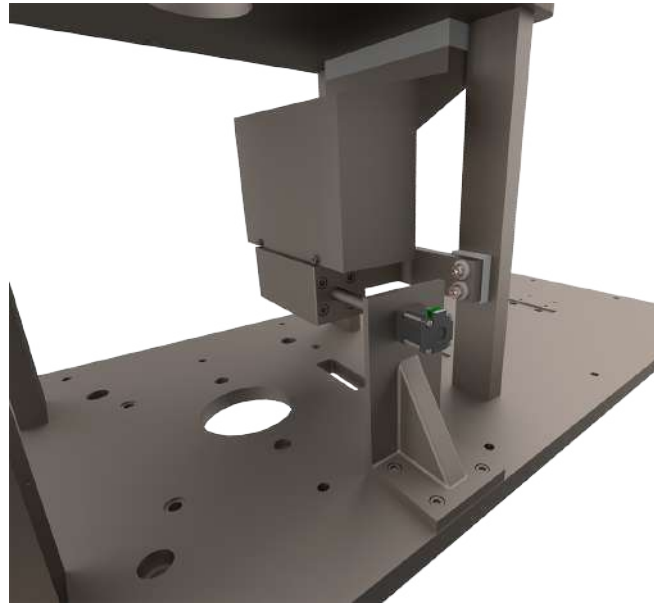


Figura 3.8: Distribuidor de pó.

% de excesso. Como se trata de um sistema *one way recoating*, permite ao operador regular a espessura de cada camada em intervalos de  $12,5 \mu\text{m}$ , porque para cada rotação dada ao varredor correspondente a  $25 \mu\text{m}$ , pode ser depositada metade dessa quantidade a cada movimento, dependendo depois apenas do controlo na mesa de construção. Com esta configuração é abrangido uma elevada gama de espessuras mais comuns, como referido em 1.1. Este controlo é efetuado variando as suas rotações, com o recurso a um motor de passo que se encontra acoplado ao veio, que por sua vez está conectado ao rolo distribuidor com o recurso a uma chaveta. O detalhe do mecanismo está representado na figura 3.9.

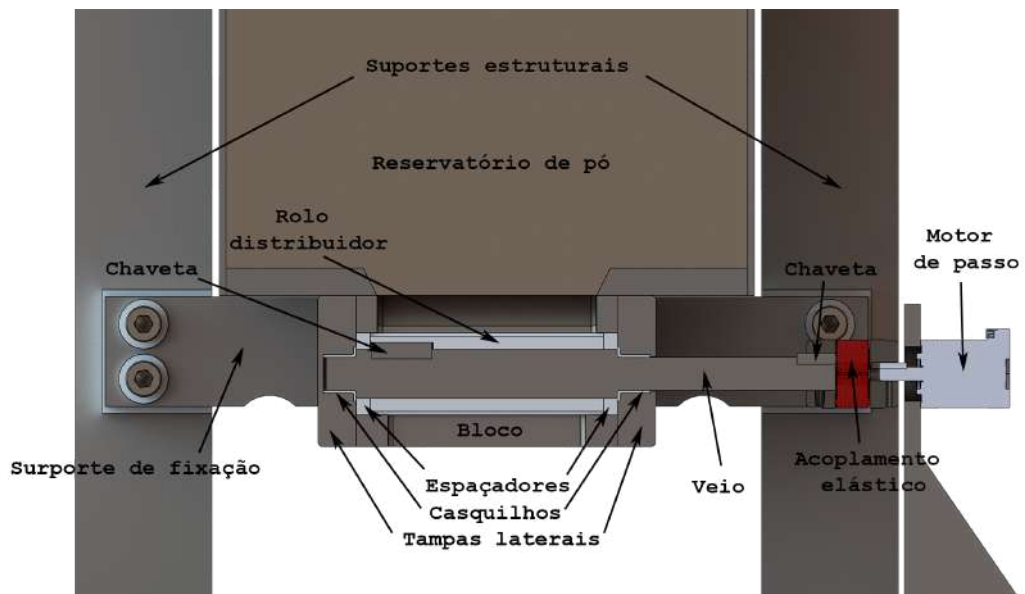


Figura 3.9: Detalhe do mecanismo de distribuição.

São utilizados casquilhos autolubrificados do tipo GFM para suportar o veio, para garantir um sistema mais compacto, económico e dado que não são necessárias elevadas velocidades de rotação. Estes suportam até 250°C [16], podendo estar facilmente dentro da câmara de fabrico e são instalados nas tampas laterais. São utilizados espaçadores para garantir uma vedação total, impedindo a fuga de pó.

O bloco e a restante estrutura é fixa aos suportes estruturais usando uma ligação aparafusada, por intermédio do suporte de fixação. São utilizadas anilhas térmicas (plástico), assim como blocos deste, entre os dois componentes metálicos, de modo a evitar as perdas de calor (Figura 3.24).

Devido à reduzida dimensão dos elementos de ligação, a utilização de uma ligação direta do veio ao motor era possível, mas devido ao desalinhamento esperado provocado pelo peso do depósito de pó em cima desta estrutura, pode ser fundamental o uso de um acoplamento elástico para permitir o correto funcionamento desta ligação. Este é instalado no centro da parede de isolamento, de modo a não ser necessário um veio muito longo, diminuindo a sua possibilidade de flexão. O seu desalinhamento será verificado na secção 5.

Sobre o bloco, encontra-se o reservatório de pó, que garante uma quantidade de pó para cinco peças, diminuindo assim a constante necessidade de reabastecimento (Figura 3.10). A sua forma é mais complexa de modo a garantir um melhor isolamento, evitando o contacto com o exterior e garantindo um fácil acesso, assim como aproveitar o espaço ao máximo da mesa superior para a cabeça galvanométrica (Figura 3.24).

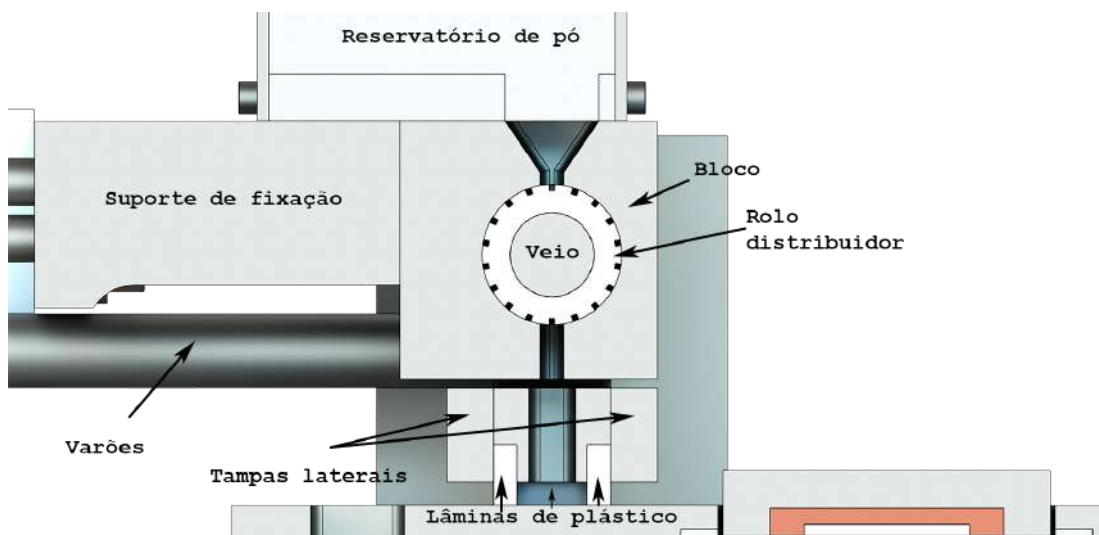


Figura 3.10: Mecanismo de distribuição de pó.

O pó em cada espaço do rolo distribuidor é direcionado para o varredor que se encontra dentro da câmara, que tem ligação ao restante sistema do varredor no exterior. Este apresenta uma geometria quadrangular de modo a permitir o varrimento para os dois lados, devido ao sistema *one way recoating*. Este apresenta plástico para vedação em todas as suas direções de modo a

evitar que o pó se mova para a lateral, estando confinado na direção desejada. Na figura 3.11 este está exibido no interior da câmara de construção.



Figura 3.11: Varredor no interior da câmara de fabrico.

A estrutura central do varredor apresenta umas elevações nas suas extremidades, onde são fixos os varões com ligação ao exterior, de modo a não perturbar o fluxo de gás. Caso esta elevação não existisse, os varões ficariam ao nível da entrada e saída inferiores de gás da câmara. Esta foi então uma solução de contornar o problema, algo que não ocorria no sistema apresentado na figura 3.3.

Um dos outros problemas associados ao varredor da máquina anterior, é o facto deste ter de voltar à sua posição inicial depois da deposição da camada, e nesse percurso pode afetar a camada já depositada, piorando a sua qualidade. Tal acontecimento não se verifica neste novo sistema.

Devido à capacidade volumétrica do varredor para transportar o pó, uma possibilidade de funcionamento que irá permitir um menor tempo necessário para o fabrico, é encher consideravelmente o varredor, de modo a não ser preciso nem encher ou depositar restos a cada 100, 200 ou mais camadas.

### 3.4 Mesa de Construção

Este mecanismo é responsável pelo movimento ascendente e descendente da peça em fabrico e atribuir a espessura de pó a cada camada (Figura 3.12). Na figura 3.13 encontra-se a sua descrição funcional.



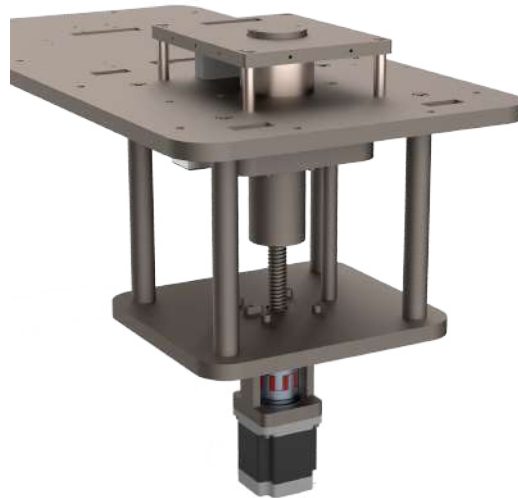


Figura 3.12: Plataforma da mesa de construção.

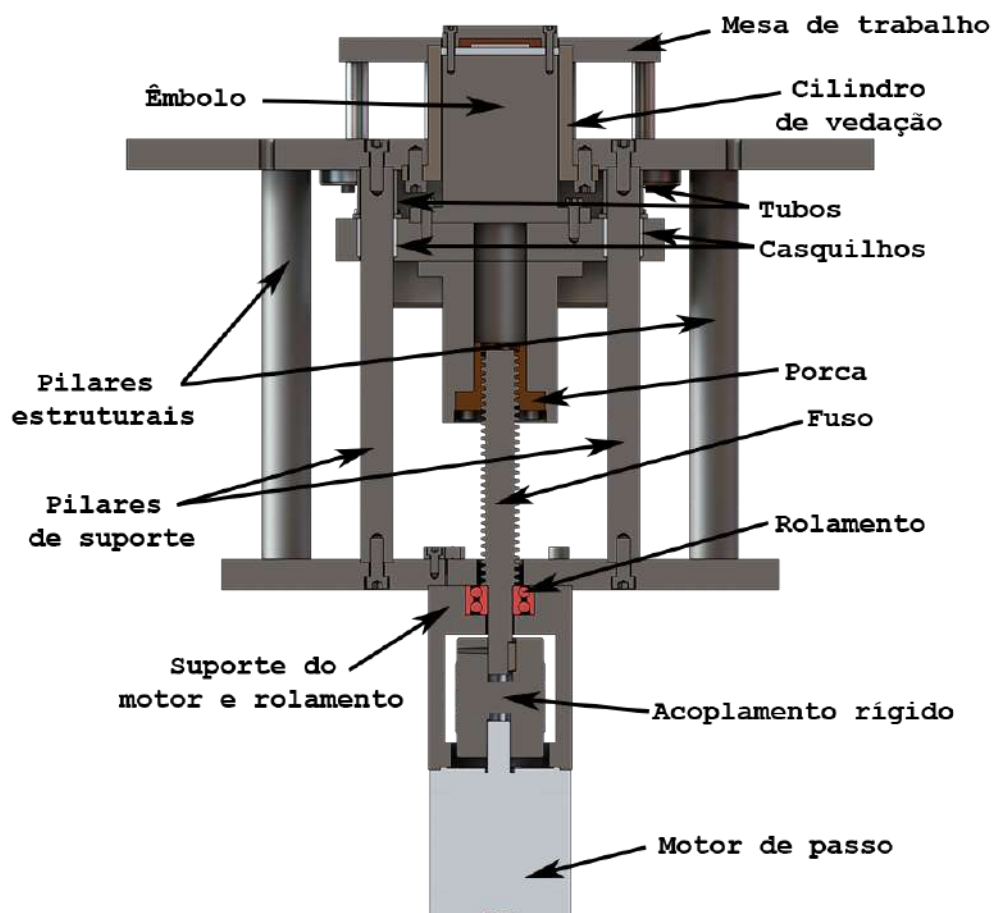


Figura 3.13: Descrição funcional da mesa de trabalho.

A mesa de construção tem um sistema de transmissão idêntico ao varredor, no entanto de modo a diminuir o comprimento e complexidade do sistema, foi considerado apenas um apoio na base. Deste modo, o rolamento e as guias são responsáveis pelo apoio e alinhamento do fuso. A porca está fixa à estrutura móvel que permite o deslocamento linear do êmbolo de trabalho, e consequentemente da área de trabalho. Uma das vantagens do uso de um sistema fuso e porca num mecanismo vertical, é o facto de que devido ao atrito entre os dois componentes, é suficiente para segurar a carga, caso haja falha do motor.

O facto de ser usado uma segunda mesa com pilares estruturais a ligar à mesa de suporte, simplifica bastante os componentes, não existindo a necessidade da elevada complexidade apresentada na figura 2.2.

### 3.4.1 Êmbolo de Trabalho

Adicionar aquecimento à mesa de trabalho permite um pré-aquecimento da peça e um arrefecimento controlado da mesma. Como explicado na secção 1.1, contribui significativamente para a redução das tensões residuais. O sistema de aquecimento está descrito na figura 3.14.

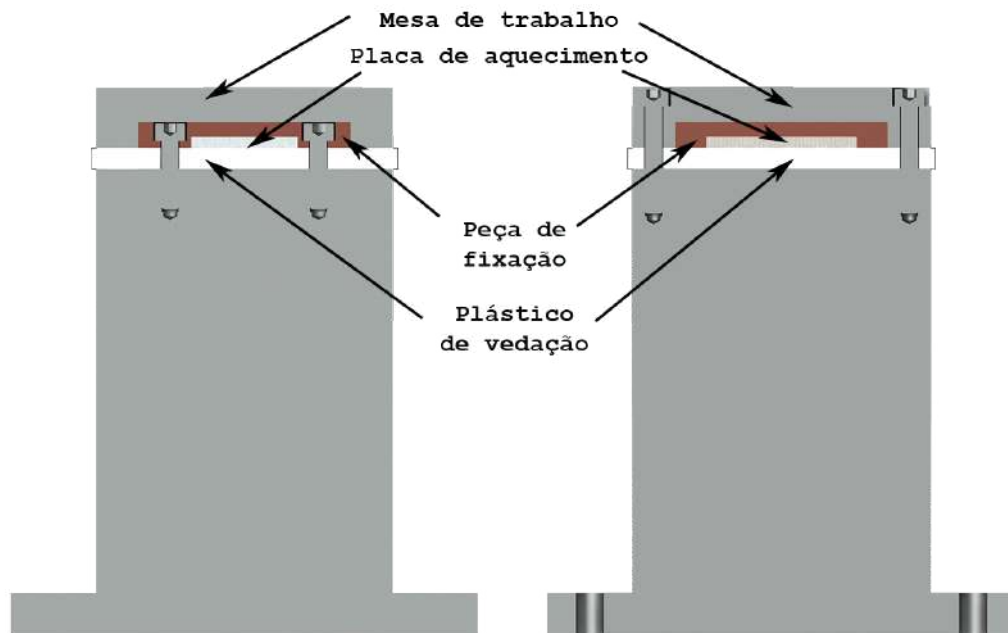


Figura 3.14: Sistema de aquecimento do êmbolo de trabalho.

É constituído por uma resistência cerâmica de 900 W, do fabricante Watlow, permitindo atingir a temperatura de pré-aquecimento de 200°C em menos de 60 segundos (Figura 3.15). Este equipamento possui um termopar incorporado na sua constituição, facilitando assim o controlo de temperatura, não sendo necessário adicionar um externamente.



Figura 3.15: Placa de aquecimento cerâmico.

Devido ao facto da área de fabrico ser superior à área da resistência, esta é fixa usando uma peça em cobre, permitindo também a dissipação do calor pela área de fabrico total, garantindo assim uma temperatura homogénea.

Quando uma peça é mantida a elevadas temperaturas depois da sinterização, provoca uma diminuição da sua porosidade. Ao longo do fabrico, como as primeiras camadas (inferiores) são mantidas a elevadas temperaturas enquanto as superiores são adicionadas, isto pode provocar uma maior densidade nas primeiras camadas. Este desequilíbrio que existe ao longo da peça deve ser evitado e pode ser contornado com um bom controlo da temperatura da mesa de trabalho e a sua taxa de arrefecimento [17].

Devido ao mecanismo de distribuição de pó usado, o pré-aquecimento não é tão eficaz dado que o pó apenas permanece no êmbolo de trabalho uma fração de tempo muito reduzida, antes de começar a ser sinterizado. Por esta razão, o pré-aquecimento até aos 200°C, seria complementado usando o próprio laser, com um pré-*scanner*. Sendo assim, o principal efeito deste sistema é manter uma temperatura constante durante o fabrico e um arrefecimento controlado. Este complemento, demonstra ser um processo bastante eficiente, comparativamente a outros de pré-aquecimento, dado que deste modo apenas é aquecido a quantidade de pó a sinterizar, e não toda a camada [18]. O pré-aquecimento total da mesa só iria trazer uma diminuição da eficiência do processo.

Este pré-aquecimento consiste em utilizar a sua potência máxima do laser a uma velocidade de varrimento (do galvanómetro) muito elevada. No entanto, é um aquecimento mais difícil de controlar, comparativamente com resistências de aquecimento.

Caso seja necessário um pré-aquecimento do pó até aos 200°C, evitando o laser, o mesmo sistema usado aqui pode ser aplicado no reservatório do pó, à volta da sua estrutura. Mas devido ao referido anteriormente, não é necessário e não foi por isso aplicado. Este seria benéfico caso a área de trabalho fosse bastante superior, em que existia uma elevada quantidade de pó a sinterizar. Deste modo, a energia e tempo necessário para o laser sinterizar cada camada já era consideravelmente inferior, sendo este mais indicado quanto maior for a área de trabalho.

Neste tipo de processo, quando se pretende remover a peça, é fundamental garantir que esta é arrefecida de forma uniforme até a uma temperatura baixa o suficiente para não provocar distorções e reações com o oxigénio ambiente, perto dos 70°C [6][19].

### 3.4.2 Área de Trabalho

A área de trabalho possui duas ligações aparafusadas que permitem a sua fácil remoção no fim de cada peça fabricada. A desvantagem é que a peça a construir não pode existir nestes locais, de modo a possibilitar o desaperto dos mesmos após a construção (Figura 3.16).

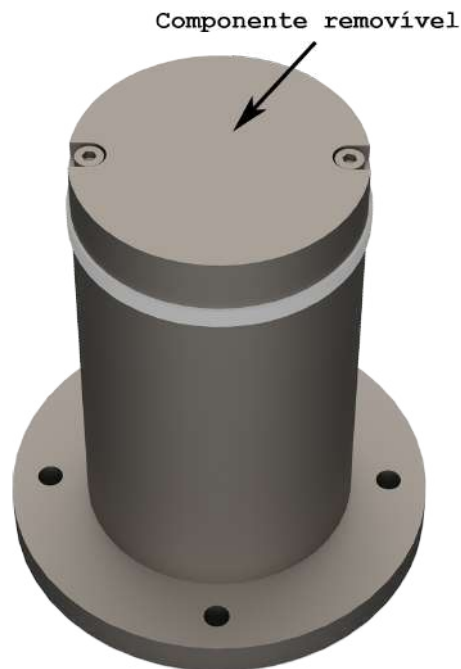


Figura 3.16: Área de trabalho removível.

## 3.5 Estrutura de Isolamento

O isolamento da câmara de fabrico é fundamental por motivos de segurança do operador e controlo dos gradientes térmicos para melhor qualidade da peça. Para garantir o melhor isolamento, as ligações metálicas entre o interior e o exterior da câmara devem ser evitados, devido às suas elevadas conduções térmicas. Para tal, a melhor solução é utilizar estruturas fabricadas à base de soldadura, e na sua separação aplicar material de isolamento. São por isso consideradas duas estruturas independentes, uma interna e outra externa. A primeira apresenta ligação à mesa de trabalho, enquanto a segunda apenas aos suportes estruturais, usando ligações aparafusadas, evitando a soldadura dos componentes que são críticos a nível de nivelamento e precisão para todo o sistema. De modo a garantir isolamento na base, foi necessário adicionar uma mesa extra em cima da mesa principal, sendo esta a mesa de trabalho. A ligação é feita usando varões de aço inoxidável, dado que este apresenta um baixo coeficiente de transmissão térmica. O mesmo

material é usado no cilindro de vedação do êmbolo de trabalho (Figura 3.13), mas em mais nenhum componente devido ao seu custo. As restantes ligações ao exterior, aparafusadas ou furos, são isoladas com plástico. A descrição da estrutura principal está descrita na figura 3.17.

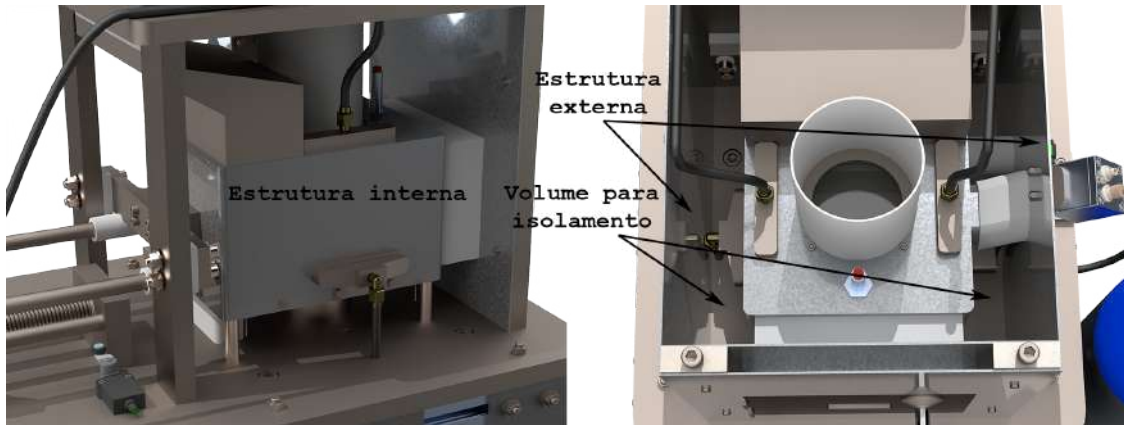
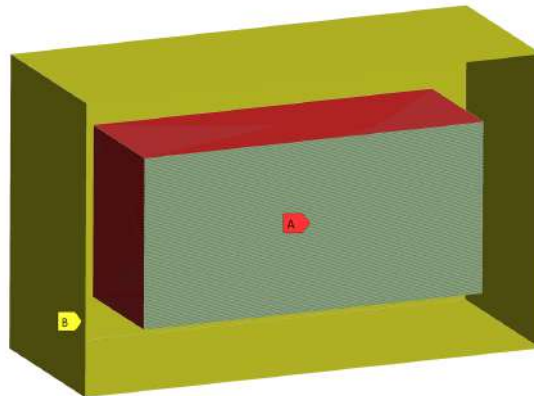


Figura 3.17: Estruturas de isolamento.

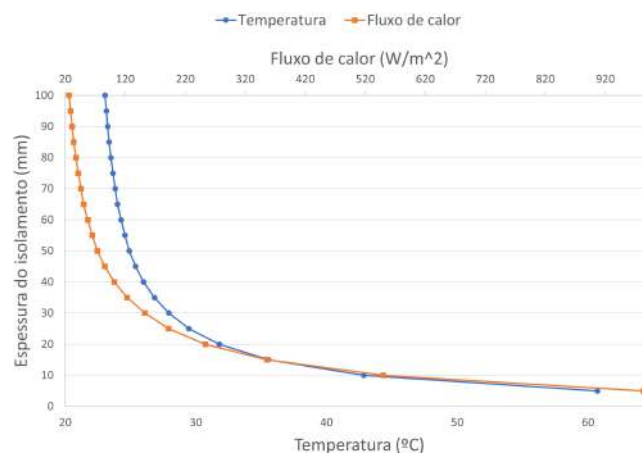
O material de isolamento entre as duas estruturas não está representado, mas foi utilizado lã de rocha devido às suas boas propriedades isolantes, preço e segurança (não toxicidade). É garantido um isolamento de 50 mm em todas as direções, excetuando o topo que possui um isolamento de 134 mm, devido ao ajuste que teve de ser feito para garantir a correta instalação e funcionamento da cabeça galvanométrica, nomeadamente devido à sua distância focal. Apesar disso, o volume da câmara não foi aumentado dado que só traria desvantagens, principalmente um maior gradiente de temperaturas e maior necessidade de fluxo de gás inerte. Dado que 50 mm é suficiente para garantir um bom isolamento, tendo em conta os valores de temperatura esperados, não foi necessário aumentar em qualquer outra direção. Este valor é justificado usando uma análise de elementos finitos, em que é atribuída uma temperatura constante da câmara de fabrico de 200°C, correspondendo ao valor máximo do pré-aquecimento, e com apenas argon no seu interior (0 % de oxigénio), para efeitos de simplificação. É considerado lã de rocha como material isolante, em que a espessura do isolamento é variado entre pequenos intervalos, desde 5 a 100 mm. Para cada espessura ocorre uma diferente análise, de modo a verificar a influência da quantidade de material isolante nas temperaturas e nos fluxos de calor que ocorrem na estrutura externa da máquina. A espessura a usar é selecionada quando a variação desta provoca poucas alterações no isolamento térmico. Cada análise é efetuada para uma hora, garantindo um equilíbrio térmico para todas as análises até serem analisados os valores em questão. Na figura 3.18 é possível verificar a configuração da análise, assim como a relação existente entre a espessura de isolamento e os dados de controlo. A partir de uma espessura de 40 mm, a temperatura nas faces exterior da máquina são perto da temperatura ambiente e existem poucas variações, perto de 0.9 °C entre cada incremento. O fluxo torna-se praticamente desprezável para a espessura de 50 mm, justificando assim a seleção.

Nas figuras 3.17 e 3.19, é possível verificar os componentes instalados para garantir o fluxo de gás, assim como a remoção dos poluentes e contaminantes.

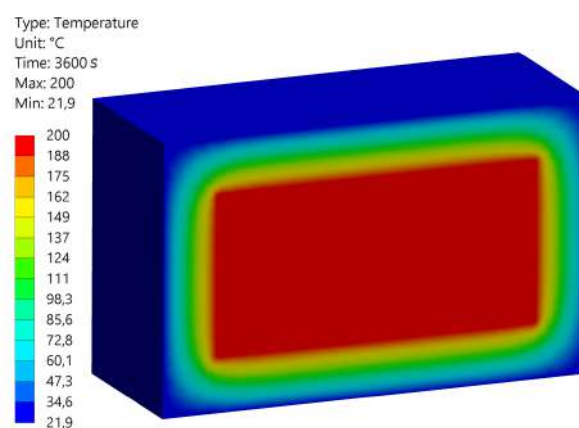


- A** Temperatura no interior da câmara: 200, °C  
**B** Convecção com a temperatura ambiente: 22, °C (step applied), 25, W/m<sup>2</sup>·°C (step applied)

(a) Condições de fronteira da análise.



(b) Influência da espessura de isolamento na temperatura e fluxo de calor nas paredes externas.



(c) Gradientes de temperatura para o isolamento de 50mm.

Figura 3.18: Análise térmica da câmara de fabrico usando o método de elementos finitos.



Figura 3.19: Interior da câmara de trabalho.

A entrada de gás apresenta uma geometria com diversos furos de modo a estratificar o gás inerte que entra nessa estrutura, garantindo uma distribuição mais homogênea pela área de trabalho. A sua localização é ao nível desta para garantir uma maior concentração de gás, dado que é nessa zona que ocorre a sinterização e por isso onde mais importa. A saída do lado oposto apresenta uma forma geométrica cônica de modo a garantir um maior fluxo e remoção de gás contaminado. Esta é instalada ao mesmo nível devido a ser fundamental os poluentes emitidos durante o processo de fabrico (nomeadamente partículas), serem removidos de modo a não contaminar a peça, podendo provocar imprecisões e porosidades nesta. O laser ao incidir no pó, dependendo da velocidade do galvanómetro, pode fazer com que algumas partículas sejam expulsas da camada a ser sinterizada, e injetadas na atmosfera de ar inerte [20]. Se estas não forem removidas por este fluxo de gás, podem mais tarde cair sobre as consequentes camadas. Tal efeito é verificável na figura 3.30. Os restantes contaminantes são na sua maioria fumos, que também necessitam de ser expulsos. Devido à sua baixa densidade, estes sobem, e por isso a melhor estratégia para a sua extração é no topo da câmara. Foram posicionados dois componentes, um de cada lado, de modo a garantir uma remoção total.

Estas três saídas são depois direcionadas para um filtro de ar, devido ao risco para o ambiente dos contaminantes. Devido às reduzidas dimensões destas partículas, é necessário usar filtros que consigam filtrar estas nanopartículas [19]. É selecionado uma máquina destinada a remover e filtrar poluentes de soldadura, mas que pode ser facilmente ajustada para conectar às três saídas. Esta seleção justifica-se devido à sua elevada eficiência, baixo custo e variedade no mercado. O modelo selecionado encontra-se na figura 3.20, adquirido ao fabricante Knokoo, e apresenta uma eficiência de remoção de poluente de 99,97 % para partículas até  $0,3 \mu m$ .

A ligação desta deve ser ao exterior, porque apesar do ar estar filtrado, a concentração de gás inerte é elevada. Caso tais concentrações fossem libertadas num espaço fechado, poderiam



Figura 3.20: Equipamento de filtragem de gás.

provocar a dispersão do oxigénio, provocando perigo de saúde para quem tivesse no local. Caso isto seja absolutamente necessário, é crítico usar um medidor de concentração de oxigénio no exterior e que sirva para alarmar em situações que estes níveis sejam prejudiciais.

A cabeça galvanométrica usada foi adquirida à empresa Raylase e está exposta na figura 3.21.



Figura 3.21: Cabeça galvanométrica.

Foi também necessário adicionar um espelho de proteção, para impedir que os contaminantes já referidos se desloquem para o galvanómetro. Tal espelho tem de ser um excelente transmissor de radiações infravermelho, constituído de materiais tais como safira [21].



Apesar dos varões de ligação ao varredor apresentarem um distanciamento muito superior à área de trabalho, é necessário ter precaução para o facto do laser não os atinja. É preciso garantir uma correta calibração e alinhamento deste, antes da montagem deste tipo de componentes.

### 3.6 Estrutura de Suporte

Dado que as dimensões da estrutura são reduzidas e os sistemas a suportar possuem pouca massa, perfis de alumínio apresentam ser a melhor solução devido à facilidade da sua montagem, durabilidade e manutenção, sendo facilmente adquiridos na indústria. São apenas usadas ligações aparafusadas, parafusos em T e porcas (Figura 3.22).



Figura 3.22: Estrutura de suporte.

Esta será a base para a montagem dos mecanismos descritos anteriormente (Figura 3.23).

Deste modo é possível verificar a ligação entre cada mecanismo, transmitindo também uma melhor noção do funcionamento da máquina (Figura 3.24).

Dado que o depósito se encontra a uma reduzida distância de componentes móveis, optou-se pela utilização de um depósito sólido ao invés de um saco. A sua remoção é bastante simplificada e consegue armazenar uma considerável quantidade de pó.

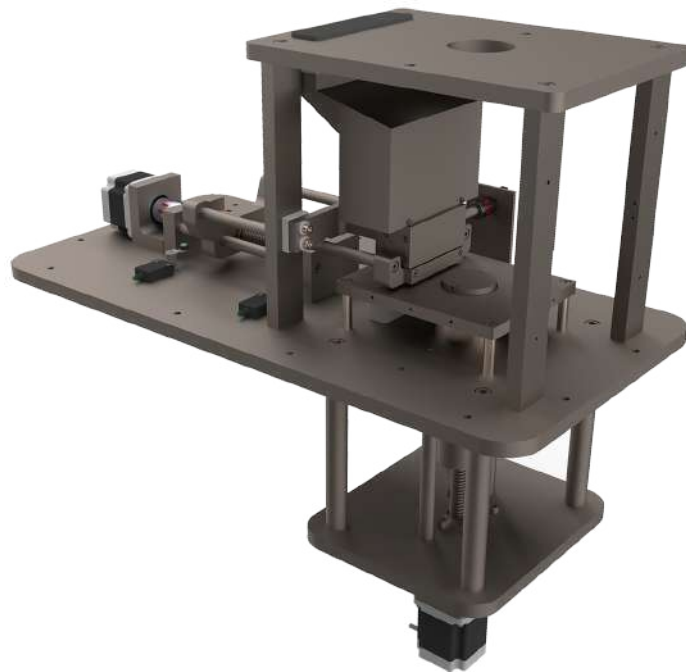


Figura 3.23: Montagem dos mecanismos responsáveis pela movimentação do pé.

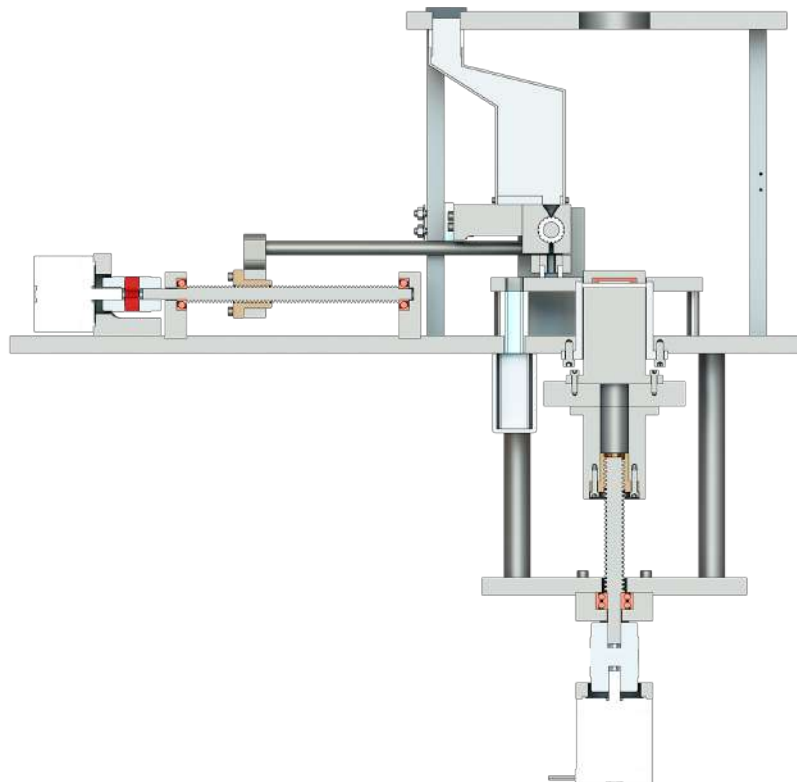


Figura 3.24: Detalhe da montagem dos mecanismos.

Uma opção que iria permitir aumentar a qualidade da deposição da camada seria usando um excitador de vibração, para permitir a movimentação das partículas do pó até garantir uniformidade. A sua instalação seria junto da mesa de trabalho, e executada depois da deposição do pó ter sido realizada. No entanto, este é de pouca utilidade prática devido ao tempo necessário para a sua execução, aumentando consideravelmente o tempo de fabrico.

É importante proteger os componentes da máquina de outros contaminantes industriais que podem existir onde a máquina irá operar, bem como o próprio operador. É por isso adicionada uma estrutura metálica sobre a parte traseira da máquina de modo a proteger o fuso do varredor (Figura 3.25). Relativamente ao fuso da mesa de trabalho, este também pode ser revestido por uma chapa, no entanto devido a ser necessário uma fácil acessibilidade ao reservatório, esta não foi adicionada. Devido à sua localização, este é menos contaminado, mas se for justificado é possível adicionar a proteção.

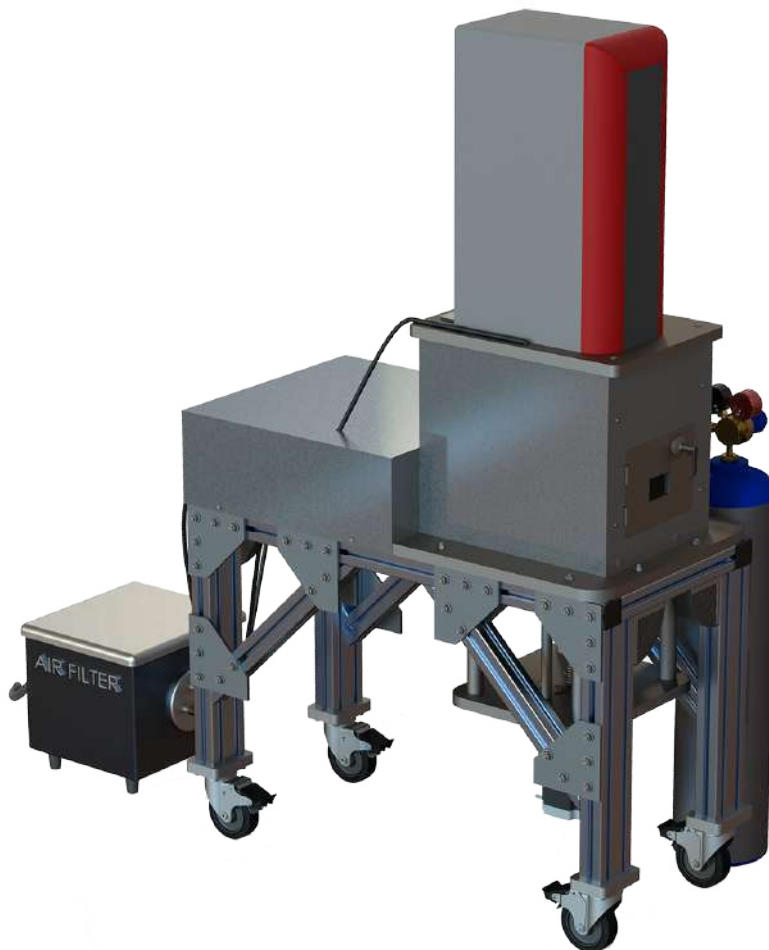


Figura 3.25: Renderização final.

As rodas são opcionais e depende de onde a máquina será instalada, dado que a distância do fim dos perfis de alumínio verticais à zona de acesso pela porta, são apenas 750 mm, podendo esta ser facilmente instalada numa banca do laboratório.

## 3.7 Sensorização

### 3.7.1 Concentração de Oxigénio

De modo a verificar a concentração de oxigénio referida em 1.1, é necessário um sensor que faça esta leitura. O sensor é apresentado na figura 3.26 e pode ser adquirido à empresa Sst.



Figura 3.26: Sensor de oxigénio.

A sua instalação e posicionamento na câmara está representada na figura 3.27.



Figura 3.27: Instalação do sensor de oxigénio.

### 3.7.2 Homogeneidade da Câmara

Reduzir os gradientes térmicos existentes na câmara é vantajoso para a peça em fabrico, como referido em 1.1. Deste modo, para verificar se estes são muito prejudiciais, é necessário medir a temperatura da câmara em pelos menos dois pontos distintos. O fator que mais irá contribuir para este efeito é a sinterização e a libertação de energia por parte do pó, o que é contrariado, em parte, com o ar frio inerte a entrar. Procedeu-se então à seleção de dois termopares do tipo K, para a colocação em dois pontos extremos da mesa de trabalho (Figura 3.28), adquirido ao fabricante RS.

Estes são instalados na mesa de trabalho (Figura 3.29).



Figura 3.28: Termopar utilizado.

O pó quando submetido a elevadas temperaturas corre elevados riscos de reagir com o oxigénio. Sendo assim, não é apenas o pó a ser sinterizado que precisa de estar contido numa atmosfera inerte, mas também o restante pó na área de trabalho, caso contrário a sua reutilização pode estar comprometida. O mesmo se aplica ao pó no reservatório, que apesar de estar longe da zona de sinterização, estará à temperatura da câmara, que conforme referido anteriormente, poderá atingir 200°C. É por isso necessário evitar a exposição deste pó ao oxigénio, com uma tampa que garante a melhor vedação e o controlo da temperatura no interior da câmara de modo a verificar se são atingidos valores de temperatura muito superiores aos referidos anteriormente.

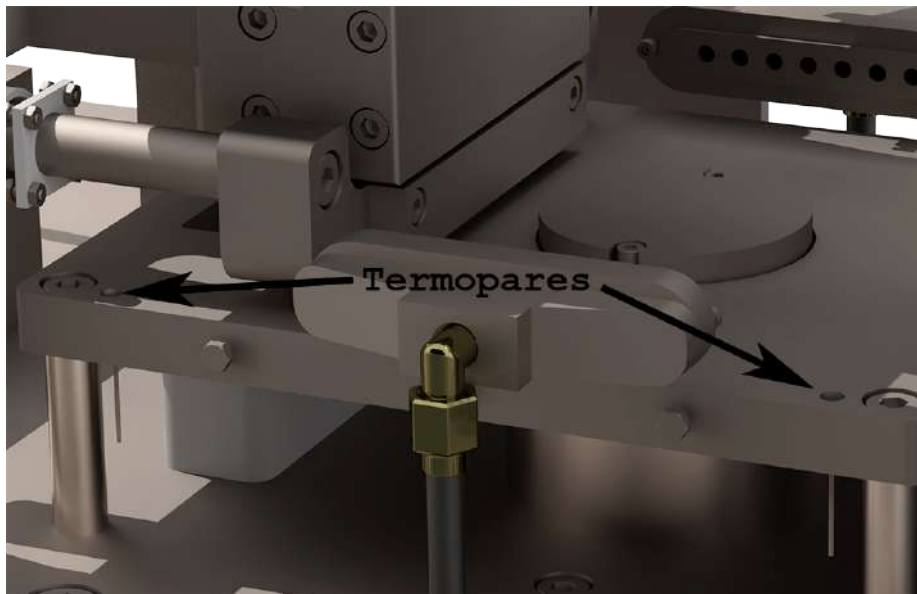


Figura 3.29: Localização dos termopares.

### 3.7.3 Controlo Visual

A utilização de uma câmara de controlo visual da região a sinterizar permite verificar o estado do processo. Foi optado pela utilização de uma câmara de infravermelhos, para verificar os gradientes de temperatura. Alguns exemplos da sua aplicação e vantagens estão expostos na figura 3.30 [22].

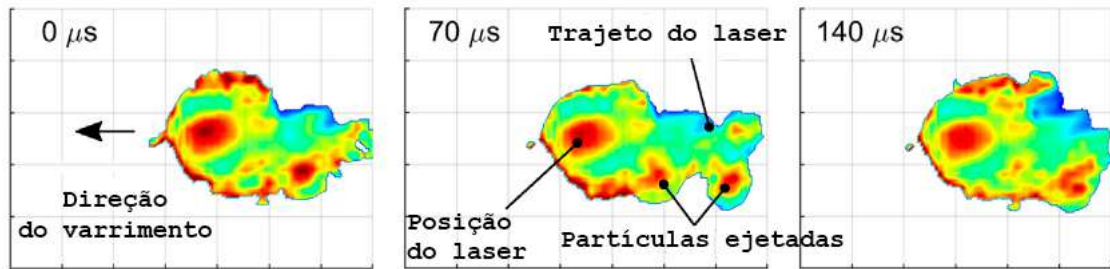


Figura 3.30: Aplicações de utilização da câmara.

É possível verificar que zonas não sinterizadas, ejeções de partículas, quantidade de fumo, velocidade e a posição do feixe de laser, são facilmente visualizados. Com isto, é possível verificar os efeitos da variação dos parâmetros expostos na tabela 1.1.

A câmara selecionada é apresentada na figura 3.31, do fabricante Optris, e tem a capacidade de efetuar leituras térmicas com precisão de 2°C até aos 1500°C, sendo superior à temperatura de sinterização de todos os metais a usar na DMLS.



Figura 3.31: Câmara de infravermelhos usada.

A câmara foi instalada no exterior da estrutura de modo a facilitar a sua acessibilidade. Colocar a câmara no interior da câmara de trabalho era pouco prático dado que seriam necessários acessórios para a sua proteção, devido às elevadas temperaturas, resultando em um maior custo. A leitura com esta no exterior também consegue ser bem-sucedida utilizando um espelho na separação entre os dois, que permita uma boa leitura térmica. O ideal para este tipo de utilização é um espelho em germânio [21], sendo por isso o selecionado (Figura 3.19).

Um dos maiores problemas associados à utilização de uma câmara montada externamente é o facto de esta não poder ser instalada perpendicularmente à mesa de fabrico, dado que nessa direção é onde está instalada a cabeça galvanométrica. Com esta instalada com um ângulo em relação à perpendicular, a radiação térmica incidente nesta pode traduzir-se em medições

incorretas de temperatura [6]. Uma solução para este problema é calibrar a câmara usando uma fonte térmica de referencia no interior da câmara, tais como a mesa de trabalho que se encontra a uma temperatura constante de 200°C, com o controlo por termopar descrito em 3.7.2.

A sua instalação está demonstrada na figura 3.32.



Figura 3.32: Instalação da câmara de infravermelhos.

Devido ao seu elevado custo, estas câmaras são mais utilizadas para a visualização e otimização do processo de fabrico, indicadas para um laboratório de ensaios, como é o caso deste particular cliente. Uma alternativa mais económica é a utilização de pirómetros ou câmaras visuais (CCD), sendo normalmente aplicados em produtos finais, sem alvo de estudo. Esta última permite principalmente acompanhar a qualidade da camada de pó e a sua sinterização. Caso seja optado a sua utilização é necessário adicionar luzes no interior da câmara de trabalho, para permitir visualizar o seu interior a partir do exterior.

Devido aos contaminantes na câmara e conseqüente sujidade gerada no vidro germânio, é aconselhado a limpeza desta, de modo a não traduzir em erros de leitura. A sua manutenção é facilmente realizada pelo interior da câmara.

Sensores ultrassom ou acelerómetros podem ser usados de modo a complementar a análise à qualidade da camada de pó [6]. Neste caso, o primeiro tipo seria instalado sob a mesa de trabalho de modo a detetar vazios na camada, enquanto o segundo poderia ser instalado na mesa ou varredor de modo a detetar instabilidade no varredor, resultante de danos na lâmina do varredor ou outro tipo de interferências durante a deposição da camada. Contudo, devido à difícil implementação prática e complexidade associada à análise dos dados deste tipo de sensorização, estes não serão implementados. A análise à qualidade da camada será feita usando apenas a câmara.

## Capítulo 4

# Dimensionamento

Com o objetivo de proceder ao dimensionamento dos motores, rolamentos e ligações mecânicas, é necessário saber os esforços mecânicos existentes ao longo do funcionamento da máquina. No caso em estudo, a carga principal é o momento torsor provocado pelo motor elétrico acoplado aos elementos de transmissão, necessário para garantir o movimento dos componentes. É por isso fundamental calcular as necessidades consoante a sua utilização, para cada mecanismo.

### 4.1 Condições de Utilização

#### 4.1.1 Acionamento

Inicialmente é necessário estabelecer condições de utilização para cada um deles, só depois sendo possível dimensionar os componentes de acordo com os seus requisitos. O controlo e acionamento dos três sistemas móveis é realizado usando um motor elétrico. O seu perfil de acionamento é importante dado que é com este que são obtidas as velocidades e acelerações máximas alcançadas, tendo especial influência na consideração dos efeitos inerciais. O perfil típico de um motor está descrito na figura 4.1.

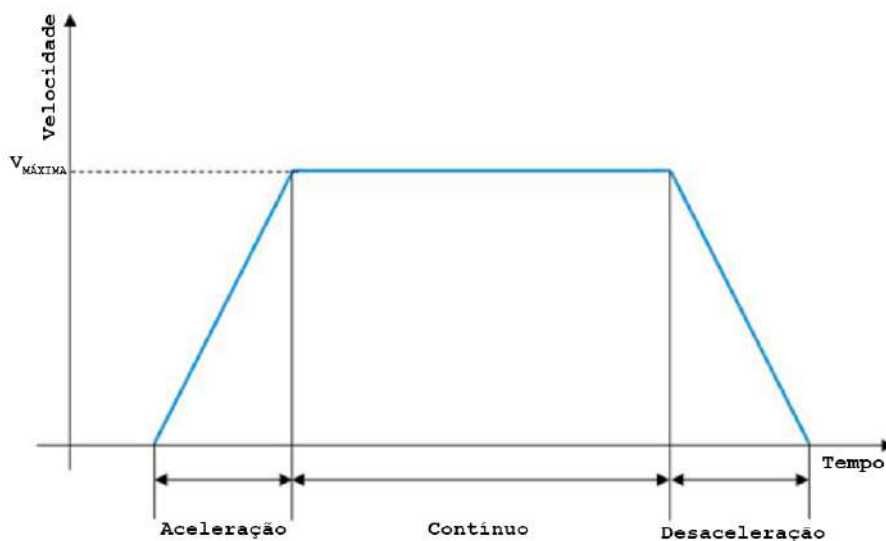


Figura 4.1: Perfil de velocidade de um motor elétrico.



Este é composto por um momento de aceleração, velocidade constante e por fim desaceleração. O primeiro e último são definidos tendo em conta valores percentuais, até um máximo de 50 %, para um valor de aceleração igual para ambos.

São utilizados motores de passo no acionamento da mesa de construção e rolo distribuidor, e um motor de indução no varredor. A seleção dos motores de passo justifica-se devido ao seu controlo facilitado da posição do sistema fuso e porca, assim como a rotação no rolo distribuidor. No entanto, devido a serem necessárias elevadas velocidades de rotação para o varredor, um motor de passo não é o mais indicado devido ao seu baixo binário nessas velocidades, comparativamente com o seu *holding torque*.

Diferentes perfis são especificados para cada um dos três sistemas, variando a velocidade máxima e os valores percentuais da aceleração. O fator limitante é o tempo de curso de cada um, dado que um menor tempo contribui para uma maior capacidade de fabrico e produtividade. No entanto, com tempos muito reduzidos, obriga à utilização de maiores acelerações, resultando em maiores binários e esforços nos componentes. É por isso fundamental conjugar todos estes parâmetros de modo a encontrar uma solução o mais favorável possível. Na tabela 4.1 estão expostos os valores admissíveis obtidos.

Tabela 4.1: Condições de utilização admissíveis.

Localização	Rolo distribuidor	Mesa de trabalho	Varredor
Sistema	Direto	Fuso e porca	Fuso e porca
Passo (mm)	-	5	4
Velocidade máxima (rpm)	120	450	1500
Velocidade linear (m/s)	-	0.0375	0.1
Aceleração angular ( $\text{rad/s}^2$ )	650	200	8000
Aceleração linear ( $\text{m/s}^2$ )	-	0.16	5.1

No rolo distribuidor as velocidades não são muito elevadas, devido ao tempo necessário para o pó cair. No êmbolo a velocidade limite não é problema dado que no seu normal funcionamento este roda a velocidades muito baixas, devido ao reduzido deslocamento, corresponde à espessura de cada camada. Uma velocidade mais elevada é apenas necessária no fim de cada peça fabricada, para elevar a mesa de trabalho e permitir a sua remoção. Por último, o varredor apresenta elevados valores de velocidade e aceleração (comparativamente aos restantes) devido à importância deste mecanismo para o tempo de fabrico, permitindo assim atingir tempos de curso apreciáveis.

Os dois primeiros sistemas apresentam o mesmo perfil de movimento, variando apenas a direção de rotação. No entanto, o varredor apresenta um controlo mais complexo devido ao seu

sistema *one way recoating*, em que inicia na posição de distribuição do pó por parte do rolo distribuidor, até à disposição da primeira camada. No segundo movimento ocorre uma nova distribuição de camada até à posição do depósito de restos. Por último, um movimento até à posição inicial.

Os valores admissíveis apresentados são elevados tendo em conta a sua utilização, principalmente no caso do rolo distribuidor, garantindo assim uma maior flexibilidade para quem for operar a máquina, permitindo diferentes configurações com a garantia da sua operação com sucesso.

#### 4.1.2 Necessidades

As necessidades motoras são calculadas para cada um dos três sistemas motorizados. São tidos em conta os esforços estáticos para suportar o peso dos componentes, efeitos inerciais, efeitos de atrito dos componentes móveis e rendimentos associados a cada sistema. Inicialmente são contabilizados os efeitos estáticos e dinâmicos de acordo com a equação 4.1.

$$\tau_n = \tau_e + \tau_d \quad (4.1)$$

$\tau_n \rightarrow$  binário necessário (N · m).

$\tau_e \rightarrow$  binário estático (N · m).

$\tau_d \rightarrow$  binário dinâmico (N · m).

As necessidades a nível estático são dadas pela equação 4.2, contabilizando a força estática para conseguir suportar o peso dos componentes móveis em cada sistema a analisar.

$$\tau_e = \frac{F_{axial} \cdot P}{2 \cdot \pi} \quad (4.2)$$

$F_{axial} \rightarrow$  força axial (N).

$P \rightarrow$  passo do fuso (m).

Esta parcela é apenas contabilizada em componentes nos quais o esforço aplicado sobre eles (força gravítica) não é perpendicular ao seu movimento, verificando-se apenas na mesa de construção. A força necessária é dada pela equação 4.3, dependendo da massa de cada componente ( $n$ ) que compõe o sistema em análise.

$$F_{axial} = \left( \sum_1^n m_n \right) \cdot g \quad (4.3)$$

$m_n \rightarrow$  massa do componente (kg).

$g \rightarrow$  aceleração gravítica (m/s<sup>2</sup>).

Os efeitos inerciais são contabilizados no movimento linear e rotação dos componentes, dados pela equação 4.4.

$$\tau_d = \tau_{d_x} + \tau_{d_r} \quad (4.4)$$

$\tau_{d_x}$  → binário dinâmico movimento linear (N · m).

$\tau_{d_r}$  → binário dinâmico movimento rotação (N · m).

Para o movimento linear é utilizada a equação 4.5, de modo a calcular o binário imposto ao sistema, necessário para provocar a força necessária de modo a garantir o movimento linear dos componentes com a respetiva aceleração.

$$\tau_{d_x} = \frac{F_{d_x} \cdot P}{2 \cdot \pi} \quad (4.5)$$

$F_{d_x}$  → força aceleração linear (N).

$P$  → passo do fuso (m).

A força necessária para garantir a aceleração linear é dada pela equação 4.6.

$$F_{d_x} = \left( \sum_1^n m_n \right) \cdot a \quad (4.6)$$

$m_n$  → massa do componente (kg).

$a$  → aceleração linear (m/s<sup>2</sup>).

É considerado um fator de 0.5 sobre a força necessária ao movimento linear, com o objetivo de contabilizar os efeitos de atrito.

Devido à complexidade geométrica dos sistemas, é utilizado um cálculo matricial de modo a contabilizar os efeitos a três dimensões dos efeitos inerciais de rotação. São calculados tendo em conta a inércia dos componentes envolvidos, que apresentam este movimento durante o funcionamento da máquina, nomeadamente fusos, veios, chavetas e acoplamentos. Este é dado pela equação 4.7.

$$\tau_{d_r} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} & J_{xz} \\ J_{yx} & J_{yy} & J_{yz} \\ J_{zx} & J_{zy} & J_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$J_{ij}$  → momento de inércia do conjunto para cada eixo (kg · m<sup>2</sup>).

$\alpha_w$  → aceleração angular do conjunto para cada eixo de rotação (rad/s<sup>2</sup>).

Cada momento de inércia do conjunto para cada eixo de rotação,  $J_{ij}$ , é dado pelo somatório dos momentos de inércia de cada componente ( $n$ ) para esse eixo, que apresenta movimento de rotação, dependendo da sua distribuição de massa em relação a este, dado pela equação 4.8.

$$J_{ij} = \left( \sum_1^n J_{n_{ij}} \right) \quad (4.8)$$

$J_{n_{ij}} \rightarrow$  momento de inércia do componente no eixo  $ij$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ).

Todos os valores são calculados em relação ao referencial de rotação de cada sistema, no local de instalação dos motores elétricos. O *software* de modelação CAD usado, Solidworks, facilita a obtenção das matrizes de inércia para os respetivos conjuntos em análise.

De modo a verificar os valores obtidos e garantir a sua convergência, foi utilizada uma análise dinâmica de corpo rígido (*Rigid Body Dynamics*) que permite analisar as necessidades de cada sistema, tendo em conta o perfil de funcionamento do motor elétrico. Esta é uma poderosa ferramenta para análises de sistemas mais complexos, como é o caso, sendo mais tarde utilizada na secção 4.2.1 para calcular os esforços provocados nos apoios, durante o funcionamento de cada sistema.

A sua configuração é semelhante a uma análise de elementos finitos, no entanto não é necessário proceder à elaboração da malha de elementos, e por isso traduz-se numa computação muito mais rápida. No entanto, devido às suas semelhanças, a sua configuração é mais tarde aproveitada para realizar a validação final no capítulo 5. Na figura 4.2 está demonstrada a diferença entre as duas análises para o mesmo sistema, que se resume apenas à descrição geométrica dos componentes.

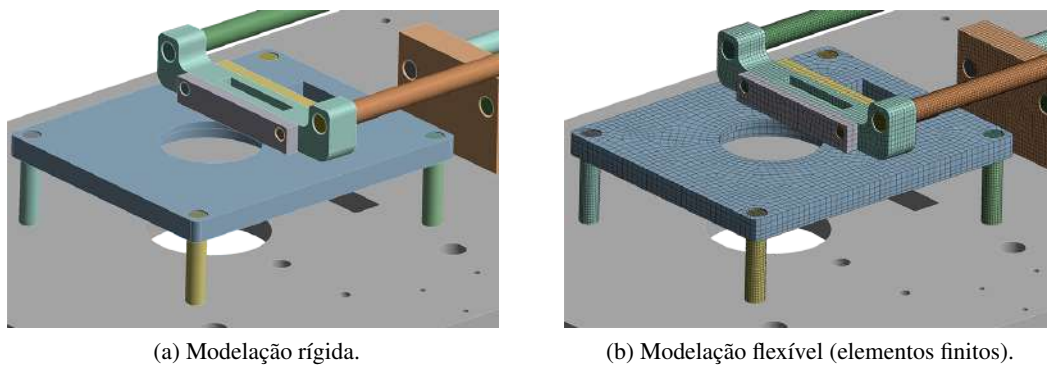


Figura 4.2: Comparação entre modelação rígida e flexível.

Foram realizadas três configurações, uma para cada sistema em análise, de acordo com o seu perfil de utilização do motor elétrico, descrito na figura 4.1 e de acordo com os valores admissíveis da tabela 4.1. A configuração para cada sistema está exposta na figura 4.3. Também é possível verificar os pontos de fixação de cada sistema e a consideração dos efeitos gravíticos, de modo a contabilizar os efeitos inerciais dos componentes.

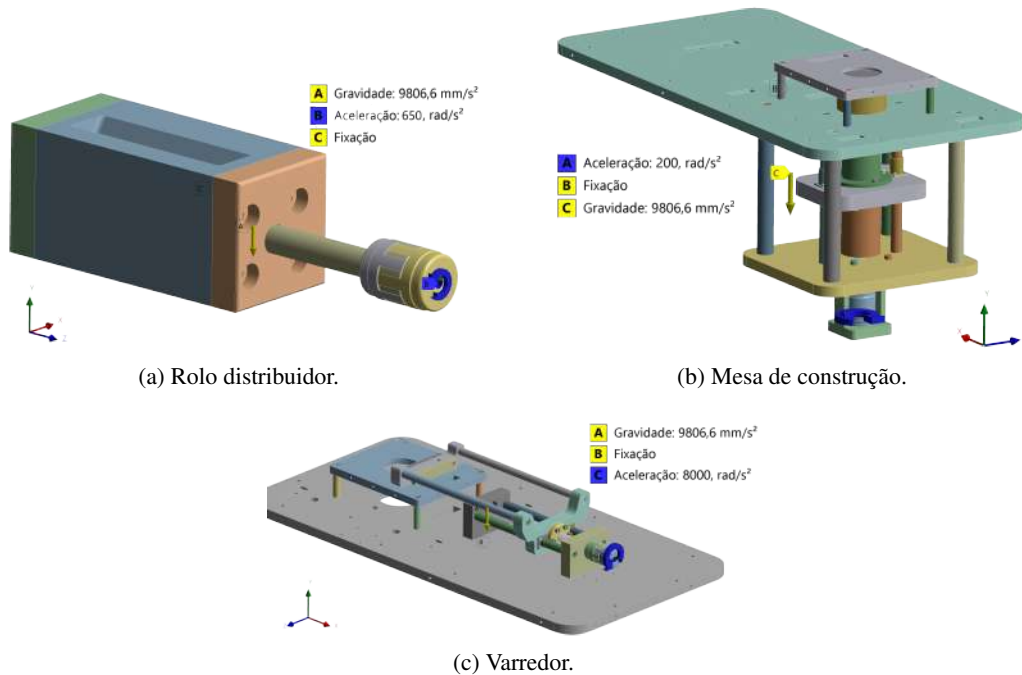


Figura 4.3: Configurações das análises dinâmicas de corpo rígido das necessidades motoras para os diferentes sistemas.

Os resultados obtidos através desta análise são comparados com o binário total calculado ( $\tau_n$ ), sendo contabilizado o maior valor ( $\tau_{max}$ ). É depois atribuído o rendimento de maneira geral e de acordo com o tipo de sistema de transmissão usado. No caso da mesa de construção e varredor, como se usa um sistema de fuso e porca trapezoidal, são esperados rendimentos na ordem dos 50 %. O rolo distribuidor apresenta ligação direta com o motor, sendo assim considerado um rendimento, de 60 %, de modo a contabilizar efeitos de atrito dos restantes componentes não tidos em conta no referido cálculo. É atribuída uma margem de segurança de 20 %, para garantir um correto funcionamento do motor em casos de alguma carga dinâmica inesperada em funcionamento. Estes fatores são considerados de acordo com a equação 4.9.

$$\tau_f = \frac{\tau_{max}}{\eta_s \cdot (1 - \eta_m)} \quad (4.9)$$

$\tau_f \rightarrow$  binário final necessário (N · m).

$\tau_{max} \rightarrow$  binário máximo (N · m).

$\eta_s \rightarrow$  rendimento do sistema de transmissão usado (0-1).

$\eta_m \rightarrow$  folga dada ao motor (0-1).

Os resultados obtidos estão expostos na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Necessidades motoras.

Localização		Rolo distribuidor	Mesa de construção	Varredor	
Mecanismo		Direto	Fuso e porca		
Passo (mm)		-	5	4	
Esforço estático		Massa (kg)	0	18.370	
		$\tau_e$ (N · m)	0	0.143	
Esforço dinâmico	Movimento linear	Massa (kg)	0	17.430	
		Aceleração linear (m/s <sup>2</sup> )	-	0.159	
		$\tau_{dx}$ (N · m)	-	0.044	
	Movimento angular	Aceleração angular (rad/s <sup>2</sup> )	650	200	8000
		$\tau_{dr}$ (N · m)	0.023	0.040	0.455
	$\tau_d$ (N · m)		0.023	0.084	0.720
$\tau_n$ (N · m)		0.023	0.227	0.720	
Análise dinâmica		0.018	0.230	1.096	
$\tau_{max}$ (N · m)		0.023	0.230	1.096	
$\eta_s$		0.6	0.5	0.5	
$\eta_m$		0.25	0.25	0.25	
$\tau_f$ (N · m)		0.048	0.575	2.740	

A justificação para haver uma pequena diferença nos valores é devido à complexidade da estrutura. Isto deve-se à distribuição de massa da estrutura em relação ao centro de rotação do fuso, já que os cálculos analíticos abrangem apenas cargas concentradas, e quanto mais descentradas estas estão, maior é a discrepância dos valores. Isto é verificado nos valores obtidos para o varredor, em que o centro de massa dos componentes móveis não está alinhado com o centro de rotação do fuso. Nos restantes sistemas, isto não se verifica, confirmando-se assim a convergência dos dois valores, sendo esta a principal vantagem da utilização dos dois métodos para a determinação das necessidades. A seleção dos motores de modo a satisfazer as necessidades dos diferentes sistemas, encontra-se na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Seleção dos motores elétricos.

Localização	Necessidades			Seleção		
	Velocidade (rpm)	Aceleração (rad/s <sup>2</sup> )	$\tau_f$ (N · m)	Fabricante	Modelo	Binário (N · m)
Rolo distribuidor	120	650	0.048	Moons	STM11S-2RE	0.07
Mesa de construção	450	200	0.575	Moons	STM23R-2E	0.7
Varredor	1500	8000	2.740	Abb	M2BAX 80MC 4	5.61

O fator limitante nas seleções foi o binário para os motores de passo, e a potência do motor para o motor de corrente alternada.

Selecionar um motor de passo com binário necessário não é suficiente, dado que é necessário verificar o seu regime de utilização. Para isso, os fabricantes fornecem as curvas velocidade-binário de cada motor, permitindo assim analisar a sua performance em todas as gamas de velocidade usada. Só assim é que é possível verificar se o motor opera com sucesso nas condições desejadas à sua aplicação. Um exemplo de uma curva deste tipo está exposta na figura 4.4, correspondente ao motor usado na mesa de construção.

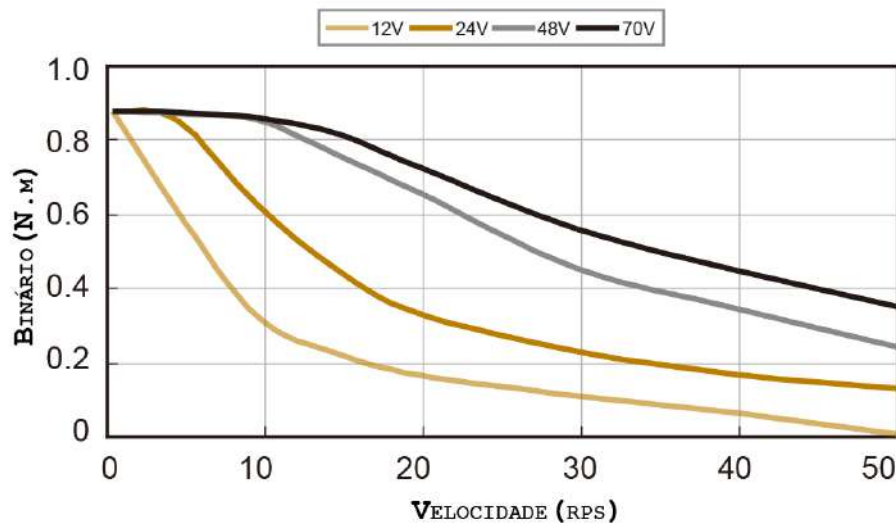


Figura 4.4: Curva velocidade-binário do motor STM23R-2E.

Uma das vantagens da utilização de motores de passo é o seu baixo custo e permitirem o seu controlo com precisão sem necessitar de *encoder* ou outro tipo de sensorização da sua posição, podendo ser operados em malha aberta. No entanto, isto é apenas possível se o motor operar sem falhas e não apresentar dificuldades em suportar a carga no limite da capacidade do motor. Caso contrário dá origem a falhas em cada passo e vibrações, sendo por isso necessário verificar se há condições para operar em malha aberta. Se for selecionado um motor com binário superior, por alguma folga (15-20%), relativamente ao binário necessário para a sua aplicação, este problema não existirá. É por isso que é fundamental fazer o correto dimensionamento das suas necessidades, para efetuar a sua cuidada seleção.

Devido à precisão de movimento necessária ao funcionamento da mesa de construção e rolo distribuidor, e de modo a garantir a maior fiabilidade, é optado pela utilização de *encoders* rotativos. São normalmente utilizados *encoders* capacitivos, tendo a vantagem relativamente aos restantes da sua compactidade e dado que a sua performance não é comprometida pelos contaminantes ambientais. A sua instalação pode ser aplicada a um motor de passo de dois veios. Uma outra solução é adquirir o motor de passo já com um *encoder* e placas de controlo integrados. Estes possuem diversas funções de controlo do movimento, prevenindo a falha de passos e atravancamento. Apresentam uma solução mais económica, compacta, e menos complexa

face às opções convencionais. Um exemplo de um motor com esta tecnologia integrada está apresentado na figura 4.5.



Figura 4.5: Motor de passo com *encoder* e placa de controlo integrados.

No varredor, como se trata de um motor de indução de corrente alternada, é necessário usar um variador de frequência para ajustes de velocidade. Não é necessária precisão de movimento, em que os fins de curso são os dois pontos máximos de movimento, servindo como referência no comando.

Na mesa de construção existe um fim de curso, na sua base, que seria usado como ponto de referência inicial, a partir do qual eram realizados os movimentos. No topo, apesar de não haver outro fim de curso, foram adicionados uns tubos de modo a limitar o movimento ascendente da base móvel, sendo este o ponto de curso máximo (Figura 3.12).

No rolo distribuidor são necessárias rotações de múltiplos de  $20^\circ$ , mas com precisão, justificando o uso do *encoder*, caso contrário podia existir erros na quantidade de pó por camada, resultando diretamente em erros na peça a fabricar.

## 4.2 Suportes

### 4.2.1 Esforços

Depois de serem estipuladas as condições admissíveis de utilização, é necessário verificar os esforços sofridos pelos apoios de cada um dos sistema de transmissão. Só depois é possível dimensionar e selecionar os mesmos.

No entanto, devido à complexidade geométrica que é um fuso e porca, para o varredor e mesa de construção, a sua contabilização dos esforços é mais complexa. Usando os valores de esforço máximo da tabela 4.2 e a parte da configuração descrita na figura 4.3, é realizada a análise dinâmica do sistema, com o objetivo de calcular os esforços nos apoios (Figura 4.6).



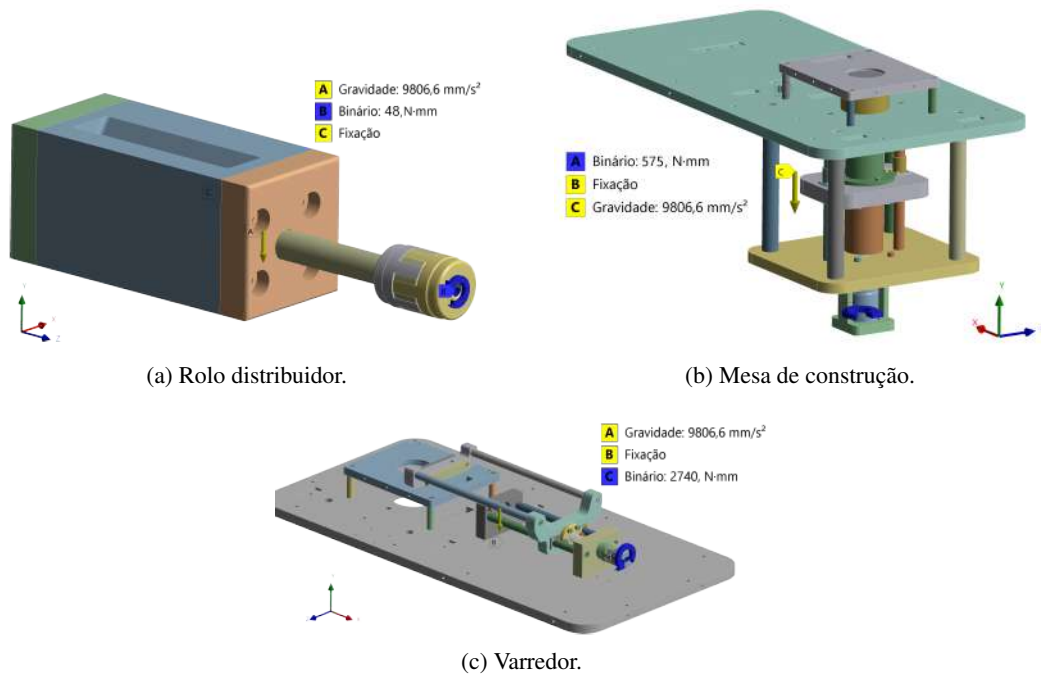


Figura 4.6: Configurações das análises dinâmicas de corpo rígido dos esforços nos suportes dos diferentes sistemas.

Esta análise é configurada tendo em conta os efeitos gravíticos, as fixações necessárias a cada sistema e o binário máximo que é provocado nos seus eixos ( $\tau_f$ ). Os resultados desses esforços estão expostos na tabela 4.4, sendo posteriormente utilizados para o dimensionamento dos rolamentos.

Tabela 4.4: Reações nos apoios.

Localização	Apoio	$F_r$ (N)	$F_x$ (N)
Rolo distribuidor	1	3.5	0
	2	3.5	0
Mesa de construção	1	1.3	722.6
Varredor	1	247.1	4304.0
	2	247.1	4304.0

Os valores dados para as forças axiais, correspondem ao maior valor possível, em caso de travancamento em que todos os esforços são realizados de modo a deslocar axialmente a porca.

### 4.2.2 Rolamentos

Os rolamentos são o principal tipo de suporte em veios de rotação, sendo fundamentais para um movimento controlado deste. Estes suportam os diversos esforços a que o veio é submetido, nomeadamente forças axiais e radiais. As características de cada um variam com a sua geometria, sendo uns mais indicados do que outros para determinadas cargas ou aplicações.

Tendo em conta os valores obtidos em 4.4, as forças axiais são o principal tipo de esforço. É por isso necessário o uso de rolamentos de contacto angular em ambas as aplicações. No caso da mesa de construção, como esta apresenta apenas um apoio, e de modo a garantir um maior apoio do veio, será optado por um rolamento de dupla carreira.

O seu dimensionamento depende principalmente da capacidade de carga necessária, estática e dinâmica.

#### Capacidade Estática

A capacidade de carga estática de um rolamento ( $C_o$ ) é determinada recorrendo à equação 4.10.

$$C_o = f_s \cdot P_o \quad (4.10)$$

$C_o \rightarrow$  capacidade de carga estática (N).

$f_s \rightarrow$  coeficiente de segurança.

$P_o \rightarrow$  carga estática equivalente (N).

O coeficiente de segurança permite evitar a ocorrência de deformação plástica entre os corpos rolantes e a pista, dependendo do grau de exigência associado. Para o caso em questão foi utilizado um coeficiente de segurança de 2.

A carga estática equivalente (Equação 4.11) depende das forças a que o rolamento é submetido.

$$P_o = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_x \quad (4.11)$$

$P_o \rightarrow$  carga estática equivalente (N).

$X_0 \rightarrow$  fator radial estático.

$F_r \rightarrow$  carga radial (N).

$Y_0 \rightarrow$  fator axial estático.

$F_x \rightarrow$  carga axial (N).

Ambos os fatores,  $X_0$  e  $Y_0$ , são coeficientes que dependem do rolamento selecionado, estando relacionados com a sua capacidade a resistir à respetiva carga. São coeficientes que variam de rolamento para rolamento e são facultados pelo fabricante. As forças correspondem às reações nos apoios calculadas anteriormente.

### Capacidade Dinâmica

A capacidade de carga dinâmica de um rolamento ( $C$ ) é determinada recorrendo à equação 4.12.

$$C = \frac{f_t}{f_n \cdot f_t} \cdot P \quad (4.12)$$

$C \rightarrow$  capacidade de carga dinâmica (N).

$P \rightarrow$  carga dinâmica equivalente (N).

$f_t \rightarrow$  fator de esforços dinâmicos.

$f_n \rightarrow$  fator de rotação.

$f_t \rightarrow$  fator de temperatura.

O fator de esforços dinâmicos depende da aplicação a que o veio está sujeito. No caso em questão, como se destina a aplicações que envolvem acionamento por parte de motores, este fator tem o valor de 3.

O fator de rotação depende do tipo de rolamento selecionado e da velocidade de rotação máxima do veio, de acordo com a tabela 4.1. O fator de temperatura contabiliza a temperatura máxima de serviço esperada, que é idêntica à temperatura ambiente, dado que estes estão instalados no lado exterior do isolamento, tomando este o valor de 1.

A carga dinâmica equivalente é calculada de modo idêntico à carga estática, dada pela equação 4.13.

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_x \quad (4.13)$$

$P \rightarrow$  carga dinâmica equivalente (N).

$X \rightarrow$  fator radial dinâmico.

$F_r \rightarrow$  carga radial (N).

$Y \rightarrow$  fator axial dinâmico.

$F_x \rightarrow$  carga axial (N).

Assim como  $X_0$  e  $Y_0$ , os fatores  $X$  e  $Y$  são obtidos a partir do fabricante. Os resultados obtidos estão expostos na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Cálculos para o dimensionamento dos rolamentos.

Localização	Mesa de construção	Varredor	
		1 - Esquerda	2 - Direita
Apoio	1	1 - Esquerda	2 - Direita
$F_r$ (N)	1.3	247.1	247.1
$F_x$ (N)	722.6	4304.0	4304.0
Tipo	Contacto Angular	Contacto Angular	Contacto Angular
$X_0$	0.63	0.57	0.57

$Y_0$	0.66	0.52	0.52
$P_0$ (N)	477.7	4757.9	4757.9
$f_s$	2	2	2
$C_0$ (N)	955.4	4757.9	4757.9
X	0.78	0.55	0.55
Y	1.24	0.93	0.93
P (N)	897.0	4138.8	4138.8
$f_l$	3	3	3
$f_n$	0.405	0.281	0.281
$f_t$	1.0	1.0	1.0
C (N)	1915.3	9692.3	9692.3

Na tabela 4.6 está apresentada a seleção dos rolamentos.

Tabela 4.6: Rolamentos selecionados.

Calculado				Rolamentos selecionados				
Localização	Apoio	$C_0$ (kN)	C (kN)	Fabricante	Modelo	$C_0$ (kN)	C (kN)	$V_{max}$ (rpm)
Mesa de construção	1	1.0	1.9	SKF	3302 ATN9	9.3	15.1	16000
Varredor	1	4.8	9.7	SKF	7301 BEP	5	10.6	24000
	2	4.8	9.7	SKF	7301 BEP	5	10.6	24000

### 4.2.3 Casquilhos

No rolo distribuidor os esforços a que os casquilhos são submetidos são muito reduzidos (Tabela 4.4) não sendo por isso descrita a análise na seleção destes. Os parâmetros a ter em consideração na sua seleção são as pressões e velocidades superficiais determinados pelo fabricante Igus [16].

## 4.3 Elementos de Transmissão de Potência

Como referido anteriormente, os elementos de transmissão de potência usado nos mecanismos da máquina são um fuso e porca. Esta secção destina-se a justificar a sua seleção.

A utilização de uma porca em polímero apresenta diversas vantagens relativamente a uma porca de bronze ou outro material, que é a ausência de lubrificação e reduzida manutenção. A sua aplicação está principalmente limitada pelos esforços axiais, pressão superficial e valor pv. Para cada tamanho e composição (material) da porca estão atribuídos os seus valores admissíveis,

determinados pelo fabricante. O seu tamanho é dependente do tamanho do fuso usado, que foi selecionado de acordo com as capacidades de carga dos rolamentos calculadas anteriormente e o diâmetro mínimo do veio para garantir uma correta instalação. Tendo isso em conta, foi utilizado um fuso Tr24x5 na mesa de construção e um Tr20x4 no varredor.

A força axial máxima é calculada usando a equação 4.14, tendo como entrada o binário máximo calculado na tabela 4.2. Este valor tem de ser obrigatoriamente inferior ao valor máximo permitido para o produto em questão.

$$F_{a.max} = \frac{\tau_f \cdot 2 \cdot \pi}{P} \quad (4.14)$$

$F_{a.max}$  → força axial máxima na porca (N).

$\tau_f$  → binário final necessário (N · m).

$P$  → passo do Fuso (m).

A pressão superficial das porcas é calculada com o objetivo de validar a distribuição da força axial máxima pela área resistente da porca, dada pela equação 4.15.

$$P_{max} = \frac{F_{a.max}}{A_r} \quad (4.15)$$

$P_{max}$  → pressão superficial máxima (MPa).

$F_{a.max}$  → força axial máxima na porca (N).

$A_r$  → área resistente (mm<sup>2</sup>).

Este valor é depois usado para calcular o valor pv máximo, que é um indicador que contabiliza as pressões superficiais máximas com a sua velocidade e perfil de utilização. É calculado a partir da equação 4.16.

$$Pv_{max} = \frac{P_{max} \cdot n \cdot d_1 \cdot \pi}{60000} \quad (4.16)$$

$Pv_{max}$  → pv máximo (MPa · m/s).

$P_{max}$  → pressão superficial máxima (MPa).

$n$  → velocidade de rotação (rpm).

$d_1$  → diâmetro do passo (m).

Os valores calculados estão expostos na tabela 4.7.

Com base nos valores obtidos, é possível usar uma porca de polímero na mesa de construção, com a limitação da velocidade de rotação máxima, caso contrário os valores pv seriam excedidos. A seleção de um fuso Tr24 x 5 para este caso também se deveu a estes valores, dado que a seleção de um fuso de menores dimensões iria implicar numa velocidade máxima admissível ainda inferior.

Tabela 4.7: Dimensionamento das porcas em polímero.

Localização	Mesa de construção	Varredor
Fabricante	Igus	Igus
Produto	JFRM - 2835TR24x5	JFRM - 2835TR20x4
Passo (mm)	5	4
$\tau_f$	0.575	2.740
$F_{a,max}$ (N)	722.6	4303.98
Força axial admissível (N)	5994	4976
$A_r$ (mm <sup>2</sup> )	1486	1244
Pressão superficial (MPa)	0.46	3.46
Pressão superficial admissível (MPa)	4	4
n (rpm)	450	1500
$d_1$ (mm)	20.65	17.25
$Pv_{max}$ (Mpa · m/s)	0.30	4.69
$Pv$ admissível (Mpa · m/s)	0.24	0.34
Utilização da porca em polímero	✓	✗

No varredor, apesar dos esforços axiais não serem críticos, devido aos elevados valores de velocidade e devido ao seu uso contínuo e intensivo, os valores p.v.max, especificados pelo fabricante são excedidos. É por isso utilizada uma porca de bronze neste caso.

Uma das dificuldades encontradas foi conseguir garantir um correto apoio e montagem dos veios nos respectivos rolamentos, dependendo da altura mínima do encosto [23], evitando ter de reduzir o diâmetro do veio, o que depois iria afetar a seleção dos rolamentos. A solução foi complementar este apoio de modo a atingir a altura mínima usando o dente do fuso, que tem de ser posteriormente maquinado.

## 4.4 Ligações Mecânicas

### 4.4.1 Chavetas

Foi optado pela utilização de chavetas para efetuar a ligação entre os componentes de transmissão de potência. No seu dimensionamento existem dois critérios que têm de ser respeitados para a chaveta em questão ser admissível para uso na aplicação desejada:

- Resistência ao corte do material.
- Resistência à compressão-esmagamento.  
O primeiro é dado pela equação 4.17 :

$$\tau_a = \frac{2 \cdot \tau_f}{L \cdot b \cdot d} < \tau_{a.adm} \quad (4.17)$$

em que ,

$\tau_a \rightarrow$  tensão de corte (MPa).  
 $\tau_f \rightarrow$  binário final necessário (N · m).  
 $L \rightarrow$  comprimento útil da chaveta (m).  
 $b \rightarrow$  largura da chaveta (mm).  
 $d \rightarrow$  diâmetro do veio (mm).  
 $\tau_{a.adm} \rightarrow$  tensão de corte admissível (MPa).

O segundo corresponde à equação 4.18:

$$\sigma_d = \frac{2 \cdot \tau_f}{L \cdot d \cdot (h - t_1)} < \sigma_{a.adm} \quad (4.18)$$

$\sigma_d \rightarrow$  tensão de esmagamento (MPa).  
 $\tau_f \rightarrow$  binário final necessário (N · m).  
 $L \rightarrow$  comprimento útil da chaveta (m).  
 $d \rightarrow$  diâmetro do veio (mm).  
 $h \rightarrow$  altura da chaveta (mm).  
 $t_1 \rightarrow$  altura da chaveta no veio (mm).  
 $\sigma_d \rightarrow$  tensão de esmagamento admissível (MPa).

Sendo  $\tau_{a.adm}$  e  $\sigma_{a.adm}$  as respectivas tensões admissíveis do material. Estes valores dependem do tipo de ligação usado. Como se trata de uma ligação fixa, a tensão de esmagamento admissível é de 130 MPa e a de corte é de 70 MPa, devido a ser uma sollicitação não constante. No entanto, como se trata de uma carga reversível porque tem dois sentidos possíveis de movimento, estes valores são reduzidos por um fator de 1,5 [23]. Na tabela 4.8 estão expostos os resultados obtidos e as chavetas selecionadas.

Tabela 4.8: Ligações mecânicas.

Localização	$\tau_f$ (N · m)	$\varnothing_{\text{veio}}$ (mm)	DIN	$\tau_a$ (MPa)	$\tau_{a.adm}$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$\sigma_{a.adm}$ (MPa)
Veio com rolo	0.048	18	A DIN 6885 - 6 x 6 x 16	0.06	46.7	0.13	86.7
Acoplamento com veio	0.048	12	B DIN 6885 - 4 x 4 x 10	0.2	46.7	0.53	86.7
Motor com acoplamento	0.048	5	B DIN 6885 - 2 x 2 x 10	0.95	46.7	2.38	86.7
Acoplamento com veio	0.575	15	A DIN 6885 - 5 x 5 x 14	1.10	46.7	2.74	86.7
Motor com acoplamento	0.575	6.35	B DIN 6885 - 2 x 2 x 15	6.04	46.7	15.09	86.7
Acoplamento com veio	2.740	12	A DIN 6885 - 5 x 5 x 14	6.52	46.67	16.31	86.7
Motor com acoplamento	2.740	19	A DIN 6885 - 6 x 6 x 20	2.40	46.67	5.77	86.7

#### 4.4.2 Acoplamentos

Os acoplamentos são usados quando se pretende ligar diretamente dois veios para uma transmissão de potência. A sua seleção está dependente do tipo de aplicação, das dimensões dos veios, binário a transmitir e a magnitude máxima admissível dos desvios entre os dois veios. Tendo em conta que acoplamentos rígidos não permitem a compensação de desvios entre veios, foi considerado o uso de acoplamentos elásticos que têm a principal vantagem de:

- Absorver ou atenuar irregularidades de rotação.
- Atenuar choques e picos de binário de transmissão.
- Compensar desalinhamentos, nomeadamente axiais, angulares e radiais.

No entanto, dado que estes acoplamentos possuem um elastómetro que é responsável pela transmissão do binário, irá existir um desvio angular considerável entre os dois veios, cujo valor não é admissível para aplicações em que é necessário elevada precisão de movimento, como é o caso da mesa de construção. Por estes motivos, neste sistema é usado um acoplamento rígido, sendo um acoplamento elástico usado nos restantes. Os acoplamentos rígidos servem para unir veios de tal forma que funcionem como uma única peça, alinhando-os de forma precisa [23].

Os acoplamentos elásticos selecionados são os rotex devido ao seu preço económico, facilidade de instalação e variabilidade existente no fabricante. O acoplamento rígido é do modelo toolflex. Uns exemplos dos modelos em questão estão presentes na figura 4.7.

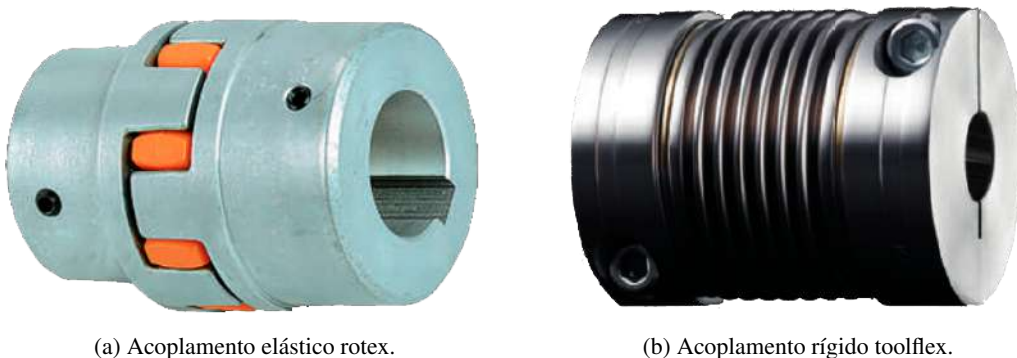


Figura 4.7: Acoplamentos usados nas ligações aos motores elétricos.

O dimensionamento dos acoplamentos começa pela determinação do binário máximo de operação. Este valor é obtido tendo em conta o binário a transmitir, contabilizando diversos fatores de serviço associado ao acoplamento, fornecidos pelo fabricante, segundo a equação 4.19.

$$\tau_{kmax} = \tau_f \cdot f_{st} \cdot f_{sz} \cdot f_{sr} \cdot f_{sb} \quad (4.19)$$



- $\tau_{kmax}$  → binário máximo de operação (N · m).  
 $\tau_f$  → binário final necessário (N · m).  
 $f_{st}$  → fator de temperatura de funcionamento.  
 $f_{sz}$  → fator de arranques por hora.  
 $f_{sr}$  → fator de direcional do movimento.  
 $f_{sb}$  → fator de aplicação em concreto.

Depois de efetuados os cálculos referidos, foi possível selecionar os acoplamentos necessários (Tabela 4.9).

Tabela 4.9: Acoplamentos selecionados.

Localização	Rolo distribuidor	Mesa de construção	Varredor
Fabricante	Ktr	Ktr	Ktr
Tipo Acoplamento	Elástico	Rígido	Elástico
Modelo	Rotex	Toolflex	Rotex
Tamanho	12	20	24
Material	Alumínio (Al-H)	Alumínio (Al-H)	Alumínio (Al-H)
Elastómetro	T-pur - 92 Shore A	-	T-pur - 64 Shore D
$\varnothing_{entrada}$ (mm)	5	6.35	19
$\varnothing_{saida}$ (mm)	12	15	12
$\tau_f$ (N · m)	0.048	0.575	2.740
$f_{st}$	1.2	1	1.2
$f_{sz}$	2	1.8	2
$f_{sr}$	1.7	1.7	1.7
$f_{sb}$	4	4	4
$M_{kmax}$ (N · m)	0.78	7.04	44.72
Binário máximo admissível (N · m)	5	15	60

## Capítulo 5

# Modelação Numérica

De modo a verificar a integridade da estrutura e de todos os componentes constituintes da DMLS, é importante realizar uma análise estrutural recorrendo ao método de elementos finitos. Deste modo conseguimos prever a sua falha durante o seu funcionamento, de modo a ser possível corrigir na fase de projeto. Usando estas ferramentas é possível detetar facilmente uma fragilidade no sistema, de modo a desenvolver um novo design.

Devido à elevada exigência computacional para a simulação completa, é necessário efetuar a verificação por componentes ou conjunto de componentes. Esta é então dividida entre os diversos sistemas descritos no capítulo 3, à exceção da estrutura principal (vedação), dado que não há qualquer esforço relevante a ter em conta. É uma análise estática, dado que uma análise transiente era muito exigente a nível computacional.

É pretendido verificar a estrutura assim como os seus elementos de ligação. Há diversos métodos que permitem analisar até ao mais pequeno detalhe, tais como a rosca da ligação, com um reduzido esforço computacional [24]. *Virtual Threading* é um algoritmo que permite recriar as roscas das ligações aparafusadas, sem o excessivo esforço computacional da representação desta em elemento sólidos. Estes efeitos são considerados a nível dos cálculos, mas não a nível visual e da malha de elementos. A nível dos elementos de transmissão de potência, os fusos e porcas foram considerados apenas como modelação rígida, não apresentando a malha de elementos para o constituir, não havendo por isso a análise aos esforços nestes. Isto deve-se ao facto do esforço computacional necessário para descrever estes componentes ser muito elevado, difícil com os recursos disponíveis.

Foram realizadas algumas simplificações na caracterização de alguns componentes, principalmente parafusos, com o objetivo de reduzir a quantidade de elementos necessários para descrever a sua geometria. Os apoios, rolamentos e casquilhos não são representados devido à sua complexidade e são substituídos por juntas (*joints*) cilíndricas e de revolução, permitindo contabilizar os efeitos destes componentes sem a sua representação [24].

Foram usados na maioria elementos hexaédricos devido à precisão associado ao seu cálculo e rápida computação, traduzindo numa melhor qualidade da análise. Porém, quando isto não é possível devido às geometrias mais complexas, são usados elemento tetraédricos. Elementos de segunda ordem são evitados ao máximo devido ao seu peso computacional, sendo apenas usados

em regiões geométricas mais complexas [24]. Todos os sistemas foram refinados o máximo possível, até atingir o limite computacional.

A exposição de resultados da análise relativamente aos componentes das ligações mecânicas, é realizada de forma individual, devido aos gradientes dos resultados existentes. Na demonstração dos resultados não são apresentados os elementos da malha, caso contrário as imagens ficariam impercetíveis.

É importante ter em conta a tensão de cedência dos materiais a usar. Na maioria dos componentes a fabricar é utilizado o aço EN C45E, que apresenta uma tensão de cedência de 450 MPa. Nos restantes componentes, os esforços nestes não são significativos. Os parafusos e porcas são de alta qualidade, classe alta (8.8), com tensões de cedência perto de 640 MPa [23]. As deformações nestes elementos não são analisadas dado que não se traduz na deformação real destes. Isto é devido a que as deformações sofridas pelos elementos em que se encontram instalados, são acrescidas às deformações dos elementos de ligação, não transmitindo assim a correta deformação. Sendo assim, apenas as tensões serão expostas, nomeadamente na região mais crítica.

## 5.1 Rolo Distribuidor

Não foram realizadas mais simplificações do que aquelas já mencionadas anteriormente. Este é um sistema relativamente mais simples que os restantes, e o aspeto mais crítico serão os esforços provocados na estrutura pela cabeça galvanométrica e pelo depósito de pó de 18,6 kg em cima do bloco do rolo distribuidor. O peso do primeiro foi apenas atribuído e não está representado na geometria, enquanto o segundo está representado e possui modelação rígida. A configuração da análise está exposta na figura 5.1.

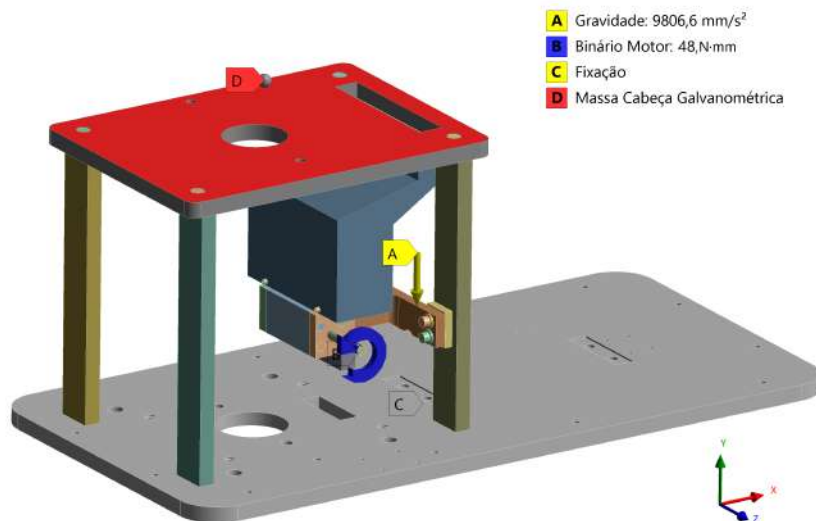
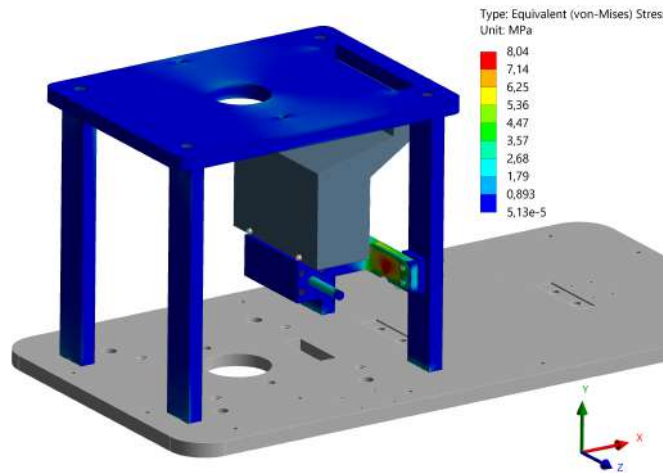
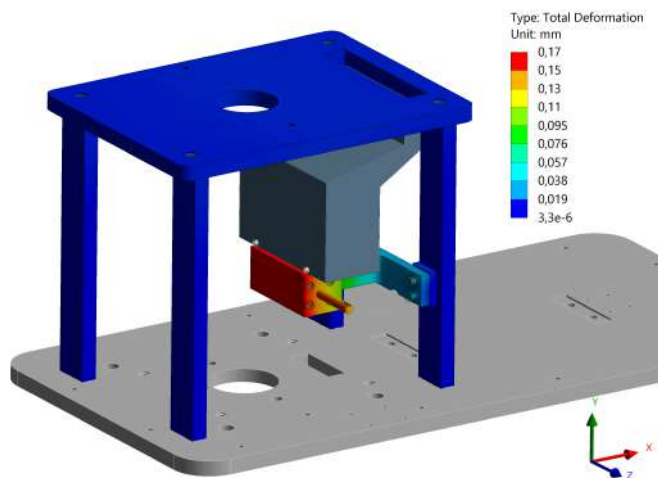


Figura 5.1: *Setup* da análise numérica ao rolo distribuidor.

A mesa apresenta modelação rígida, dado que irá ser validada aquando da validação da estrutura de suporte. Possui fixação na base e o binário máximo admissível de acordo com a tabela 4.2 foi aplicado no veio ao qual está ligado o motor de passo. Os valores obtidos estão representados na figura 5.2.



(a) Tensões equivalentes de von-Mises.



(b) Deformações.

Figura 5.2: Tensões e deformações no rolo distribuidor.

A nível estrutural a região mais crítica é a estrutura de suporte. No entanto, este valor de tensão é muito inferior ao limite de cedência do aço usado, havendo um elevado coeficiente de segurança. O aspeto crítico é no que toca à deformação, dado que é necessário garantir um bom nivelamento da estrutura, em que o conjunto varredor apresentado na figura 3.9, encontra-se a apenas 2 mm de distância. Outro aspeto a limitar este valor é a ligação ao motor, que é tolerante a desnivelamentos devido ao uso do acoplamento elástico, mas entre limites especificados pelo fabricante. Na figura estão representadas as deformações da resultante dos três eixos, sendo que em relação ao eixo Y, esta apresenta o valor de -0.17 mm. Este valor não é crítico para nenhum

dos aspetos referidos, mas caso se verifique instabilidade na prática, a quantidade de pó total deve ser reduzida. Este apresenta quantidade para cinco peças, podendo ser facilmente reduzido para quatro, de modo a obter menores esforços neste componente.

As ligações mecânicas estão apresentadas na figura 5.3.

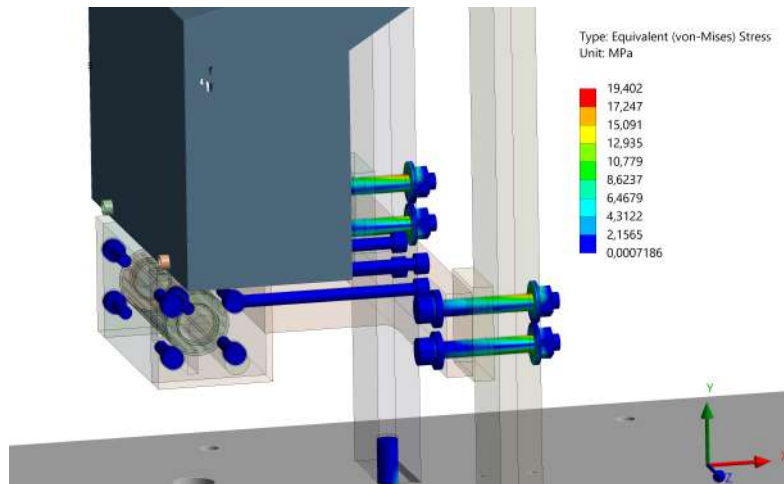


Figura 5.3: Verificação das ligações mecânicas.

## 5.2 Varredor

A configuração está exposta na figura 5.4. Apresenta uma fixação na base da mesa e o binário máximo admissível de acordo com a tabela 4.2 foi contabilizado.

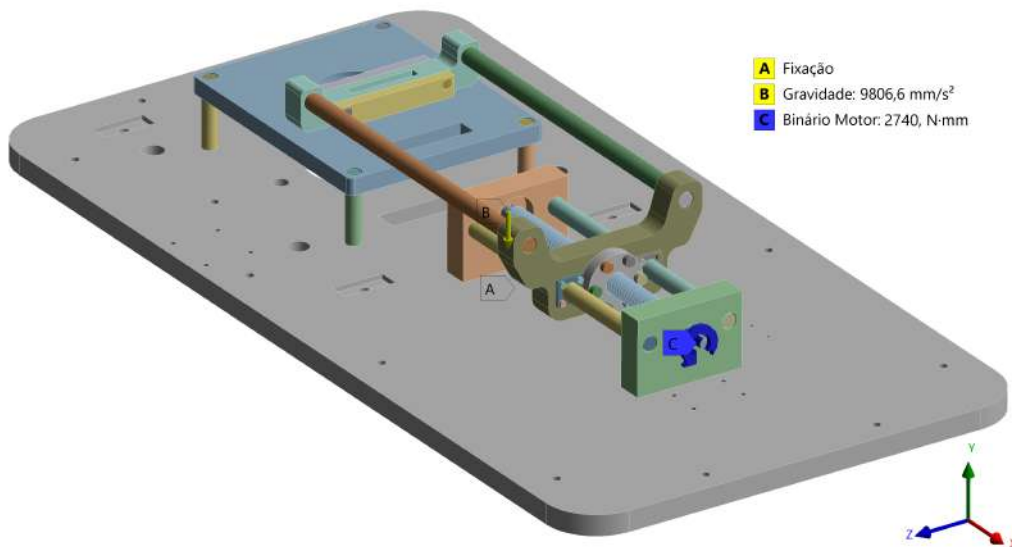
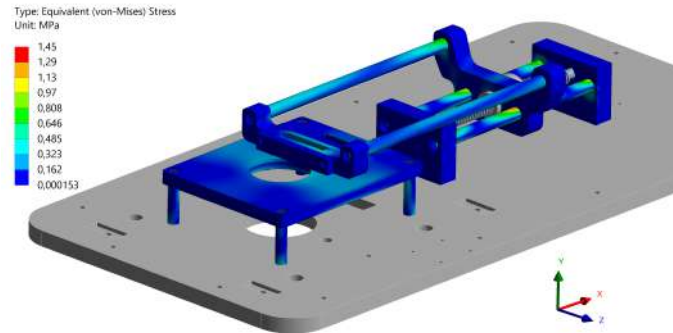
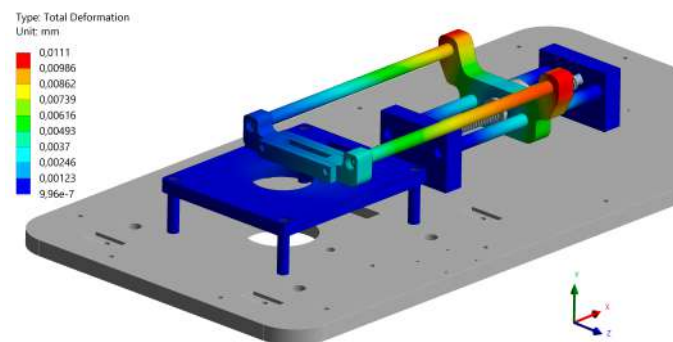


Figura 5.4: *Setup* da análise numérica ao varredor.

O aspeto a ter em maior consideração são as deformações dos varões, porque apesar dos esforços serem poucos, o seu próprio peso e distância até à mesa podem resultar numa elevada flexão destes, contribuindo para um desgaste acentuado do plástico na mesa de trabalho e possíveis problemas na distribuição do pó. O resultado encontra-se na figura 5.5.



(a) Tensões equivalentes de von-Mises.



(b) Deformações.

Figura 5.5: Tensões e deformações no varredor.

Para ter a noção dos valores em relação a um só eixo, sendo o eixo Y o mais relevante, estes valores são apresentados na figura 5.6.

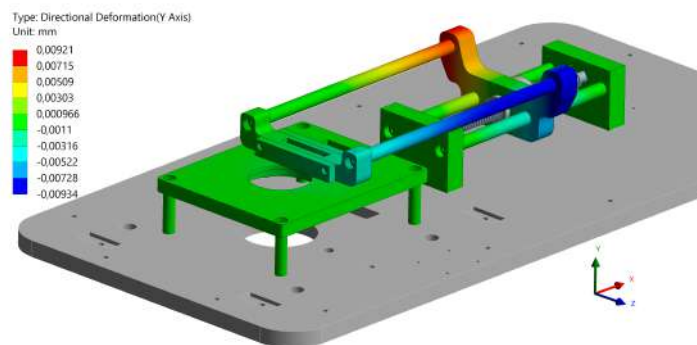


Figura 5.6: Verificação das deformações em y.

Como é esperado, ocorre uma certa torsão da estrutura móvel, que se deve ao momento torsor aplicado no fuso. É possível verificar que a deformação dos varões é inferior a  $10 \mu\text{m}$ , concluindo que o diâmetro destes é suficiente para garantir um bom nivelamento sem necessitar de umas guias extra que os suportem.

O resultado para as ligações mecânicas está na figura 5.7.

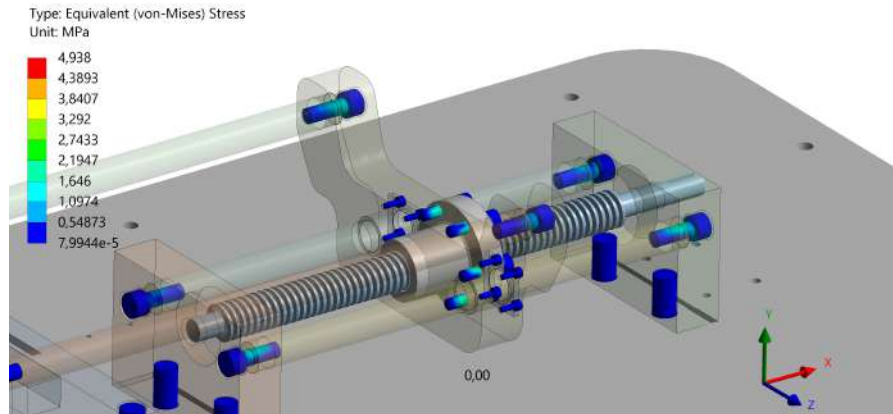


Figura 5.7: Verificação das ligações mecânicas.

### 5.3 Mesa de Construção

A configuração da análise está descrita na figura 5.8. Foi considerado o peso da quantidade de pó máxima a suportar pela peça a fabricar, a fixação na base da mesa, equivalente a estar fixa à estrutura de suporte e o binário máximo de acordo com a tabela 4.2.

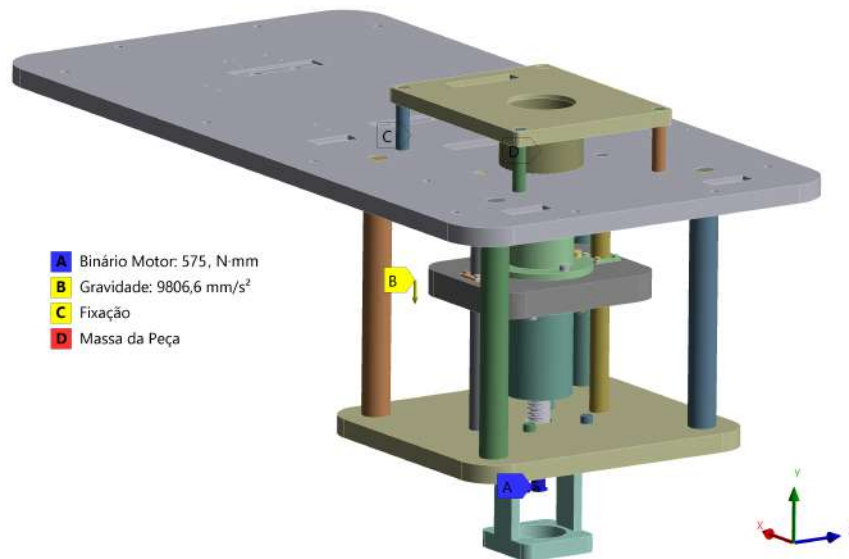
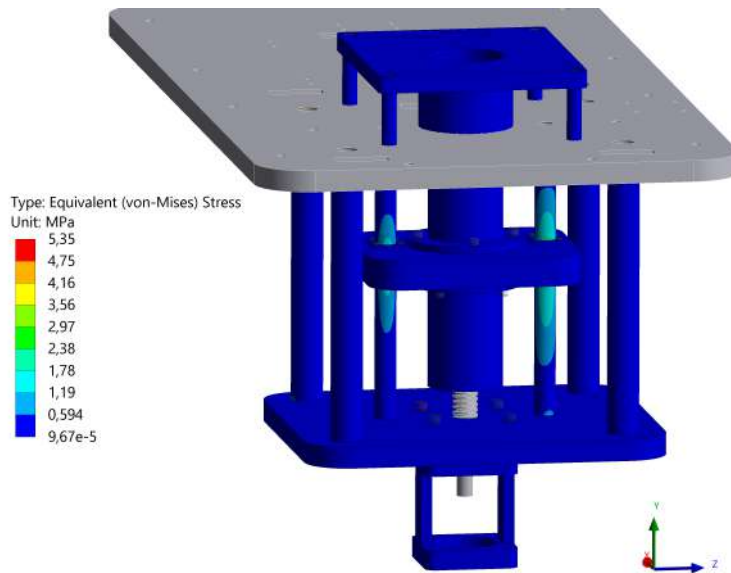
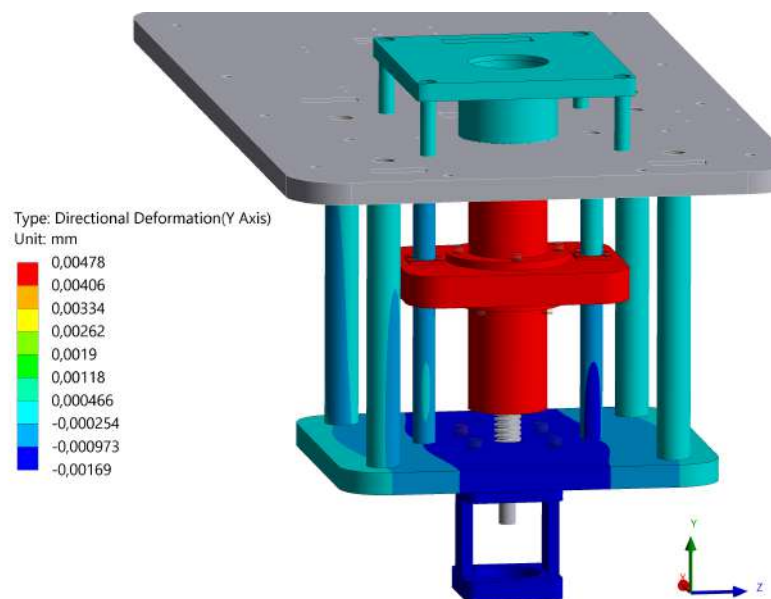


Figura 5.8: *Setup* da análise numérica na mesa de trabalho.

O resultado dos esforços na estrutura estão na figura 5.9.



(a) Tensões equivalentes de von-Mises.



(b) Deformações em y.

Figura 5.9: Tensões e deformações na mesa de trabalho.

Os resultados obtidos para as ligações mecânicas estão expostos na figura 5.10.



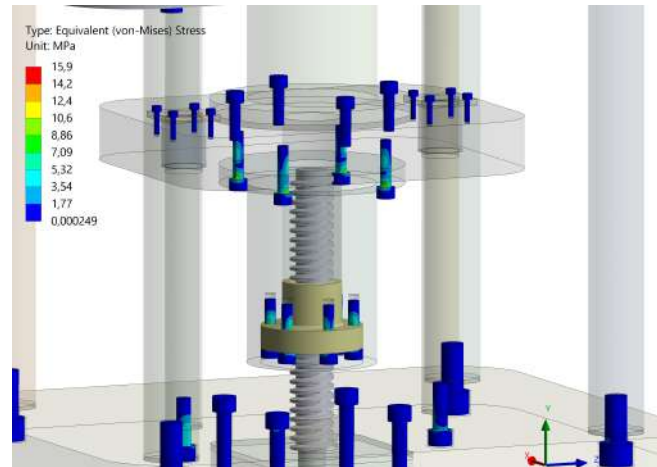


Figura 5.10: Verificação das ligações mecânicas.

## 5.4 Estrutura de Suporte

Devido à complexidade desta estrutura, nomeadamente dos perfis de alumínio, seria muito vantajoso tirar proveito da sua simetria ao realizar a análise de elementos finitos. Contudo, dado que a simetria se aplica a todo o modelo, e o mesmo não se verifica na carga imposta, dado que o centro geométrico não coincide com o centro de massa da restante estrutura (não representada), não é uma simplificação válida. Tendo isto em conta, a análise foi realizada usando o modelo completo, com o peso de cada estrutura atribuído aos seus pontos de suporte. A desvantagem desta opção é uma análise mais demorada e com um menor refinamento.

A configuração desta análise está representada na figura 5.11.

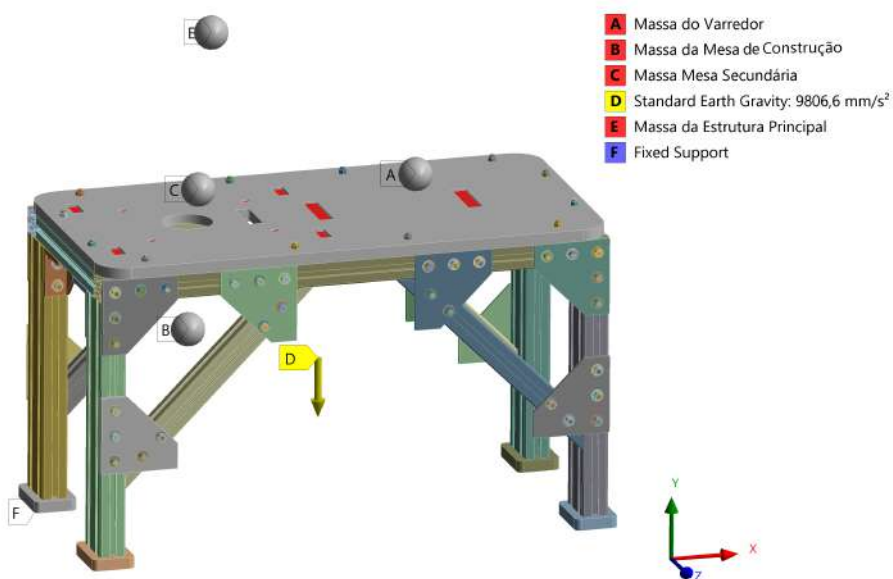
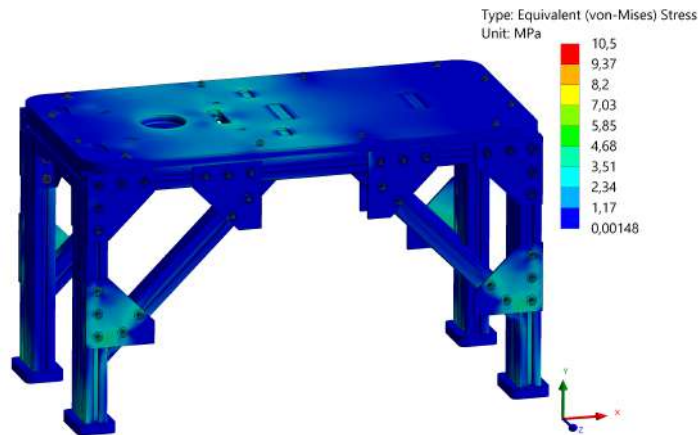


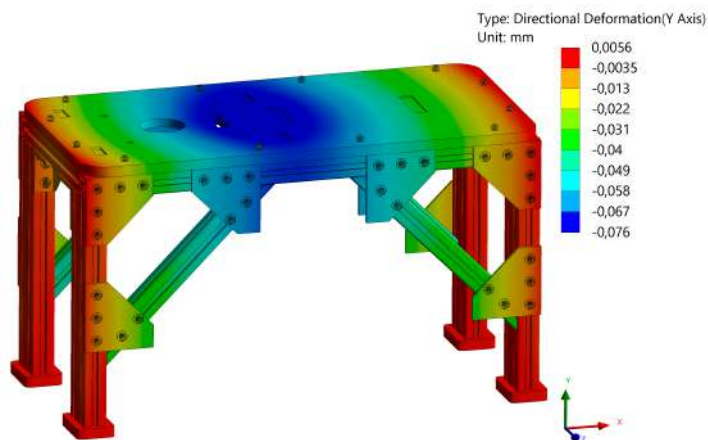
Figura 5.11: *Setup* da análise numérica à estrutura de suporte.

Os apoios móveis na base são removidos, e os perfis apresentam uma simplificação de modo a ser possível a criação da malha de elementos. Porém, as regiões que foram simplificadas, contribuam para uma menor resistência à flexão e rigidez estrutural, sendo por isso esta uma simplificação conservadora.

Não há nenhum esforço direto, apenas as cargas referidas anteriormente e o peso da própria estrutura. Os resultados para a estrutura estão exibidos na figura 5.12.



(a) Tensões equivalentes de von-Mises.



(b) Deformações em y.

Figura 5.12: Tensões e deformações na estrutura de suporte.

A deformação mais relevante a ter em conta é ao longo do eixo Y, na vertical da estrutura. O seu valor é crítico para o correto nivelamento e funcionamento da máquina. Tendo em conta que o valor máximo é de  $75 \mu\text{m}$ , este valor foi considerado aceitável. No entanto, é possível um reforço da estrutura com um perfil no seu centro. Esta é a opção mais viável e suficiente para obter valores ainda menos significativos, comparativamente a outras opções como o uso de perfis maiores, o que aumentaria o custo significativamente. Os resultados obtidos para as ligações mecânicas estão exibidos na figura 5.13

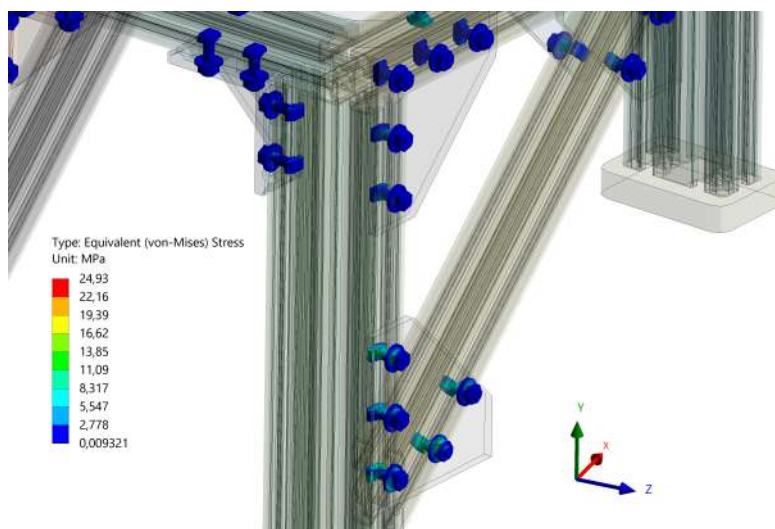


Figura 5.13: Verificação das ligações mecânicas.

## 5.5 Síntese

Seria esperado que houvesse variações com a modelação do fuso e porca como modelo flexível, dado que as forças de contacto entre os dois eram consideradas de maneira mais precisa, e as respectivas deformações dos dois componentes seriam tidas em conta, afetando os restantes componentes. Apesar disso, como os esforços obtidos para estes dois sistemas (mesa de construção e varredor) são reduzidos, a variação não iria ser crítica.

De um modo geral, um refinamento dos componentes era apenas benéfico nesta análise, porque permitia obter valores com maior precisão, verificando maiores gradientes nos esforços sofridos. Face às dificuldades e limitações encontradas, todos os elementos críticos foram verificados e não existe nenhum esforço crítico que possa pôr em causa a funcionalidade da máquina, não sendo necessário efetuar alterações.

## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalhos futuros

### 6.1 Conclusões

Estando o projeto concluído e validado, apenas resta analisar as vantagens da sua aplicação. Foi realizada uma síntese de todas as versões da máquina DMLS usada, desde o modelo inicial produzido pelo departamento, à otimização deste, até ao modelo final proposto (Tabela 6.1). A comparação a nível de produtividade é relativa ao tempo de movimento do varredor, dado este ser o mais relevante. É considerado o tempo necessário para a distribuição das 1600 camadas necessárias para sinterizar um componente com uma altura de 80 mm e camadas de 50  $\mu m$ . Não foram considerados os efeitos da aceleração no tempo total, dado que não foi possível obter os seus valores da máquina inicial.

Tabela 6.1: Comparação entre as diversas máquinas do tempo no varredor.

	Versão inicial	Otimizada	Nova versão
Volume de produção (mm <sup>3</sup> )	260 x 267 x 160	∅ 50 x 50	∅ 72 x 80
Curso para duas camadas (mm)	3080	1290	360
Velocidade máxima (rpm)	1500	1500	1500
Passo (mm)	5	5	4
Tempo para duas camadas (s)	24.64	10.32	3.6
Tempo total (h:min:seg)	05:28:32	02:17:36	00:48:00
Fração de diferença	1	2.39	6.84

Apesar de este sistema ter sido projetado para um volume de fabrico mais pequeno do que a máquina existente no departamento, não foi esta diferença de volume que fez a enorme diferença entre os tempos de fabrico. Este sistema consegue facilmente ser expandido para a produção de

um maior volume de fabrico, mantendo os tempos do varredor reduzidos, facilmente justificado por:

- Distribuição do pó por cima, contribuindo logo para metade do curso do varredor, por não necessitar da plataforma do pó.
- Sistema *one way recoating*, logo o varredor não precisa de fazer um recuo sem utilidade para o fabrico, ou seja, metade do curso total.
- O varredor apenas tem de se deslocar uma vez ao depósito de restos a cada duas camadas distribuídas, logo menos uma vez menos a distância da área de trabalho ao depósito.

Por isso, mesmo sem a variação do volume de fabrico, era facilmente atingido uma redução de tempo total entre 4 e 5 vezes. Tal pode ser verificado dado a diferença entre esta versão e a versão otimizada do sistema anterior. Pelo facto de o volume de fabrico ser menor, foi possível atingir valores de 6.8 vezes, correspondendo a uma diferença de quase cinco horas em termo não útil à sintetização.

São previstos certos melhoramentos no tempo de sinterização, dado que agora foram implementados sistemas de controlo das condições da câmara e outros que visam melhorar essas condições, principalmente o fluxo do gás inerte e remoção de poluentes. Estas modificações irão permitir uma maior velocidade de varrimento, e conseqüentemente, de sinterização. No entanto, apenas é possível quantificar esta diferença com ensaios práticos.

Também foi realizado um orçamento para a versão da máquina proposta, descrito na tabela 6.2.

Tabela 6.2: Custo do sistema proposto.

Produto	Quantidade	Custo unitário (€)	Custo total (€)
Material (kg)	185	2.5	660.7
Maquinagem (horas)	160	30	4800.0
Equipamento	-	-	7326.6
Acessórios	-	-	100.0
Somatório (€)			12887.3

Foram contabilizados a quantidade de material necessária para a maquinação, assim como o tempo esperado para a realizar, o custo da compra dos equipamentos e por fim, outros componentes, tais como parafusos, anilhas, chavetas, componentes pneumáticos, entre outros. Mais detalhes relativos ao orçamento, assim como o projeto completo da máquina proposta estão expostos no anexo A.2.

Esta versão já apresenta um orçamento muito superior ao apresentado para a versão otimizada no capítulo 2.4, resultado de todos os desenvolvimentos, inovações e aprimorações realizadas face à versão já existente no DEM. É possível verificar que a maioria dos custos estão associados à maquinação dos componentes e do equipamento necessário, sendo que a maioria deste é exclusivamente para a câmara de infravermelhos (Tabela A.2). Dado que o equipamento mais dispendioso, o laser, foi aproveitado da máquina anterior, esta versão acaba por ser um reduzido investimento face ao já realizado. É por isso justificada a implementação deste sistema só tendo em conta os tempos, para além de mencionar as vantagens todas referidas na secção 3, em relação à qualidade de todo o fabrico.

No entanto, acaba por depender da utilização prevista do equipamento. A implementação da solução proposta é um bom investimento a longo prazo. Se a utilização prevista for muito reduzida, a aplicação da solução apresentada no capítulo 2 é suficiente.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Os objetivos estipulados para este projeto foram atingidos com sucesso, no entanto, são deixadas sugestões para continuar o que foi aqui desenvolvido:

- Distribuição do pó. Devem ser realizados ensaios práticos ou simular usando software de partículas, de modo a contabilizar o pó e a qualidade da sua distribuição usando este sistema. Foi considerada a utilização do software Rocky, mas tal análise não era viável com o poder computacional existente.
- Construção do equipamento. Equipamento a ser construído e posto em funcionamento.



# Bibliografia

- [1] EOS. Additive Manufacturing with Metals, 2020. Disponível na Internet: <https://bit.ly/2S5GAv6> [Acedido a 29 de Setembro de 2020].
- [2] O. Diegel, A. Nordin, D. Motte. A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing. *Springer Series in Advanced Manufacturing*, Springer, 2019.
- [3] L. J. Kumar, P. M. Pandey, D. I. Wimpenny. 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies. Springer, 2019.
- [4] B. Jackson. 3d Printing Industry: Bugatti Prepares 3d Printed Brake Caliper For Series Production, 2019. Disponível na Internet: <https://bit.ly/338ZU0q> [Acedido a 29 de Setembro de 2020].
- [5] D. Sher. 3d Printing Media Network: SpaceX's Crew Dragon spacecraft with 3D printed SuperDraco engines is now officially flying, 2019. Disponível na Internet: <https://bit.ly/2EHM0ya> [Acedido a 29 de Setembro de 2020].
- [6] L. Bian, N. Shamsaei, J. M. Usher. Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization and Control of Mechanical Properties. *Advanced and Additive Manufacturing Series*, CRC Press, 2018.
- [7] S. Rahmati. Comprehensive Materials Processing: Advances in Additive Manufacturing and Tooling, **10**:303-344, 2014.
- [8] L. Yang, K. Hsu, B. Baughman, D. Godfrey; F. Medina; M. Menon; S. Wiener. Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. *Springer Series in Advanced Manufacturing*, Springer, 2017.
- [9] D. Bhate. Reactive and Non-Reactive Metal Alloys in Laser-based Powder Bed Fusion, 2016.
- [10] D. Gu, Y. Shen. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods, 2009.
- [11] EOS. AEOS M100: Additive manufacturing system for the fast and efficient production of delicate metal parts, 2020. Disponível na Internet: <https://bit.ly/3491cup> [Acedido a 29 de Setembro de 2020].
- [12] Polymanema. Plástico de Engenharia: Alta Performance, 2020. Disponível na Internet: <https://bit.ly/2G13Kec> [Acedido a 29 de Setembro de 2020].
- [13] A. Bandyopadhyay, S. Bose. Additive Manufacturing, CRC Press, 2016.

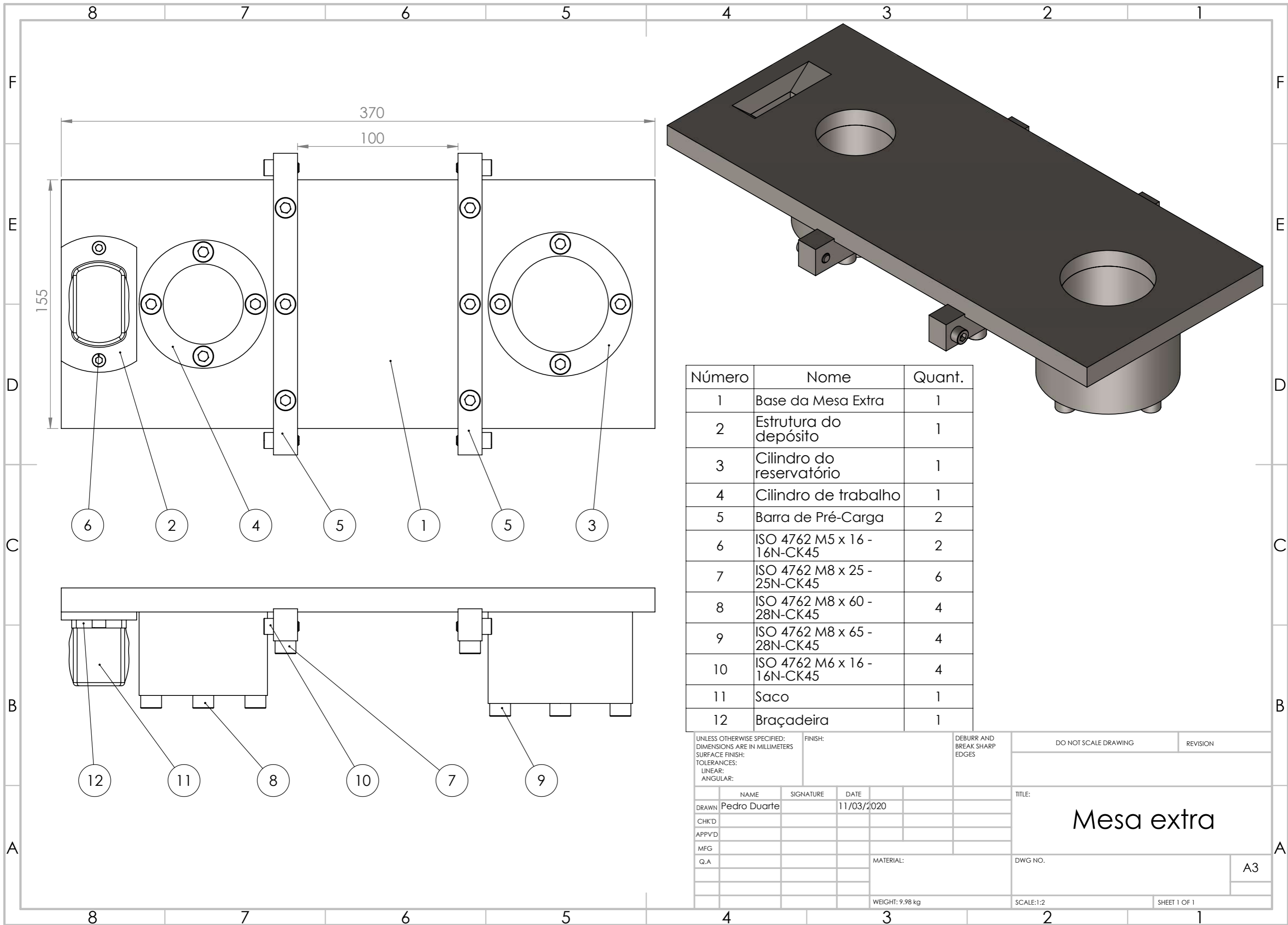


- 
- [14] M. Brandt. Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications. *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials: Number 88*, Woodhead Publishing, 2018.
- [15] J. Lawrence, J. Pou, D. K. Y. Low, E. Toyserkani. Advances in Laser Materials Processing Technology: Technology, Research and Application. *Springer Series in Advanced Manufacturing*, Woodhead Publishing, 2010.
- [16] Igus. Polímeros de elevada performance para movimento, 2020. Disponível na Internet: <https://bit.ly/30hcVn3> [Acedido a 29 de Setembro de 2020].
- [17] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. Additive Manufacturing Technologies 3D: Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials: Number 88*, Springer, 2015.
- [18] L. Papadakis, D. Chantzis, K. Salonitis. On the energy efficiency of pre-heating methods in SLM/SLS processes, 2018.
- [19] J. I. Arrizubieta, O. Ukar, M. Ostolaza, A. Mugica. Study of the Environmental Implications of Using Metal Powder in Additive Manufacturing and Its Handling, 2020.
- [20] M. Saunders. Oxygen algebra: does yours add up?, 2016. Disponível na Internet: <https://bit.ly/30rfK1H> [Acedido a 29 de Setembro de 2020].
- [21] Edmund Optics. The Correct Material for Infrared (IR) Applications. Disponível na Internet: <https://bit.ly/3ieiRDG> [Acedido a 29 de Setembro de 2020].
- [22] P. A. Hooper. Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion, 2018.
- [23] A. Completo, F. Q. Melo. Introdução ao Projeto Mecânico. *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials: Number 88*, Engbook, 2017.
- [24] Ansys. Mechanical User's Guide, 2020.

# **Apêndice A**

## **Anexos**

### **A.1 Solução Otimizada**



Número	Nome	Quant.
1	Base da Mesa Extra	1
2	Estrutura do depósito	1
3	Cilindro do reservatório	1
4	Cilindro de trabalho	1
5	Barra de Pré-Carga	2
6	ISO 4762 M5 x 16 - 16N-CK45	2
7	ISO 4762 M8 x 25 - 25N-CK45	6
8	ISO 4762 M8 x 60 - 28N-CK45	4
9	ISO 4762 M8 x 65 - 28N-CK45	4
10	ISO 4762 M6 x 16 - 16N-CK45	4
11	Saco	1
12	Braçadeira	1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND BREAK SHARP EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

TITLE: **Mesa extra**

DRAWN Pedro Duarte DATE 11/03/2020

CHK'D

APPV'D

MFG

Q.A

MATERIAL:

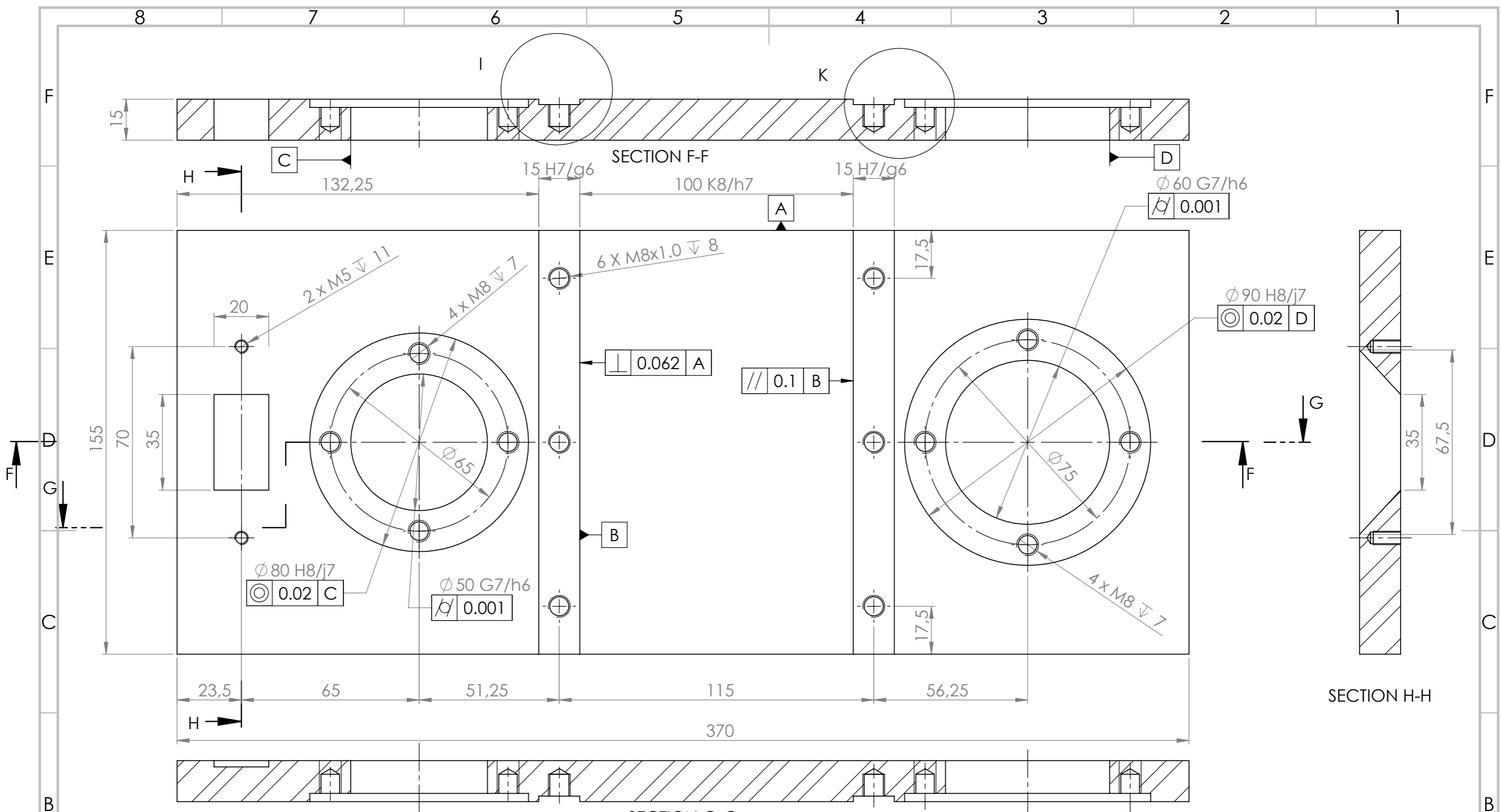
WEIGHT: 9.98 kg

SCALE: 1:2

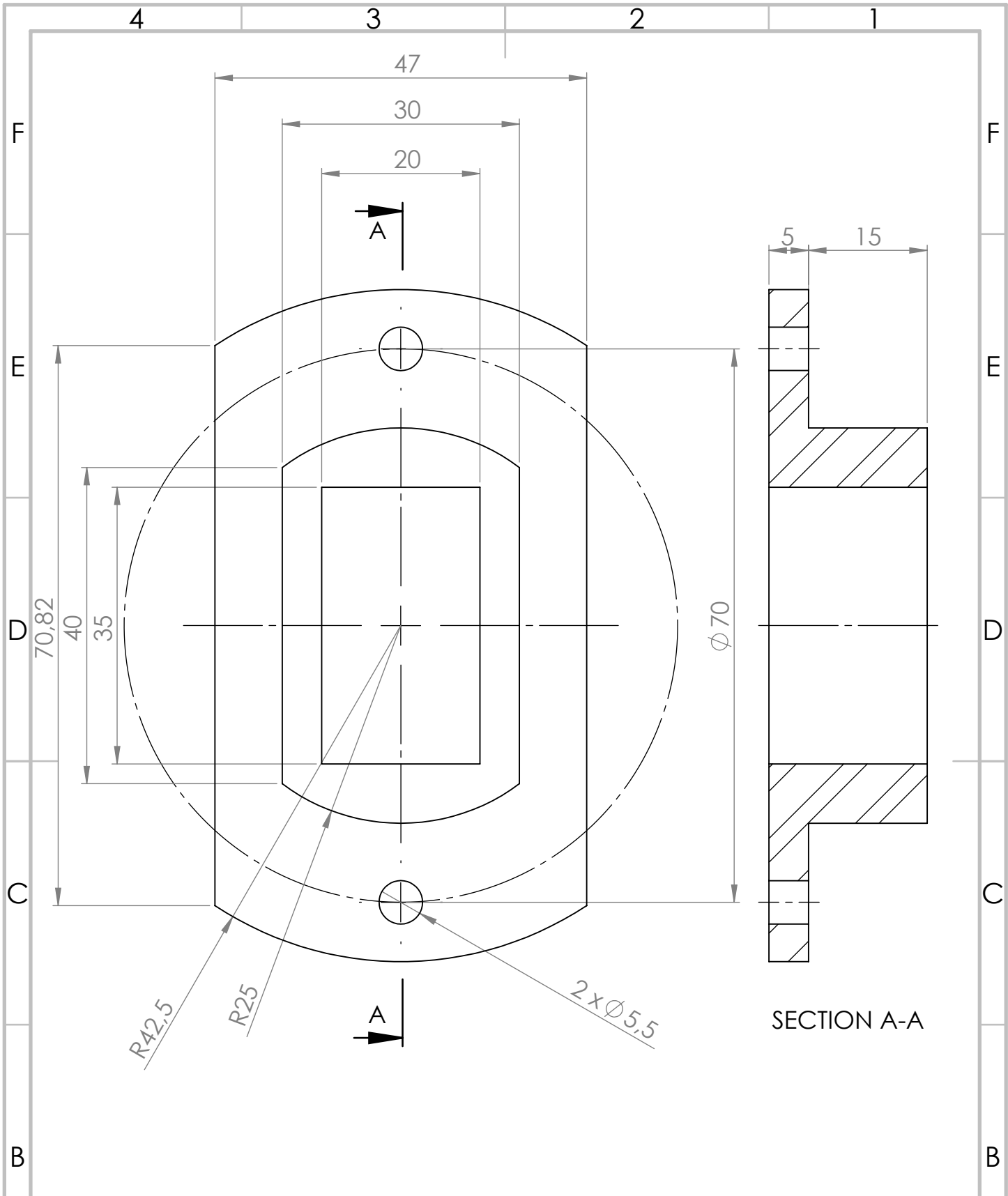
DWG NO.

A3

SHEET 1 OF 1



		FINISH: <b>ISO 8015</b> <b>ISO 2768 - mk</b>	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN Pedro Duarte CHK'D APPV'D MFG Q.A	NAME Pedro Duarte	SIGNATURE	DATE 11/03/2020	TITLE: <b>Base da mesa extra</b>	
MATERIAL: <b>Aço EN C45E</b>			DWG NO. <b>1</b>	A3	
WEIGHT: 5.8 kg			SCALE: 3:4	SHEET 1 OF 1	



SECTION A-A



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	Pedro Duarte		11/03/2020
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:  
**Estrutura do depósito**

MATERIAL:  
**Aço EN C45E**

DWG NO.  
**2**

A4

WEIGHT: 0.2 kg

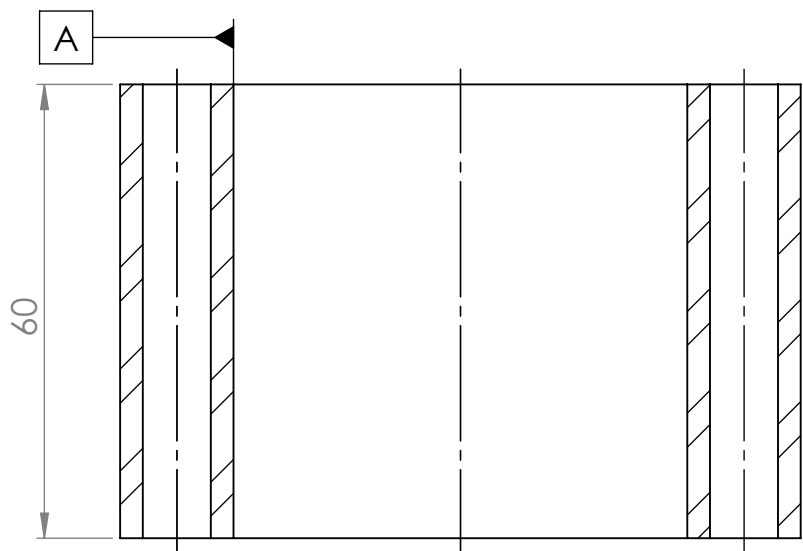
SCALE:3:2

SHEET 1 OF 1

4 3 2 1

F

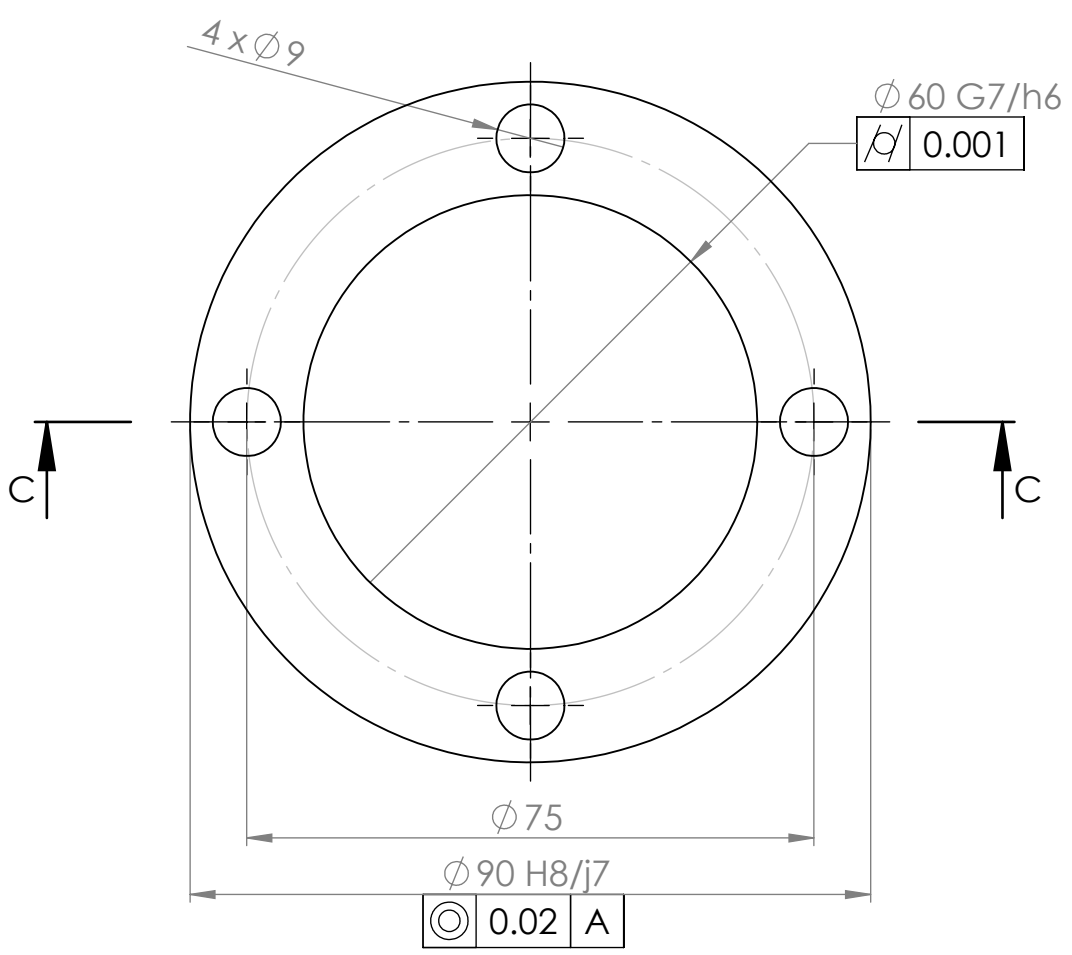
F



SECTION C-C

D

D

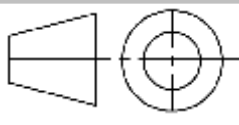


C

C

B

B



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

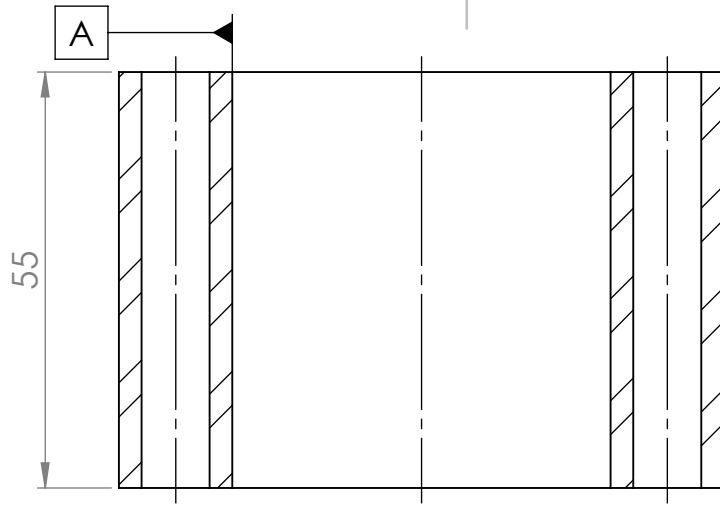
A

A

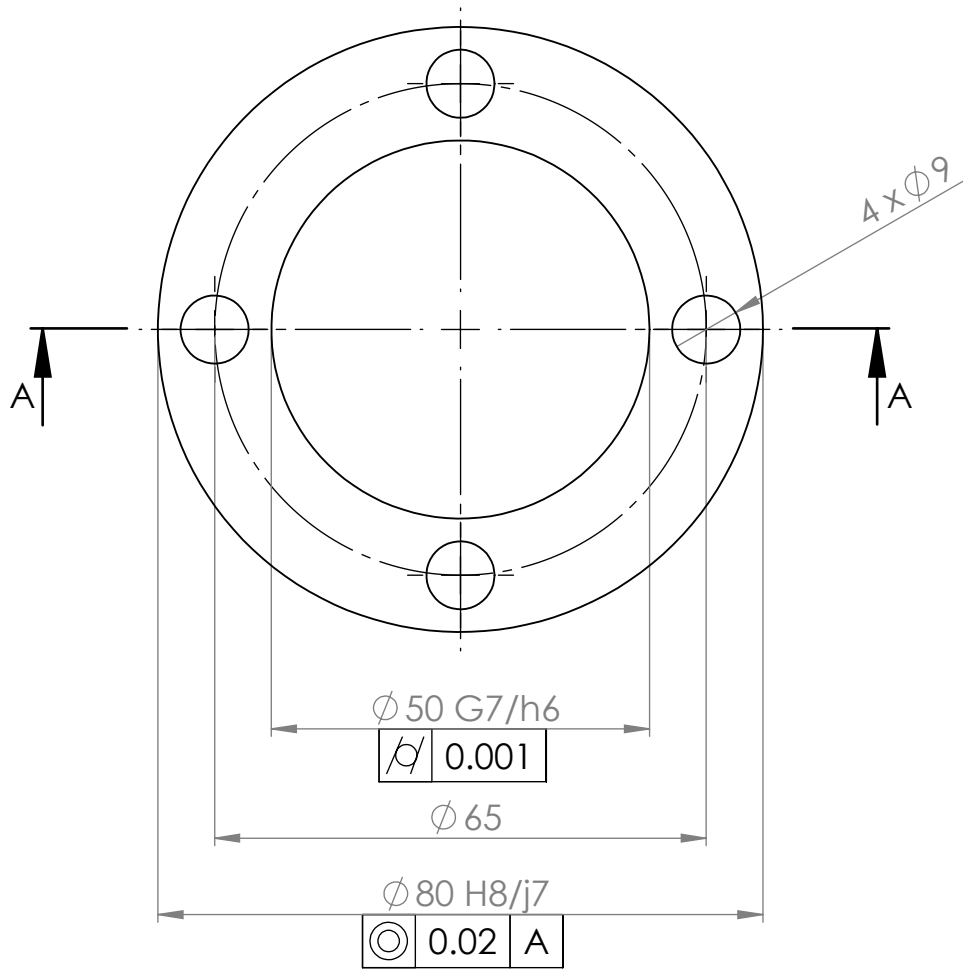
NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN Pedro Duarte		11/03/2020
CHK'D		
APPV'D		
MFG		
Q.A		

TITLE:	<b>Cilindro do reservatório</b>	
MATERIAL:	<b>Aço EN C45E</b>	DWG NO. <b>3</b>
WEIGHT: 1.5 kg	SCALE: 1:1	SHEET 1 OF 1

4 3 2 1



SECTION A-A



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

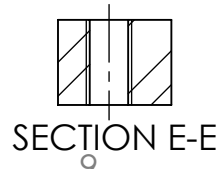
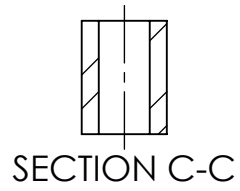
NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN Pedro Duarte		11/03/2020
CHK'D		
APPV'D		
MFG		
Q.A		

TITLE:	<b>Cilindro de trabalho</b>	
DWG NO.	<b>4</b>	A4
WEIGHT: 1.2 kg	SCALE: 1:1	SHEET 1 OF 1

4 3 2 1

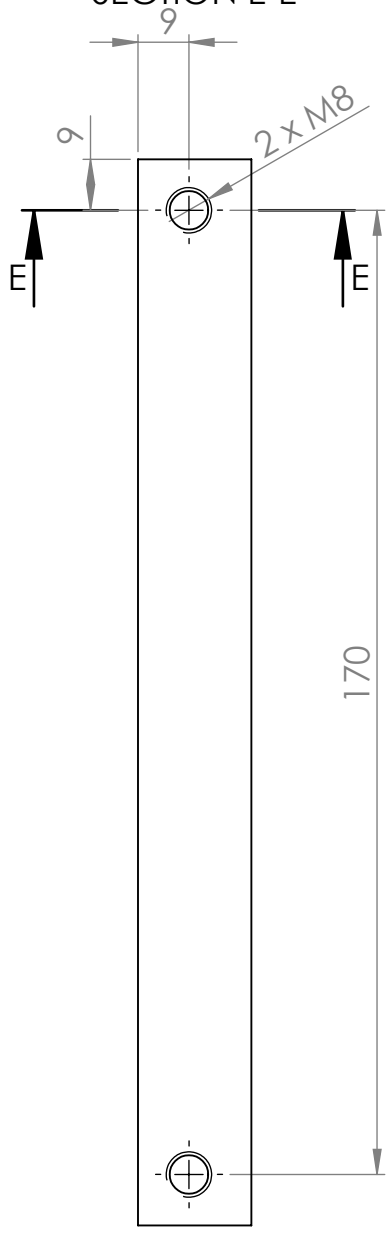
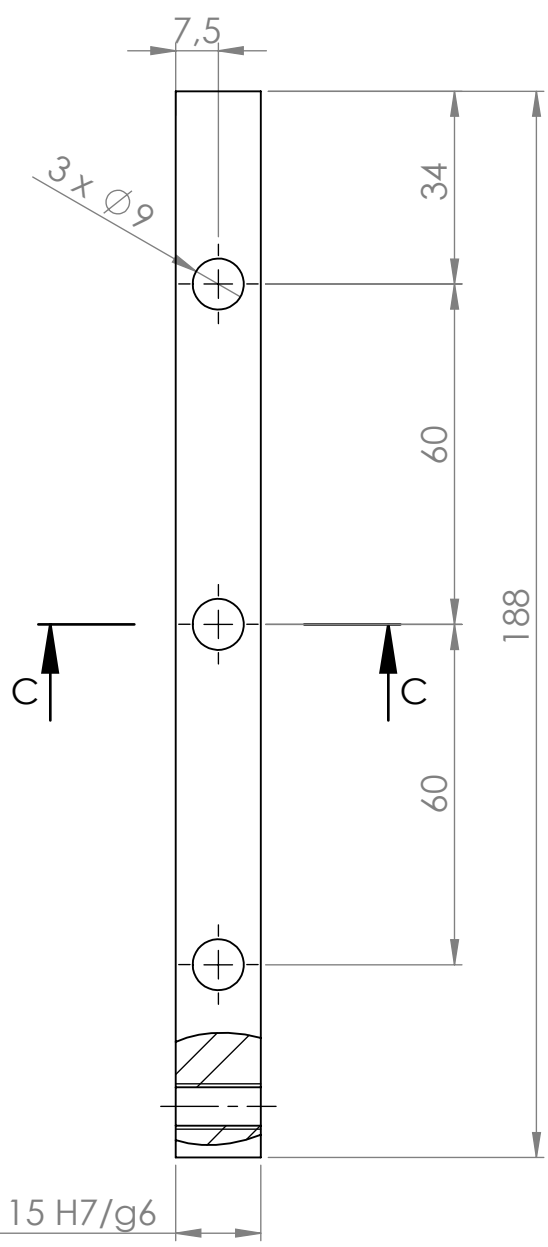
F

F



E

E



D

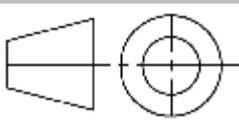
D

C

C

B

B



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

Quantidade : 2

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN Pedro Duarte		11/03/2020
CHK'D		
APPV'D		
MFG		
Q.A		

TITLE:  
**Barra de pre-carga**

MATERIAL:  
**Aço EN C45E**

DWG NO.  
**5**

A4

WEIGHT: 0.4 kg

SCALE:3:4

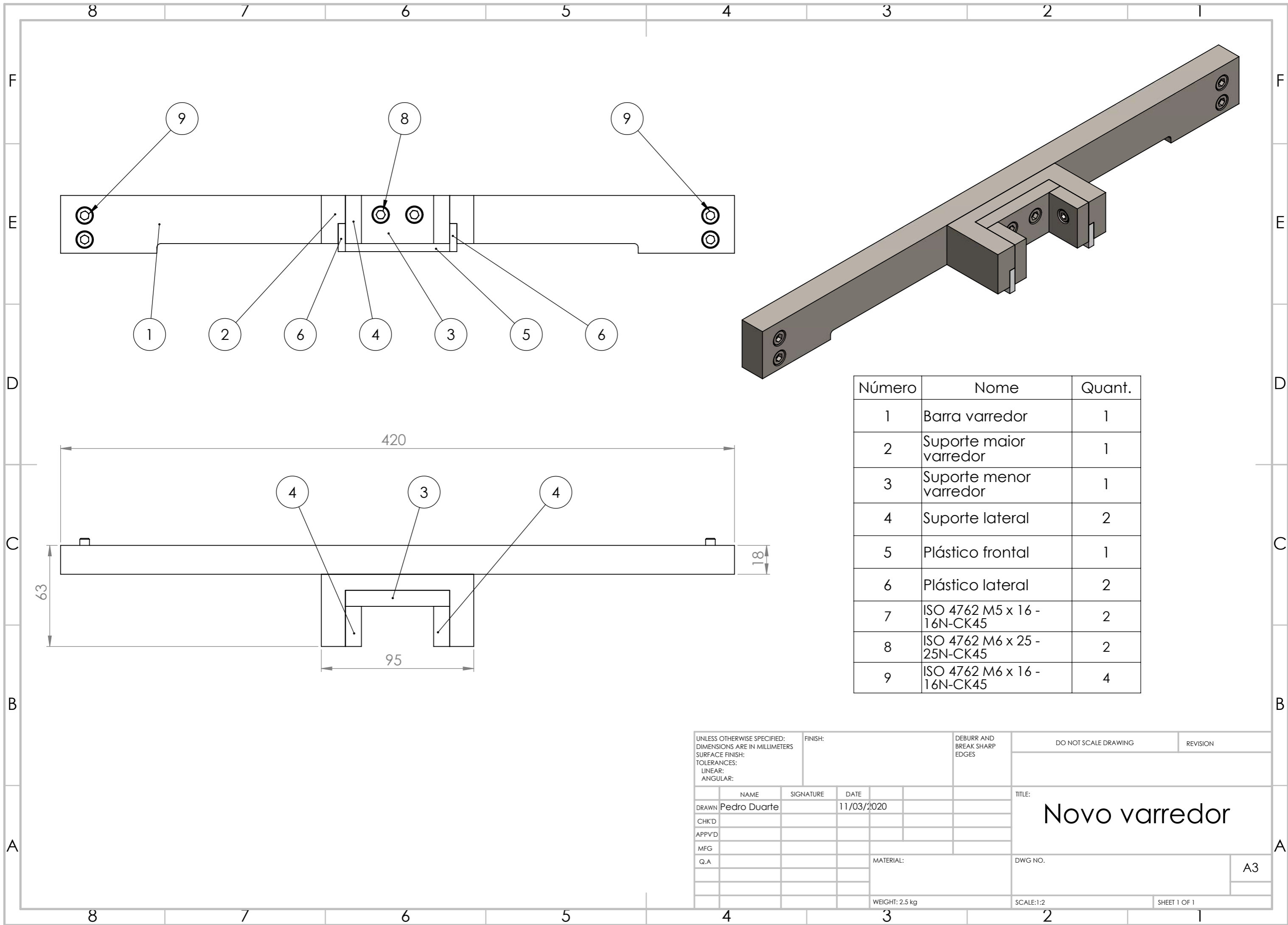
SHEET 1 OF 1

4 3 2 1

A

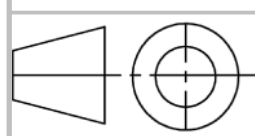
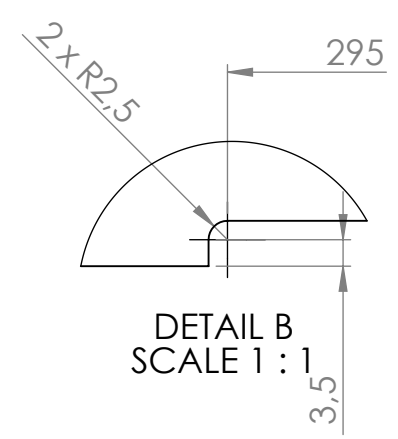
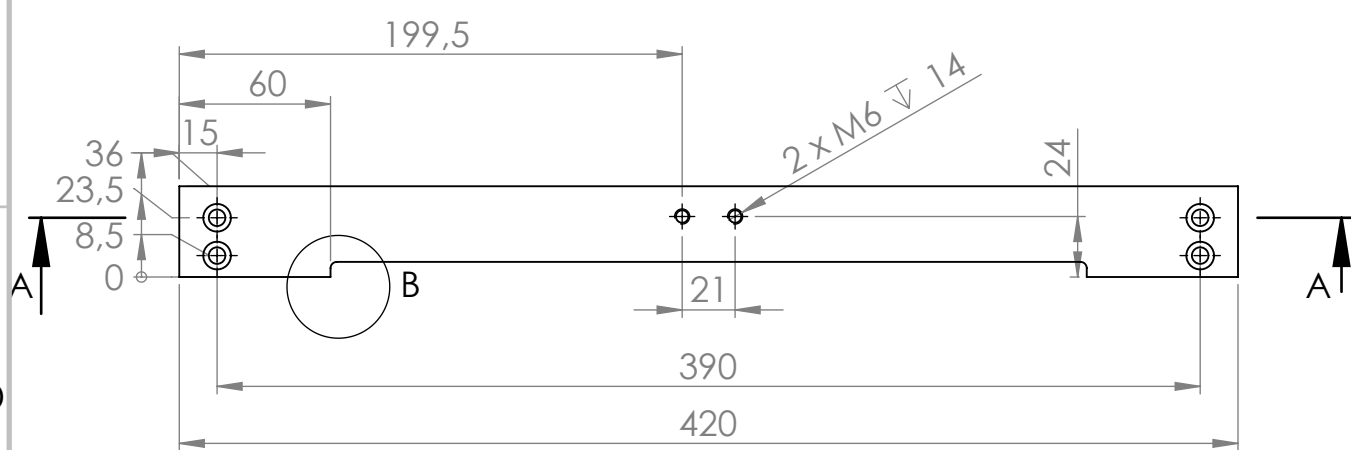
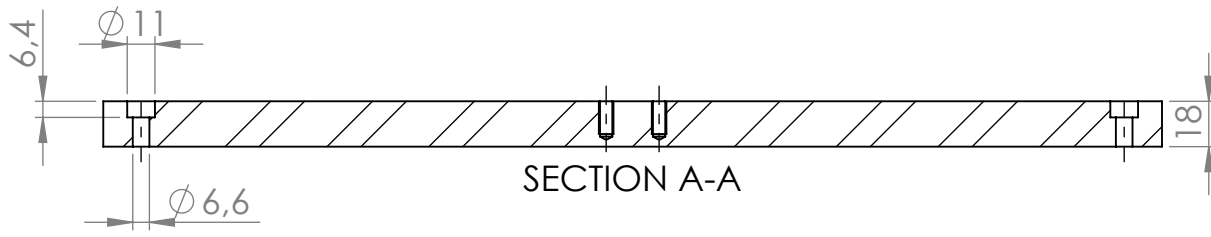
A





Número	Nome	Quant.
1	Barra varredor	1
2	Suporte maior varredor	1
3	Suporte menor varredor	1
4	Suporte lateral	2
5	Plástico frontal	1
6	Plástico lateral	2
7	ISO 4762 M5 x 16 - 16N-CK45	2
8	ISO 4762 M6 x 25 - 25N-CK45	2
9	ISO 4762 M6 x 16 - 16N-CK45	4

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
DRAWN Pedro Duarte			SIGNATURE		DATE 11/03/2020		TITLE: <b>Novo varredor</b>				
CHK'D			MFG		Q.A		MATERIAL:		DWG NO.		
APPV'D			WEIGHT: 2.5 kg		SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1				
A3											



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING      REVISION

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN Pedro Duarte		11/03/2020
CHK'D		
APPV'D		
MFG		
Q.A		

TITLE:  
**Barra varredor**

MATERIAL  
**Aço EN C45E**

WEIGHT: 1.8 kg

DWG NO.  
**1**

SCALE: 1:3

SHEET 1 OF 1

A

A

4

3

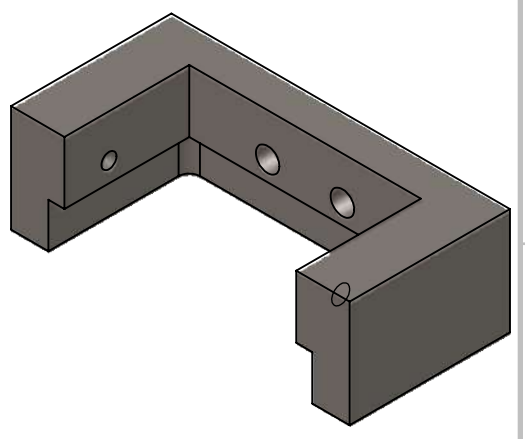
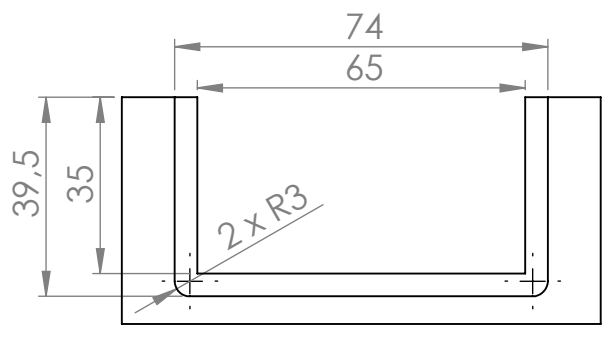
2

1

4 3 2 1

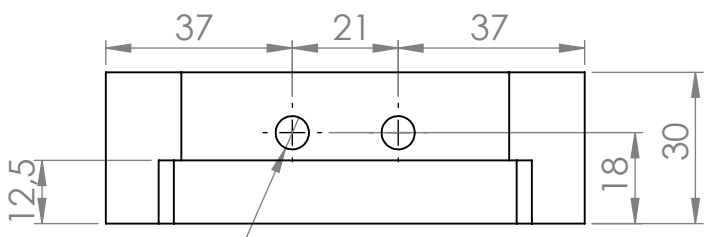
F

F



E

E



D

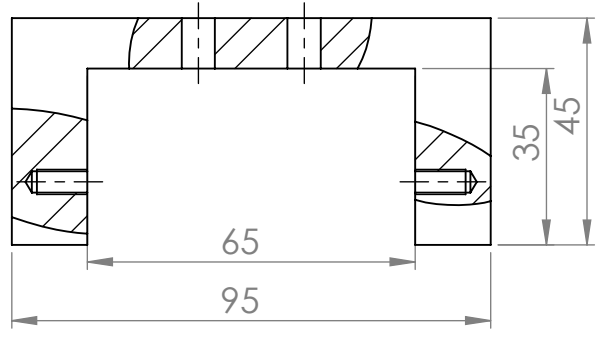
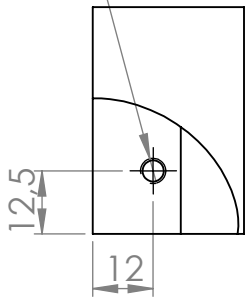
D

2 x M5  $\nabla$  11

2 x  $\varnothing$  6,6

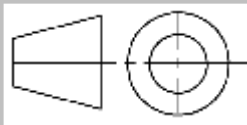
C

C



B

B



FINISH:  
ISO 8015  
ISO 2768 - mk

DEBURR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

A

A

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN Pedro Duarte		11/03/2020
CHK'D		
APPV'D		
MFG		
Q.A		

TITLE:  
**Suporte maior varredor**

MATERIAL:  
**Aço EN C45E**

DWG NO.  
**2**

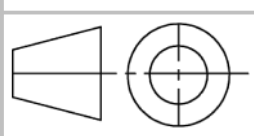
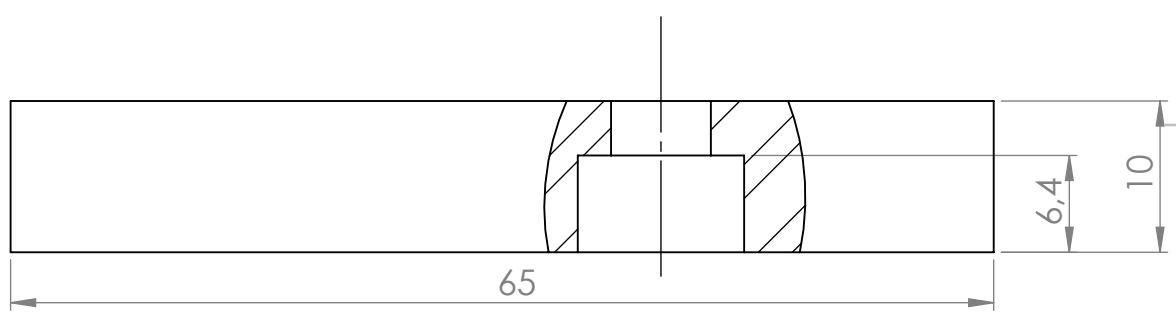
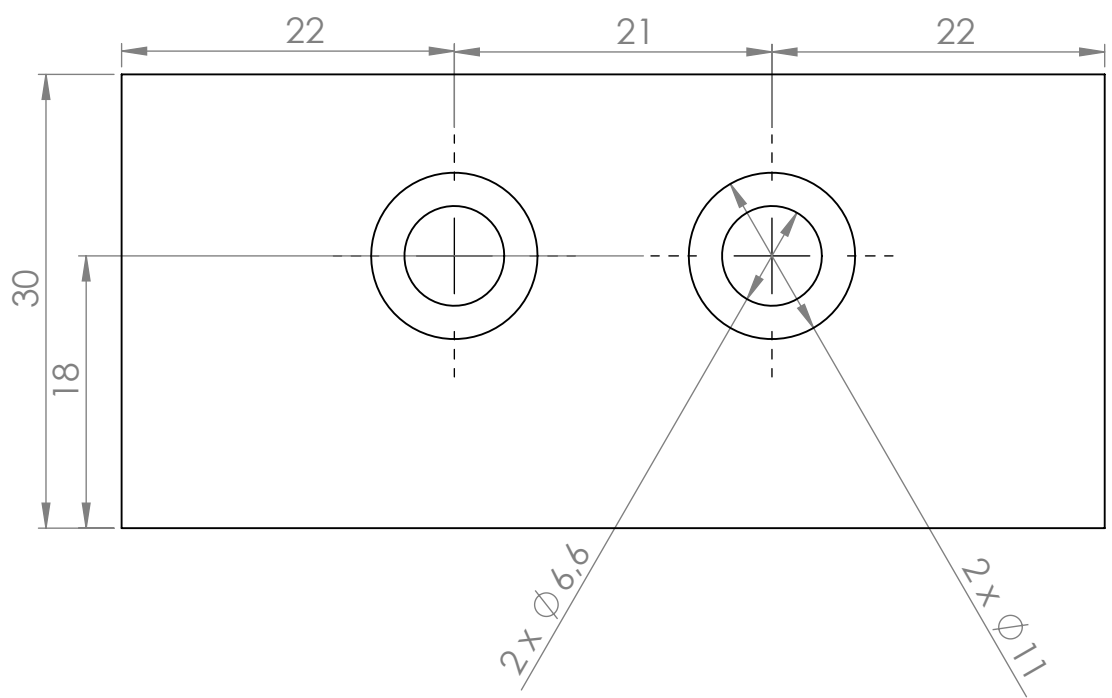
A4

WEIGHT: 0.4 kg

SCALE:2:3

SHEET 1 OF 1

4 3 2 1



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN Pedro Duarte		11/03/2020
CHK'D		
APPV'D		
MFG		
Q.A		

TITLE:  
**Suporte menor varredor**

MATERIAL:  
**Aço EN C45E**

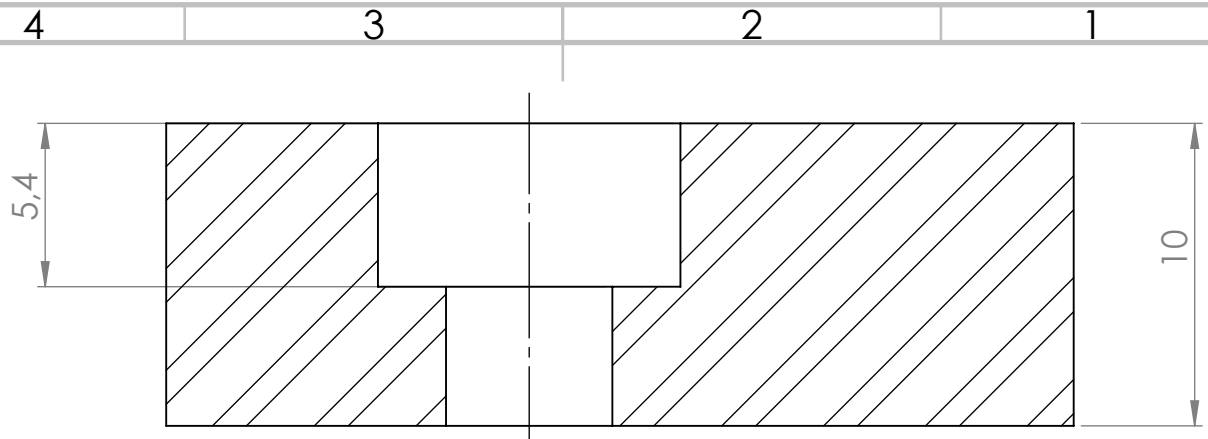
DWG NO. **3**

A4

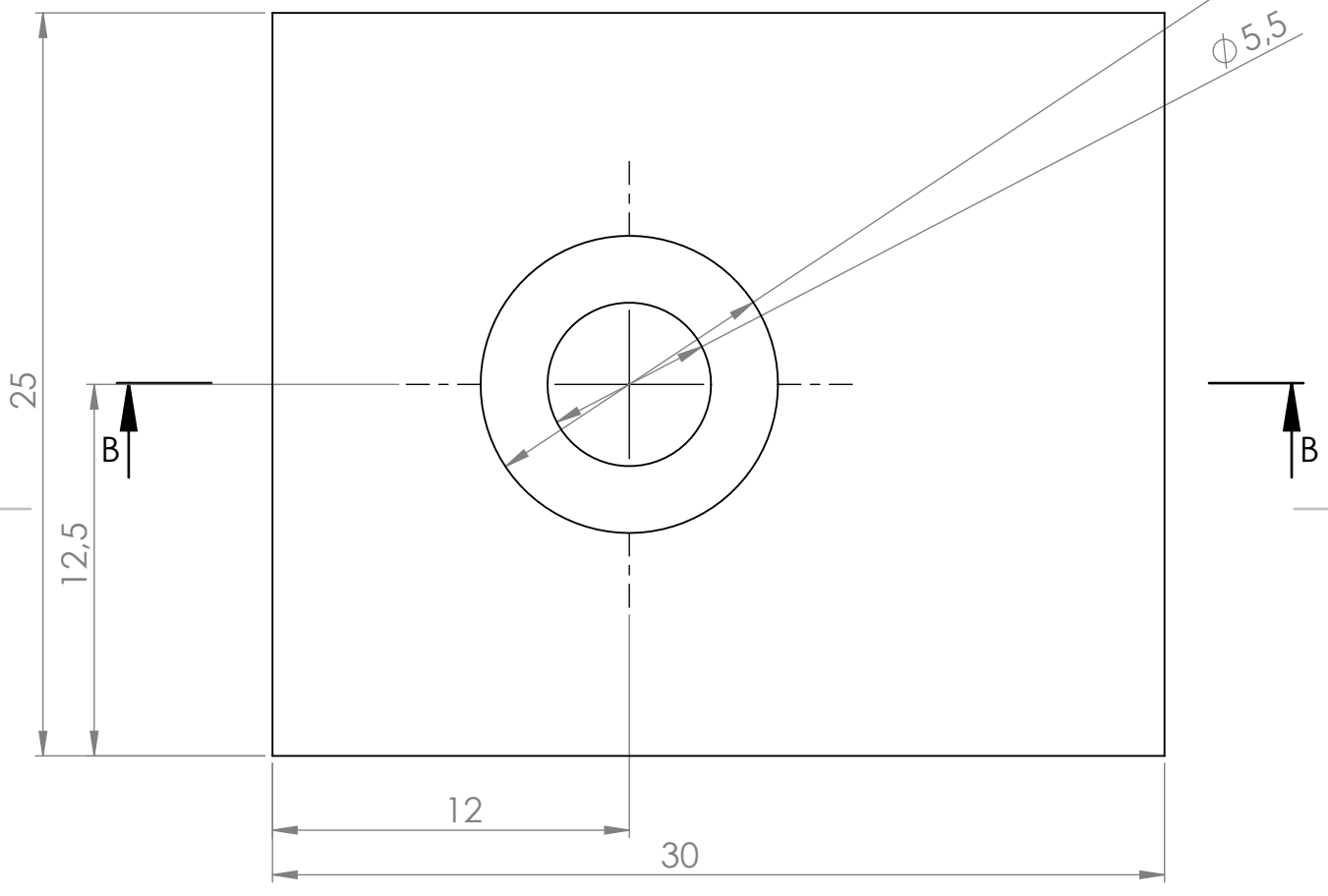
WEIGHT: 0.14 kg

SCALE:2:1

SHEET 1 OF 1



SECTION B-B



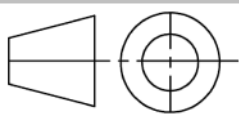
25

12,5

12

30

$\phi 10$   
 $\phi 5,5$



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

Quantidade : 2

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN Pedro Duarte		11/03/2020
CHK'D		
APPV'D		
MFG		
Q.A		

TITLE:	<h1>Suporte lateral</h1>
MATERIAL:	
DWG NO.	<b>4</b>
WEIGHT: 0.05 kg	A4
SCALE:4:1	SHEET 1 OF 1

4

3

2

1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

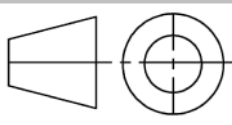
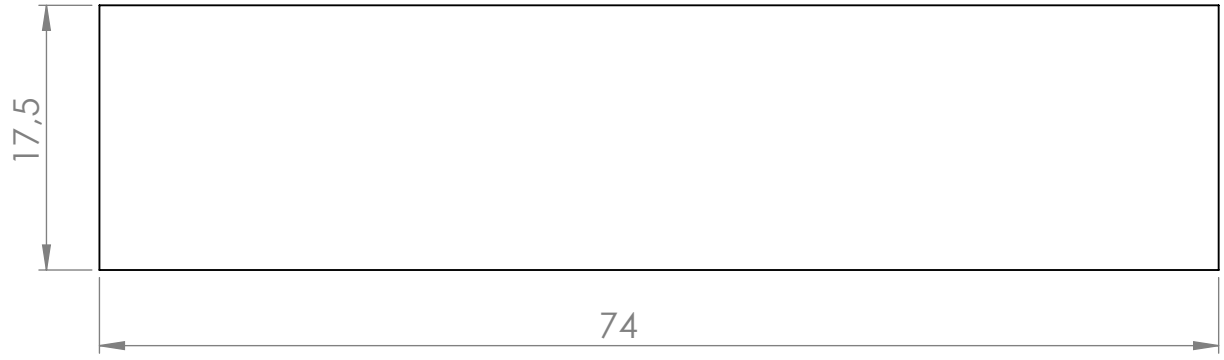
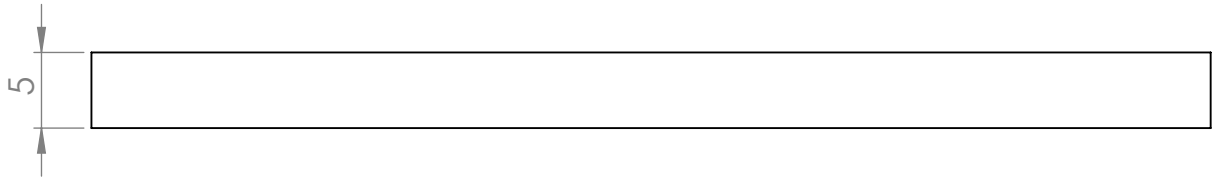
D

C

C

B

B



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

A

A

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	Pedro Duarte		11/03/2020
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:	<b>Plástico frontal</b>
DWG NO.	
MATERIAL:	<b>PTFE</b>
WEIGHT:	0.015 kg
SCALE:	2:1
SHEET	1 OF 1

A4

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

C

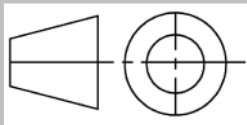
B

B

4,5

17,5

34,5



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

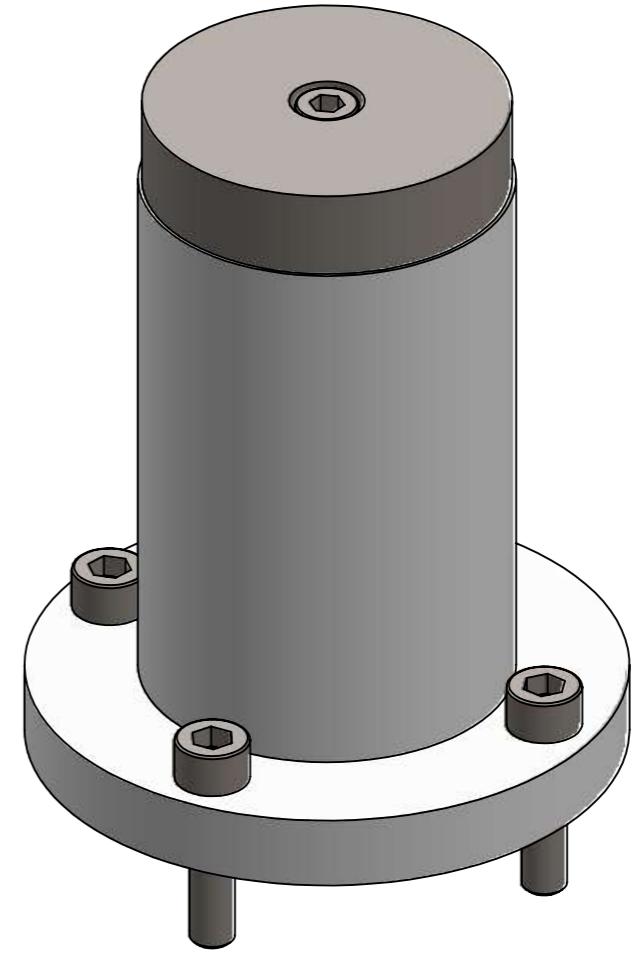
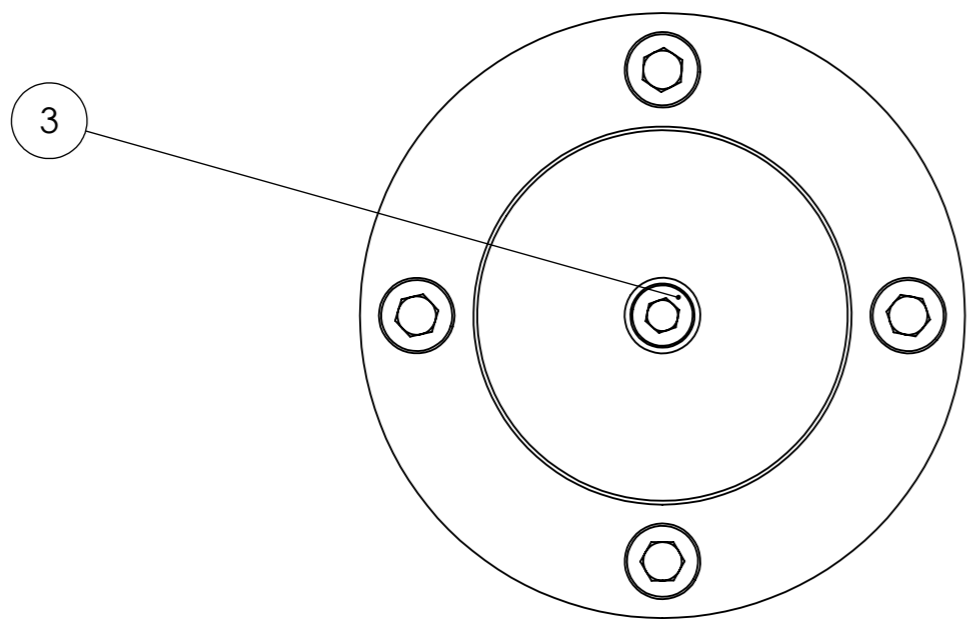
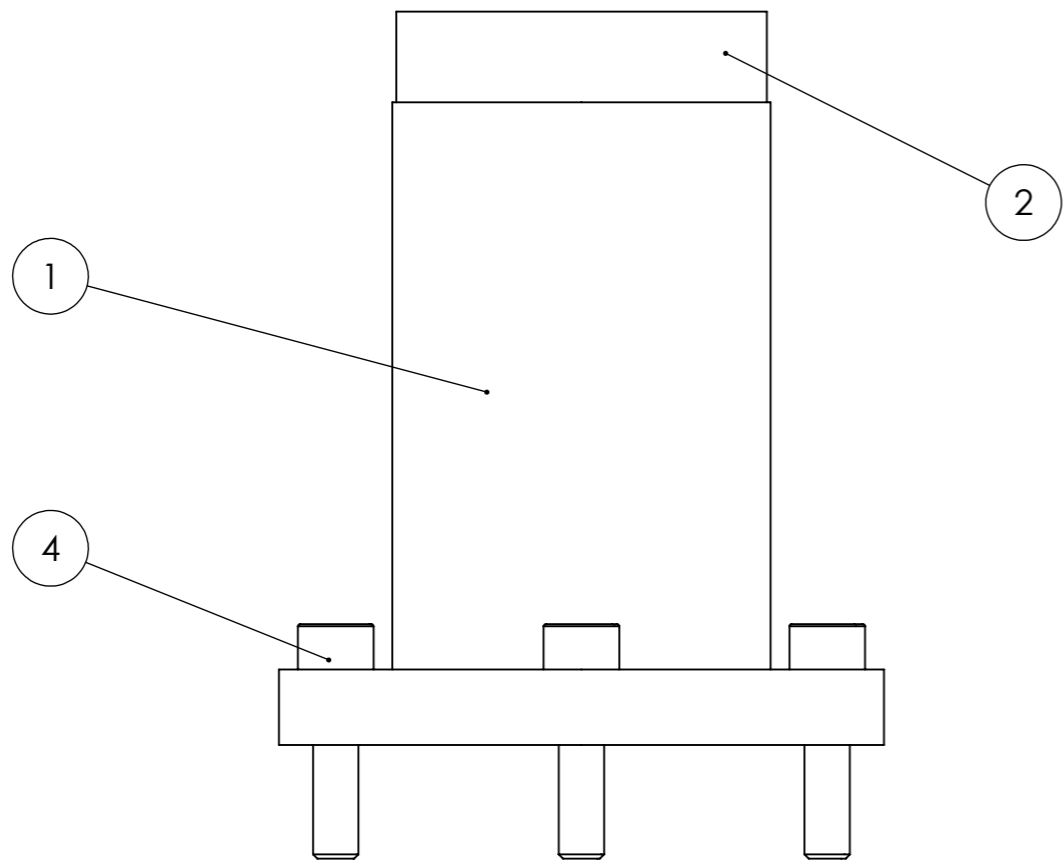
	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Pedro Duarte		11/03/2020		
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				<b>PTFE</b>	
				WEIGHT: 0.006 kg	

TITLE:	<b>Plástico lateral</b>	
DWG NO.	<b>6</b>	A4
SCALE:4:1		SHEET 1 OF 1

4 3 2 1

A

A



Número	Nome	Quant.
1	Base de trabalho	1
2	Mesa de Trabalho	1
3	ISO 4762 M5 x 20 - 20N-CK45	1
4	ISO 4762 M6 x 25 - 25N-CK45	4

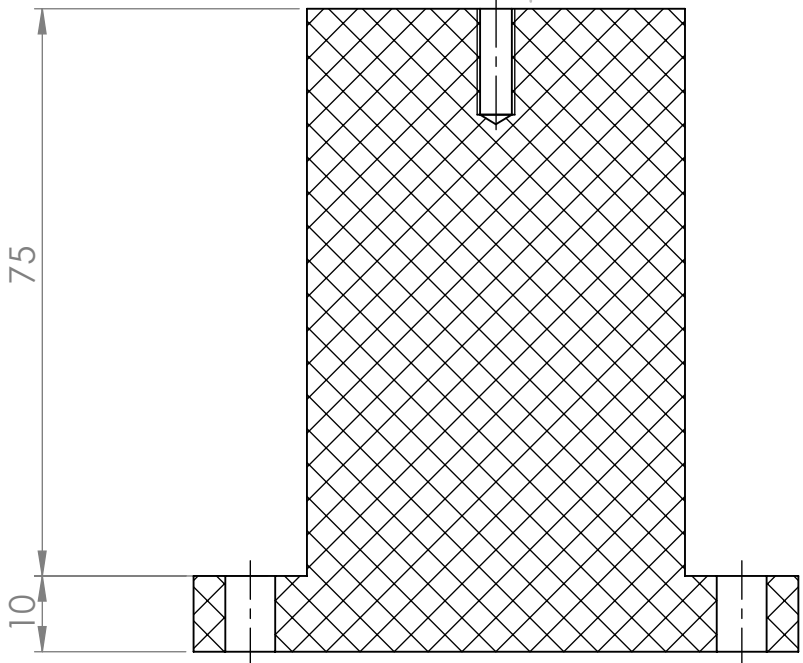
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN Pedro Duarte		SIGNATURE		DATE 11/03/2020		TITLE: <b>Êmbolo de trabalho</b>			
CHK'D						DWG NO.		A3	
APPV'D						SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	
MFG						WEIGHT:			
Q.A									



4 3 2 1

F

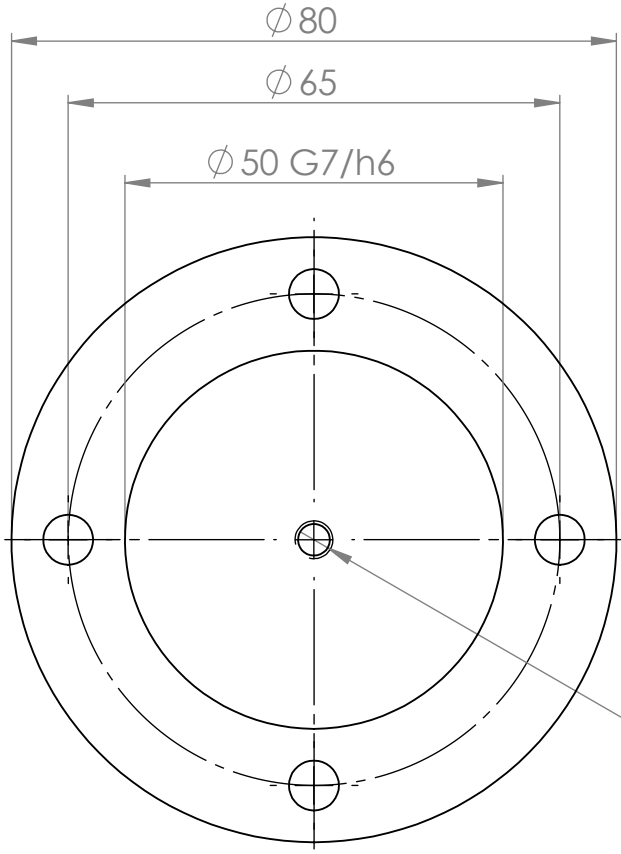
F



SECTION A-A

D

D

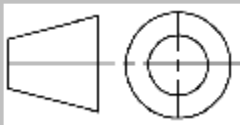


C

C

B

B



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	Pedro Duarte		11/03/2020
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			
MATERIAL:			
PTFE			
WEIGHT: 0.45 kg			

TITLE:		<b>Base de trabalho</b>	
DWG NO.			
1		A4	
		SHEET 1 OF 1	

A

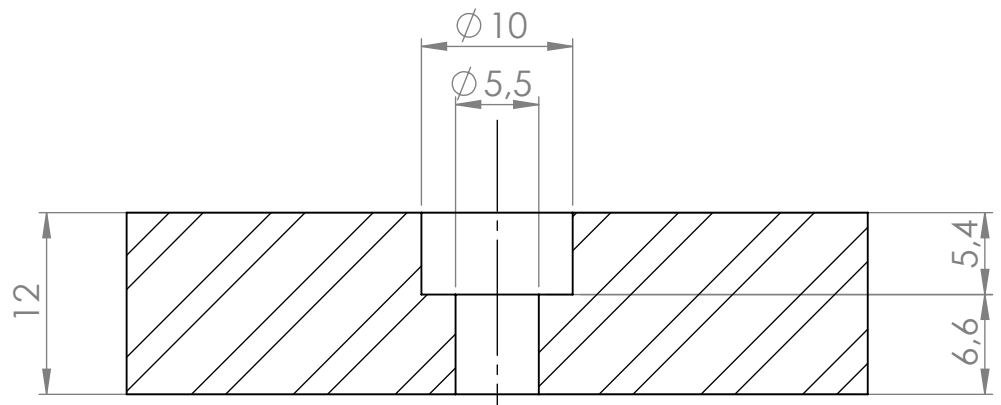
A

4 3 2 1

4 3 2 1

F

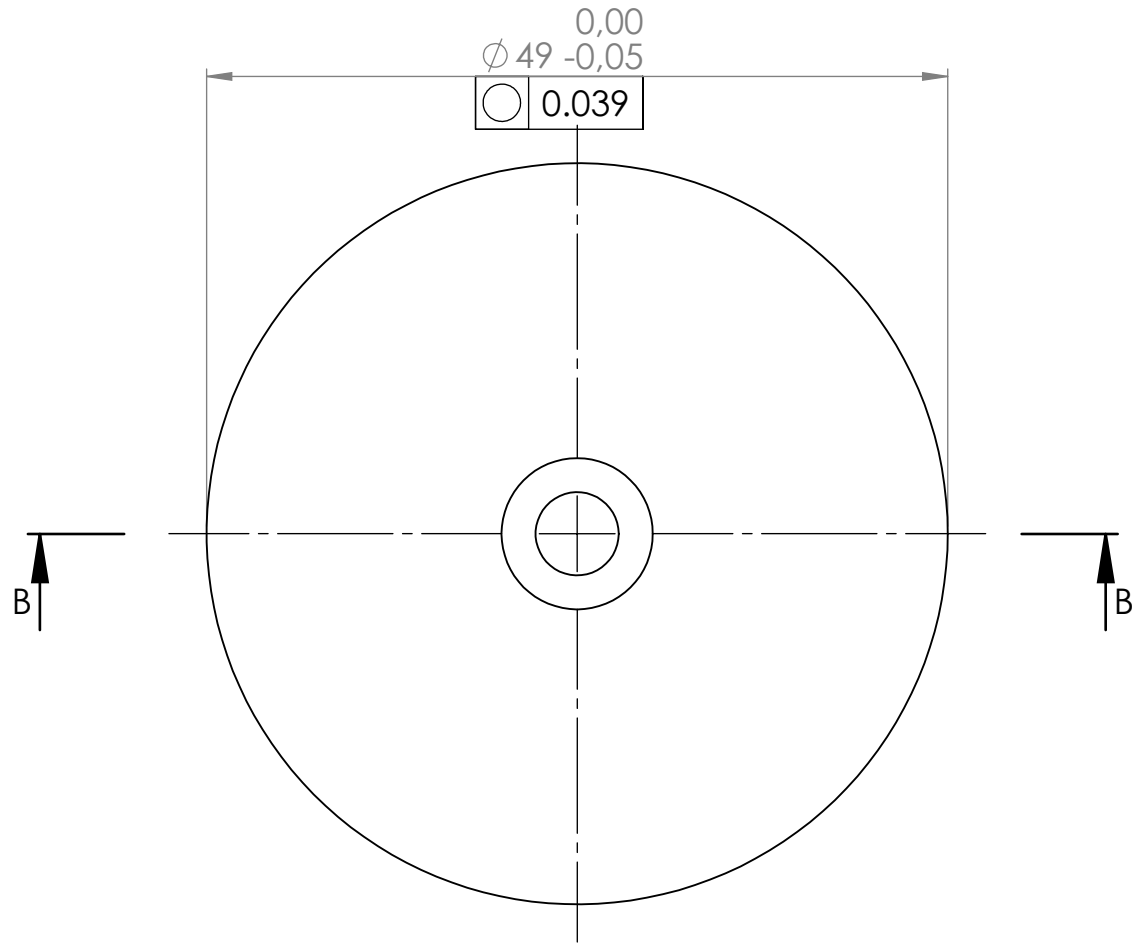
F



SECTION B-B

D

D

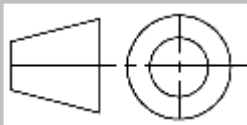


C

C

B

B



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	Pedro Duarte		11/03/2020
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:	<b>Mesa de trabalho</b>		
MATERIAL:	<b>Aço EN C45E</b>	DWG NO.	<b>2</b>
WEIGHT: 0.17 kg	SCALE:2:1	SHEET 1 OF 1	

A

A

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

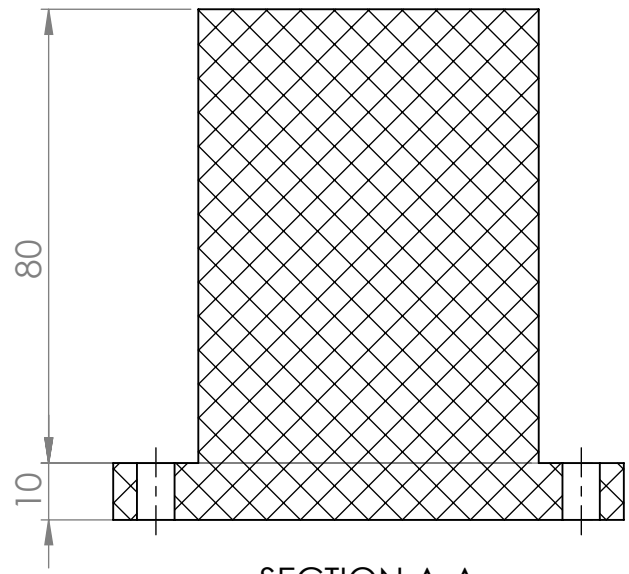
C

B

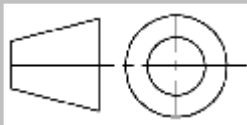
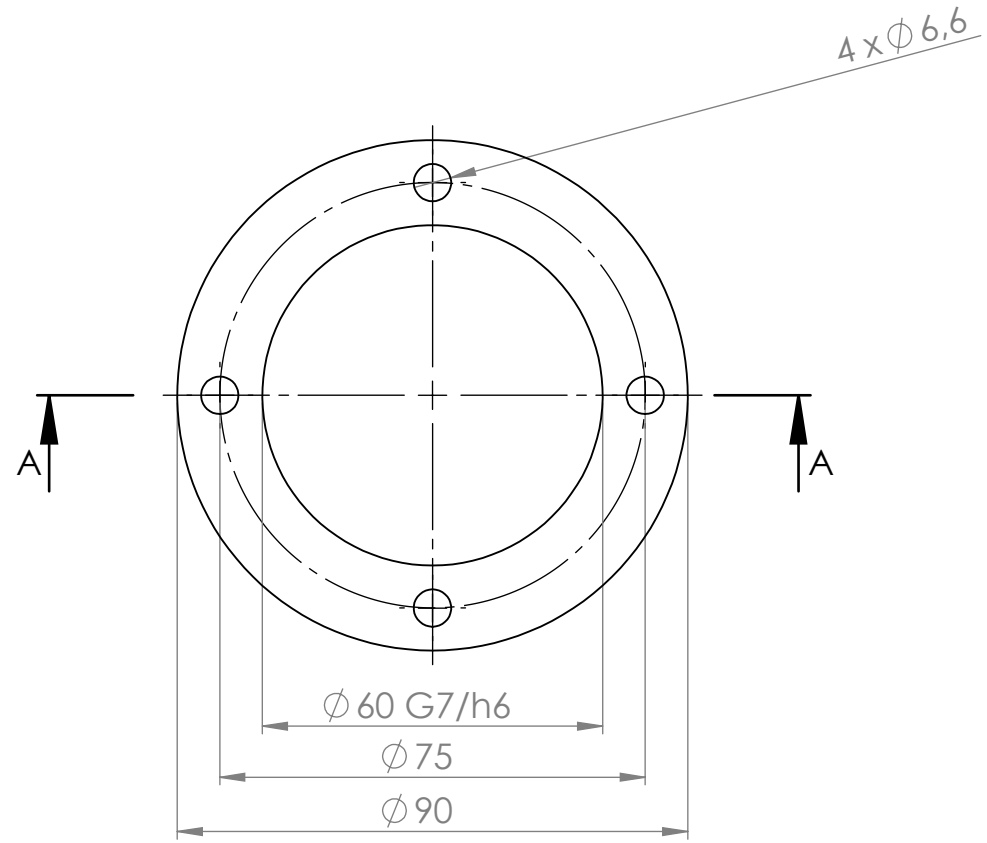
B

A

A



SECTION A-A



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN Pedro Duarte		11/03/2020
CHK'D		
APPV'D		
MFG		
Q.A		

TITLE:  
**Base do reservatório**

MATERIAL:  
**PTFE**

DWG NO.

A4

WEIGHT: 0.67 kg

SCALE:3:4

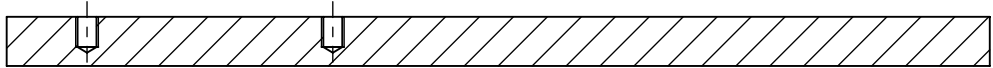
SHEET 1 OF 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F

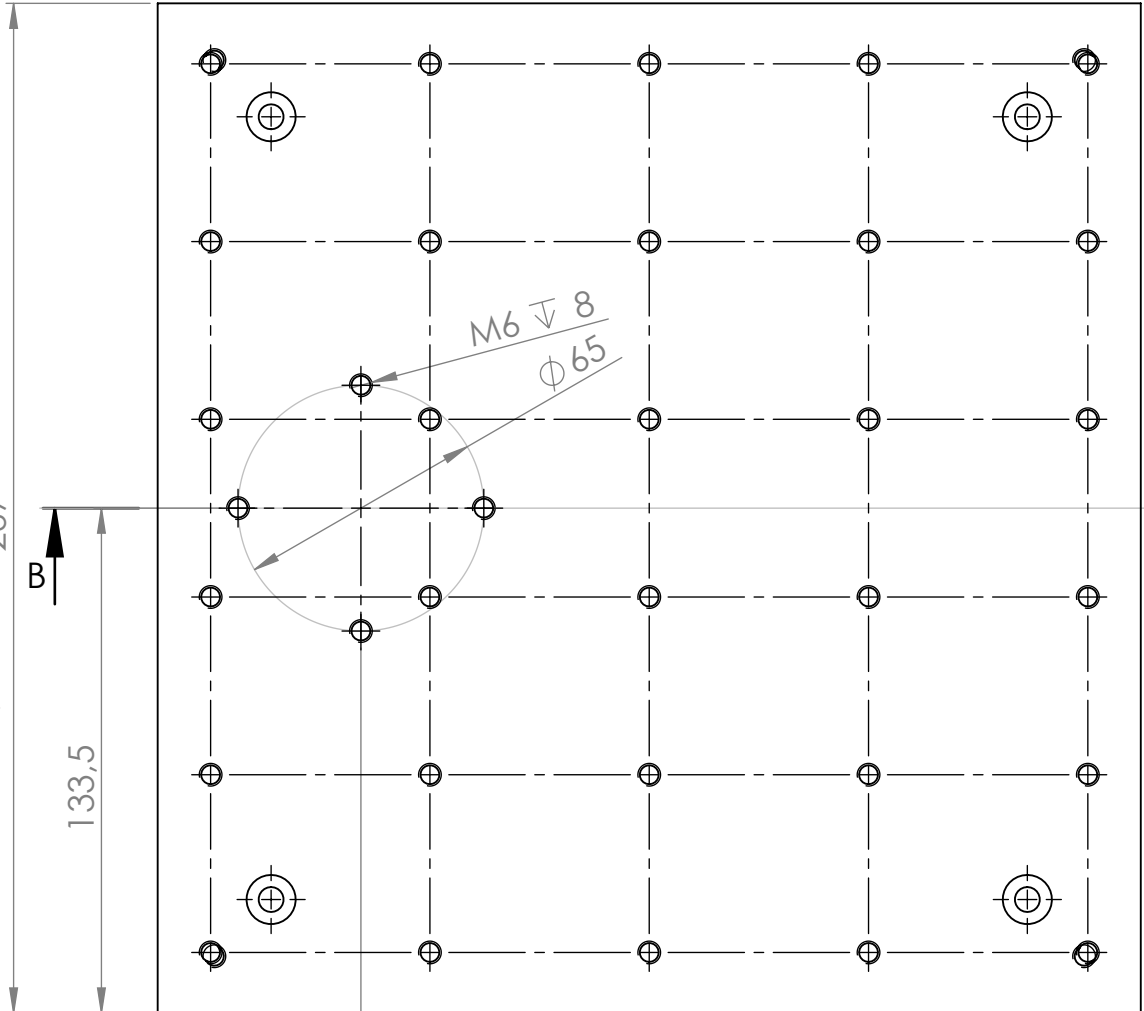
F



SECTION B-B

E

E



D

D

267



133,5

C

C

53,75

260

B

B



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			
MATERIAL:			
<b>Aço EN C45E</b>			
WEIGHT: 0.89 kg			

TITLE:		A4
<b>Base existente area de trabalho</b>		
DWG NO.		
SCALE: 1:2		SHEET 1 OF 1

A

A

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

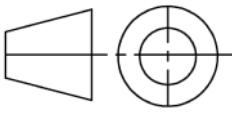
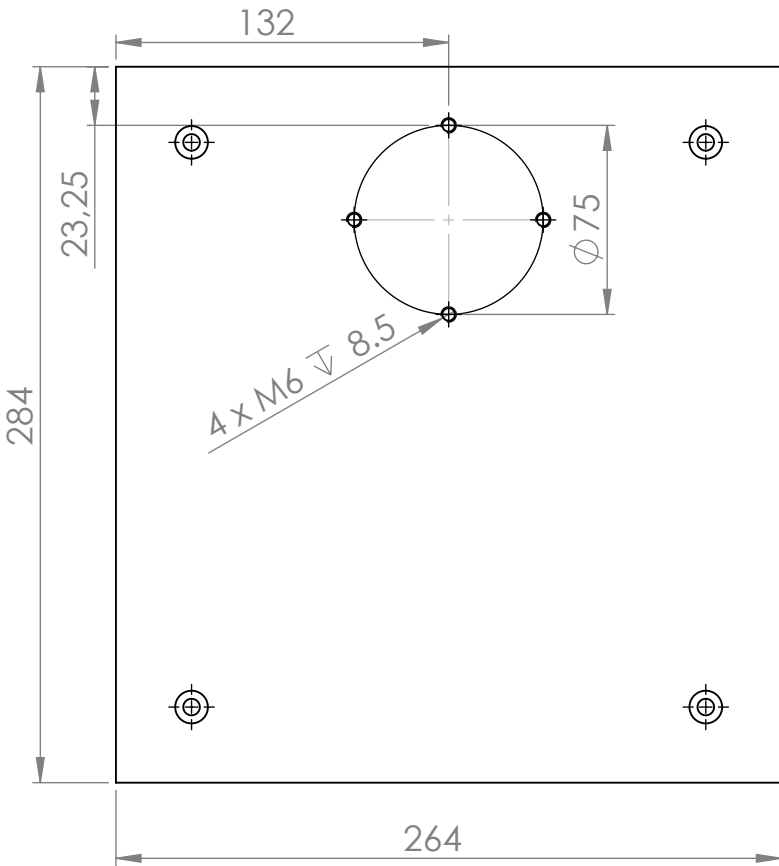
C

B

B

A

A



FINISH:  
**ISO 8015**  
**ISO 2768 - mk**

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:  
**Base existente depósito**

MATERIAL:  
**Aço EN C45E**

DWG NO.

A4

WEIGHT: 7.6 kg

SCALE: 1:3

SHEET 1 OF 1

4 3 2 1

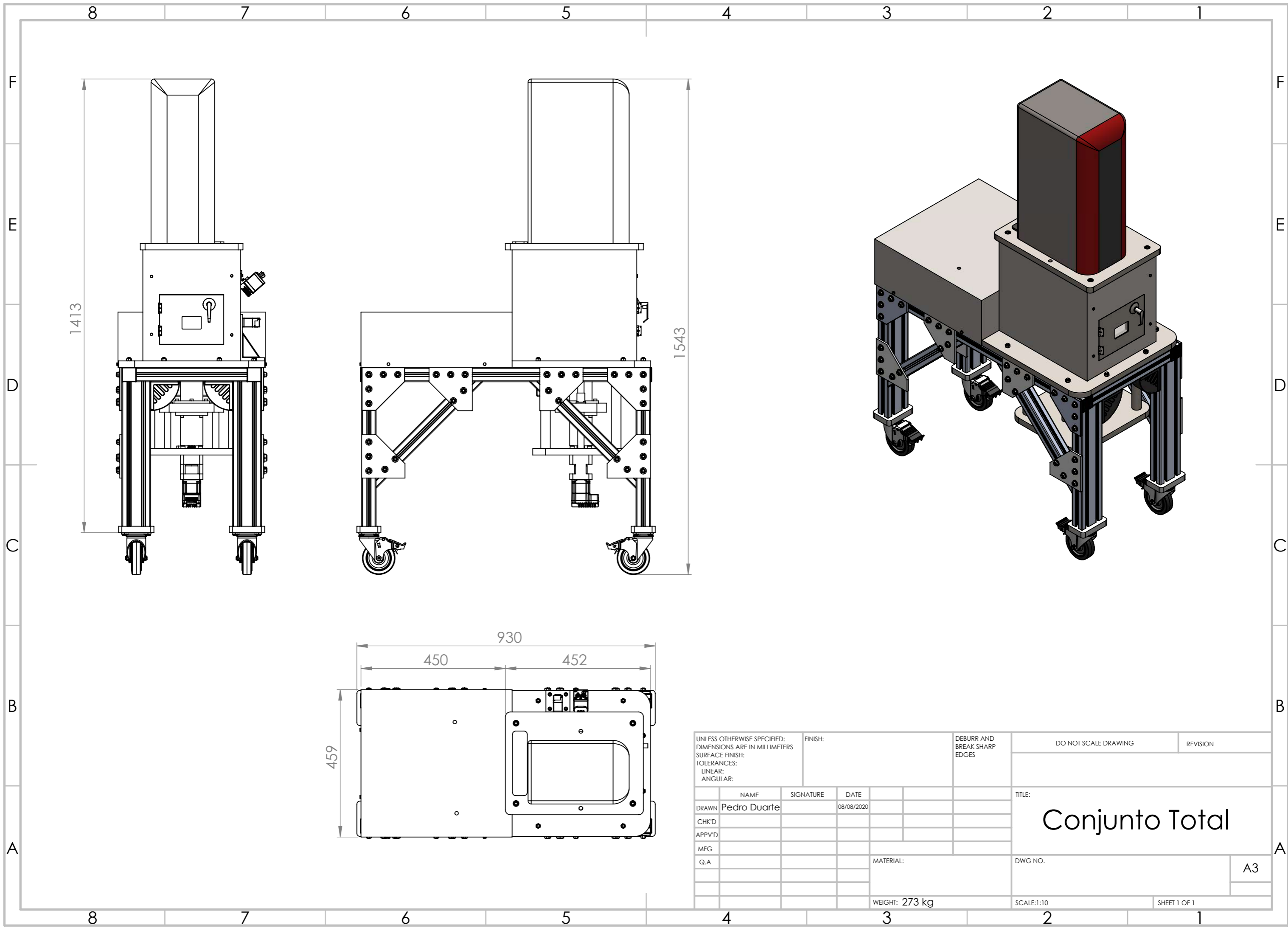
## A.2 Solução Proposta

Tabela A.1: Lista de produtos a adquirir.

Produto	Localização	Quant.	Fabricante	Modelo	Custo (€)
Motores	Rolo	1	Moons	STM11S-2RE	401.00
	Mesa de construção	1	Moons	STM23R-2E	268.00
	Varredor	1	Abb	M2BAX 80MB 6	500.00
Casquilhos	Rolo	2	Igus	GFM -1214 - 12	5.76
	Guias de suporte	4	Igus	GSM-1618-25	11.96
Rolamentos	Mesa de construção	1	SKF	3302 ATN9	35.00
	Varredor	2	SKF	7301 BEP	70,00
Acoplamento elástico	Rolo	1	Ktr	Rotex - 12 -Al-H - T - PUR -92 Shore A	50.00
	Mesa de construção	1	Ktr	TOOLFLEX -20 - S type 1.1	50.00
	Varredor	1	Ktr	Rotex - 19 -Al-H - T - PUR -98 Shore A	50,00
Fuso trapezoidal	Mesa de construção	1	Igus	Tr 24x5 x 220	15.00
	Varredor	1	Igus	Tr 20x4 x 310	17.00
Porca trapezoidal	Mesa de construção	1	Igus	Tr 24x5	45.50
	Varredor	1	Valenta	Tr 20x4	50.00
Câmara de infravermelhos		1	Optris	Pi 400i, f = 13 mm	4850.00
Sensor oxigénio		1	SST	O2S-FR-T2-18BM-C	234.00
Fins de curso	Mesa de construção	1	Automation Direct	STM33A	40.00
	Varredor	2	Automation Direct	AEP2G41Z11-1	40.00
Placa aquecimento		1	Watlow	Ultramic 600 Advanced Ceramic Heater	50.00
Termopares		2	Rs Pro	Type K Thermocouple 6 x 4	40.00
Filtro de ar		1	Knokoo	FES150	215.00
Perfis de alumínio		4	Framing Tech	45x90x450	81.40
		2	Framing Tech	45x45x345	15.76
		2	Framing Tech	45x45x900	35.18
		4	Framing Tech	45x45x470	40.28

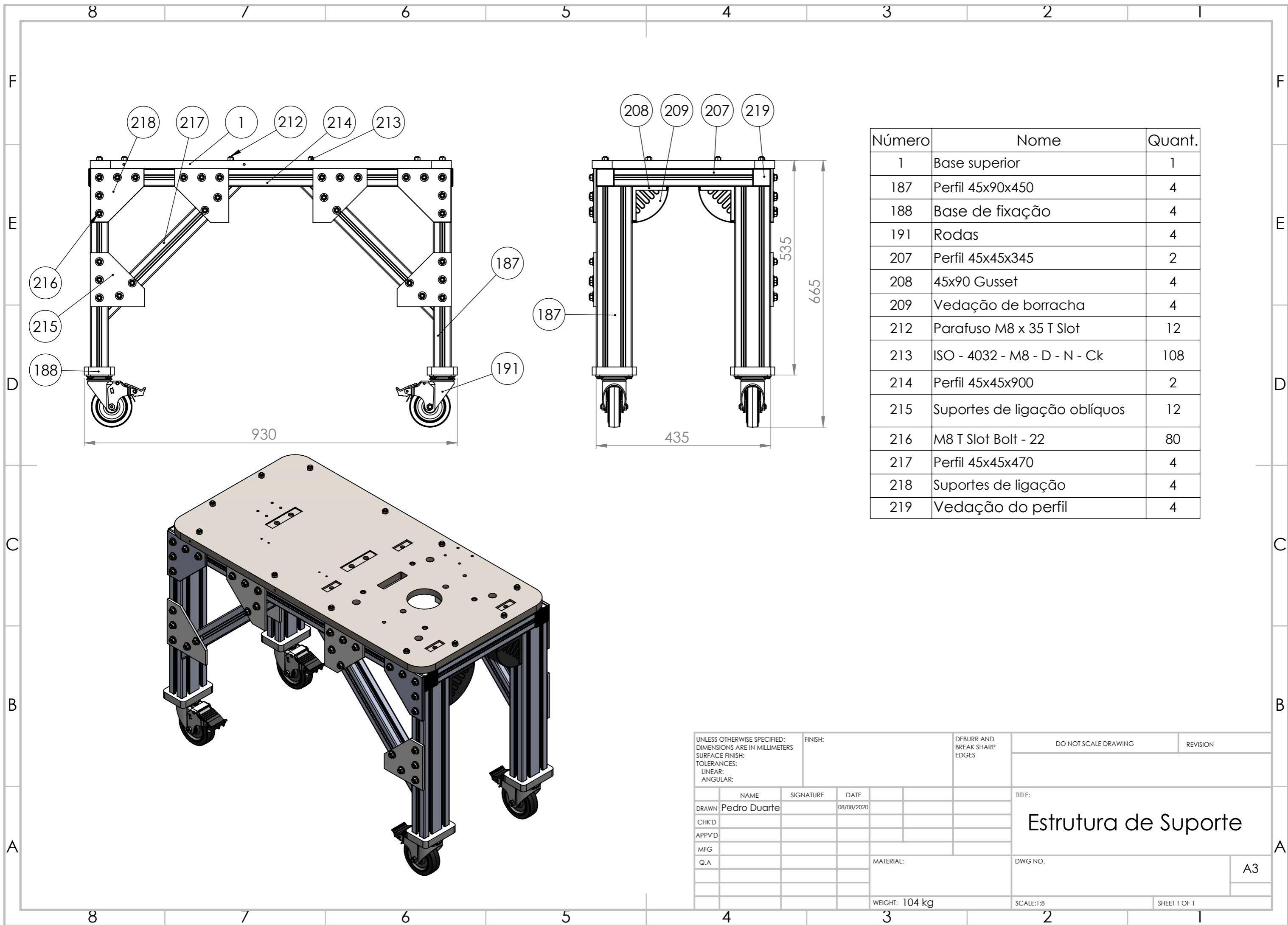
---

	4	Framing Tech	45x90 Gusset	26.08
Rodas	4	Framing Tech	Swivel caster, 4in with brake	89.68
Somatório (€)				7326.60



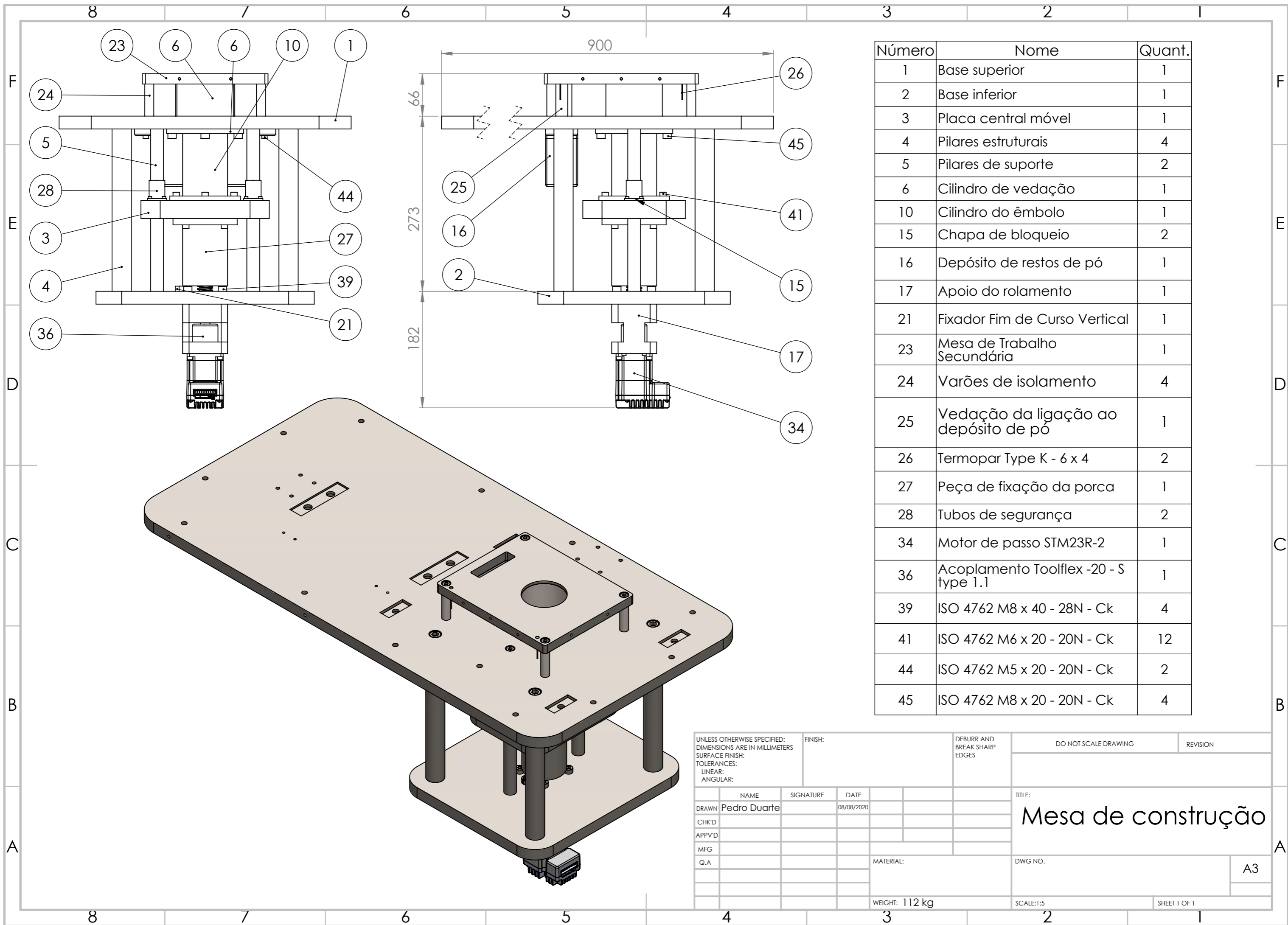
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
DRAWN Pedro Duarte			SIGNATURE		DATE 08/08/2020		TITLE: <b>Conjunto Total</b>				
CHK'D			MFG		Q.A		MATERIAL:		DWG NO.		
WEIGHT: 273 kg			SCALE: 1:10		SHEET 1 OF 1		A3				





Número	Nome	Quant.
1	Base superior	1
187	Perfil 45x90x450	4
188	Base de fixação	4
191	Rodas	4
207	Perfil 45x45x345	2
208	45x90 Gusset	4
209	Vedação de borracha	4
212	Parafuso M8 x 35 T Slot	12
213	ISO - 4032 - M8 - D - N - Ck	108
214	Perfil 45x45x900	2
215	Suportes de ligação oblíquos	12
216	M8 T Slot Bolt - 22	80
217	Perfil 45x45x470	4
218	Suportes de ligação	4
219	Vedação do perfil	4

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION			
DRAWN Pedro Duarte			SIGNATURE		DATE 08/08/2020		TITLE: <b>Estrutura de Suporte</b>					
CHK'D			APPV'D		MFG		Q.A		MATERIAL:		DWG NO.	
A3			WEIGHT: 104 kg		SCALE:1:8		SHEET 1 OF 1					



Número	Nome	Quant.
1	Base superior	1
2	Base inferior	1
3	Placa central móvel	1
4	Pilares estruturais	4
5	Pilares de suporte	2
6	Cilindro de vedação	1
10	Cilindro do êmbolo	1
15	Chapa de bloqueio	2
16	Depósito de restos de pó	1
17	Apoio do rolamento	1
21	Fixador Fim de Curso Vertical	1
23	Mesa de Trabalho Secundária	1
24	Varões de isolamento	4
25	Vedação da ligação ao depósito de pó	1
26	Termopar Type K - 6 x 4	2
27	Peça de fixação da porca	1
28	Tubos de segurança	2
34	Motor de passo STM23R-2	1
36	Acoplamento Toolflex -20 - S type 1.1	1
39	ISO 4762 M8 x 40 - 28N - Ck	4
41	ISO 4762 M6 x 20 - 20N - Ck	12
44	ISO 4762 M5 x 20 - 20N - Ck	2
45	ISO 4762 M8 x 20 - 20N - Ck	4

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND BREAK SHARP EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

TITLE:  
**Mesa de construção**

DRAWN Pedro Duarte 08/08/2020

CHK'D

APPV'D

MFG

Q.A

MATERIAL:

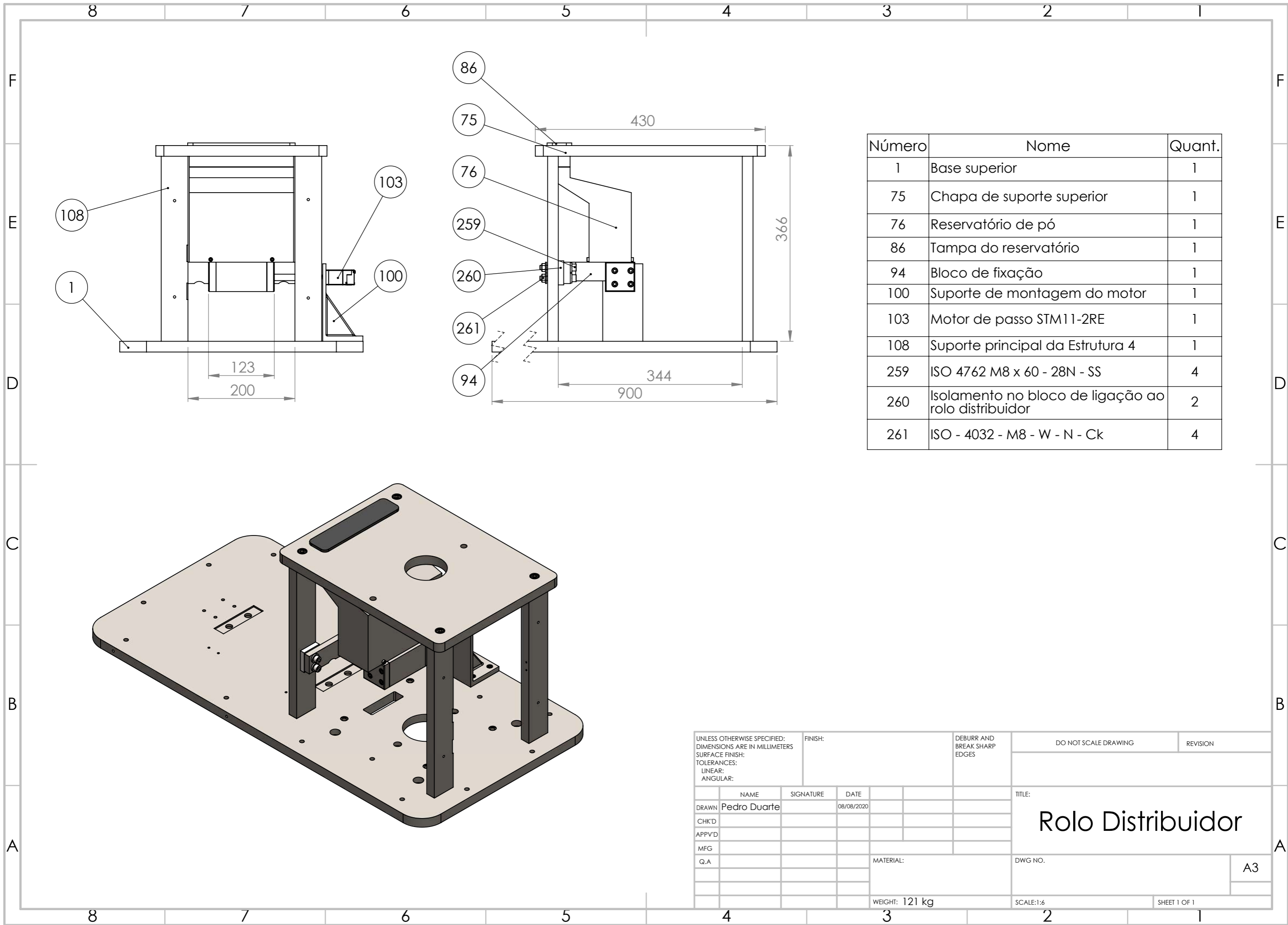
DWG NO.

A3

WEIGHT: 112 kg

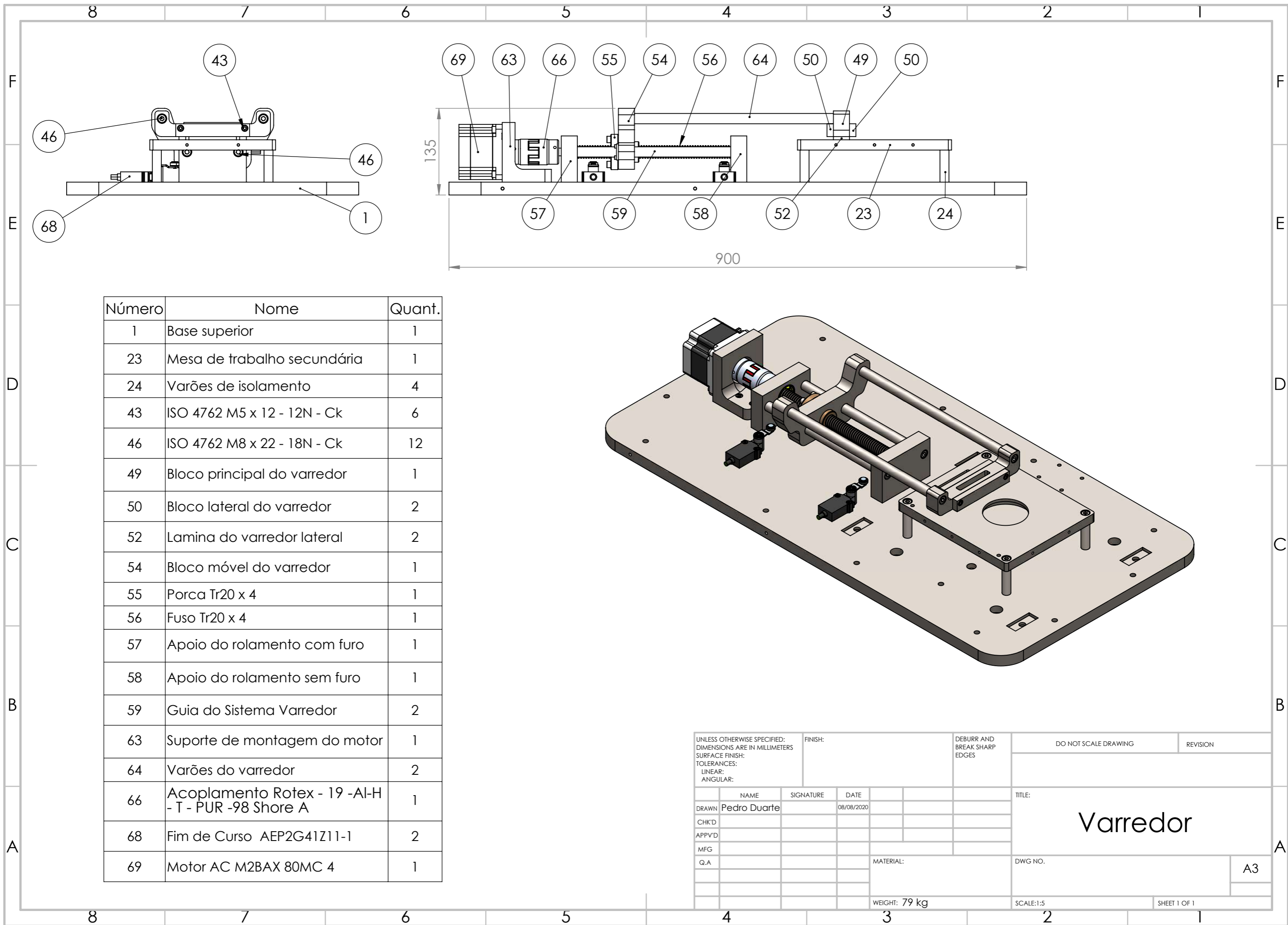
SCALE:1:5

SHEET 1 OF 1



Número	Nome	Quant.
1	Base superior	1
75	Chapa de suporte superior	1
76	Reservatório de pó	1
86	Tampa do reservatório	1
94	Bloco de fixação	1
100	Suporte de montagem do motor	1
103	Motor de passo STM11-2RE	1
108	Suporte principal da Estrutura 4	1
259	ISO 4762 M8 x 60 - 28N - SS	4
260	Isolamento no bloco de ligação ao rolo distribuidor	2
261	ISO - 4032 - M8 - W - N - Ck	4

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
DRAWN Pedro Duarte			SIGNATURE		DATE 08/08/2020		TITLE: <b>Rolo Distribuidor</b>				
CHK'D			APPV'D		MFG		Q.A		MATERIAL:		
WEIGHT: 121 kg			SCALE:1:6		DWG NO.			A3			
SHEET 1 OF 1											



Número	Nome	Quant.
1	Base superior	1
23	Mesa de trabalho secundária	1
24	Varões de isolamento	4
43	ISO 4762 M5 x 12 - 12N - Ck	6
46	ISO 4762 M8 x 22 - 18N - Ck	12
49	Bloco principal do varredor	1
50	Bloco lateral do varredor	2
52	Lamina do varredor lateral	2
54	Bloco móvel do varredor	1
55	Porca Tr20 x 4	1
56	Fuso Tr20 x 4	1
57	Apoio do rolamento com furo	1
58	Apoio do rolamento sem furo	1
59	Guia do Sistema Varredor	2
63	Suporte de montagem do motor	1
64	Varões do varredor	2
66	Acoplamento Rotex - 19 -Al-H - T - PUR -98 Shore A	1
68	Fim de Curso AEP2G41Z11-1	2
69	Motor AC M2BAX 80MC 4	1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:			
DRAWN Pedro Duarte		08/08/2020	<h1>Varredor</h1>			
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A			MATERIAL:	DWG NO.	A3	
			WEIGHT: 79 kg	SCALE:1:5	SHEET 1 OF 1	