



**Projeto e Construção de uma ferramenta para
avaliação da deformação de cama de agulhas**

José Lima da Silva

UMinho | 2022



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Carlos Lima da Silva

**Projeto e Construção de uma ferramenta
para avaliação de deformação de cama
de agulhas**

março de 2022



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Carlos Lima da Silva

**Projeto e construção de uma
ferramenta para avaliação da
deformação de cama de agulhas**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor José Filipe Bizarro Meireles

março de 2022

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

AGRADECIMENTOS

O mérito do trabalho aqui presente não está apenas no nome que consta na capa, assim aproveito este espaço para agradecer a todos aqueles que de forma direta ou indireta deram o seu contributo.

Agradeço ao meu orientador, Professor Douro José Meireles, pela experiência e conhecimento que me foi dado enquanto orientava o decurso do trabalho. Encontrando-se sempre disponível para auxiliar e de me colocar, sempre que necessário, no caminho certo.

Do mesmo modo, agradeço ao Senhor Engenheiro Pedro Vieira, da empresa Controlar, e ao Senhor Engenheiro Ricardo Carvalho, da empresa MeusBurger, e ao Senhor Engenheiro Pedro Rebelo, da empresa MRA, por fornecerem dados fundamentais ao projeto e mostrarem disponibilidade para auxiliarem no projeto.

Aos meus pais, Carlos e Irene e ao meu irmão Daniel, tenho de agradecer a oportunidade, pela forma que me educaram e permitiram que eu prosseguisse os meus estudos, apesar das diferentes dificuldades, estando sempre presentes ao longo deste ciclo.

Um abraço a todos os meus colegas de curso, com especial agradecimento aos que acompanharam com maior proximidade ao longo destes anos, onde às memórias criadas vão permanecer para sempre em nós.

Agradeço também às quatro pessoas que me escolheram para lhes mostrar e auxiliar nos seus primeiros anos universitários, obrigado pela confiança depositada em mim e que eu não vós tenha desiludido de nenhum modo.

Por fim, agradecer a todas as outras pessoas que de certo modo me influenciaram e permitiram chegar até onde me encontro hoje.

“Este trabalho foi realizado ao abrigo de um projeto que é cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) do Programa Portugal 2020 [Projeto nº 40418, de acrónimo “TOP4ICT – Tooling Optimizing for ICT Systems”; Referência de Financiamento: POCI-01-0247-FEDER-040418].”

Cofinanciado por:



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

Declaração de Integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Modernamente os circuitos eletrônicos são produzidos em placas que suportam os componentes e que os interligam criando as chamadas placas de circuito impresso, PCB.

Estas placas produzidas normalmente em grande volume precisam de ser testadas antes de serem dadas como concluídas. Existe equipamento próprio para realizarem os testes ao PCB designados por testes em circuito, ICT, que utilizam agulhas que contactam os pontos chave do PCB. Estas agulhas são montadas numa placa isolante designada cama de agulhas, sendo esta utilizada para suportar e guiar as agulhas para um ponto específico. Posto isto, cama de agulhas não pode sofrer deformações elevadas, pois caso tal aconteça a agulha de teste não pressionará o ponto correto, gerando resultados inválidos, por tal as camas de agulhas precisam de ser testadas.

O principal objetivo desta dissertação é projetar uma ferramenta capaz de realizar os testes das camas de agulhas utilizando a tecnologia de correlação de imagem, DIC, para a avaliação de deformação da cama de agulhas. Esta ferramenta deve ser capaz de realizar um ensaio a qualquer tipo de placa, independentemente do seu formato e carregamento.

Devido a isto a ferramenta a projetar deve cumprir com várias exigências, sendo algumas necessárias uma abordagem mais complexa, efetuando assim análises analíticas e numéricas.

Palavras-chave: Cama de agulhas; digital image correlation, ferramenta de avaliação de deformação

ABSTRACT

Moderately, electronic circuits are produced on boards that support the components that interconnect them, creating so-called printed circuit board, PCB.

These boards normally produced in high volume need to be tested before they are finished. There is specific equipment to carry out PCB tests called circuit tests, ICT, which use needles that contact the key points of the PCB. These needles are mounted on an insulating plate called a bed of nails. Taking this into account, the needle bed cannot undergo high deformations, as if this happens the test needle will not press the correct point, generating invalid results, therefore, needs beds need to be tested.

The main objective of this dissertation is to design a tool capable of performing needle bed tests using image correlation technology, DIC, for the evaluation of deformation. This tool should be able to test any type of board, regardless of its format and load. Because of this, the tool to be designed must comply with several requirements, some of which require a more complex approach, thus performing analytical and numerical analyses.

Key word: Bed of nails, Digital Image Correlation, Deformation assessment tool

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de gráficos	xiv
Lista de Abreviaturas, Acrónimos e Sigla	xv
Lista de Símbolos	xvi
Lista de equações.....	xx
1. Introdução	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Empresa Controlar	1
1.3 Motivação	2
1.4 Estrutura da Dissertação	2
2. Revisão Bibliográfica e Estado da Arte	4
2.1 Placa PCB.....	4
2.1.1 TIC - Test in circuit.....	8
2.2 Normalização	11
2.3 Obtenção de dados	12
2.3.1 Cama de agulhas	12
2.3.2 Digital Image Correlation.....	13
2.3.3 Célula de Carga.....	19
2.3.4 Sensor Linear	20
3. Pré-projecto	26
3.1 Objetivos do Projeto	26
3.2 Arquitetura da ferramenta	29
4. Fundamentos Teórico de Apoio ao Projeto.....	51
4.1 Cálculo Teórico	51
5. Projeto Ferramenta	78

5.1 Definição da ferramenta	78
5.2 Dimensionamento	87
5.2.1 Cálculo Analítico	88
5.2.2 Cálculo Numérico	106
5.3 Desenhos Técnicos	115
5.4 Orçamentação	116
5.5 Estudo de deformação da cama de agulhas	123
6. Conclusões	128
6.1 Conclusão	128
6.2 Trabalhos Futuros	128
Bibliografia	130
Lista de Referências	131
Anexo A – Apoio ao cálculo dos varões	136
Anexo B - Desenhos técnicos	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplificação de uma placa de circuito impresso	4
Figura 2 – Esquema de uma placa PCB obtida através de multicamada. [2].....	5
Figura 3 – Tipos de conexões existentes numa placa PCB. [3].....	5
Figura 4 –Exemplificação dos métodos de inspeção visuais. A) Inspeção Manual Visual. B) Inspeção Manual Ótica. C) Inspeção Raio X. [4].....	7
Figura 5 – Esquema de uma sonda utilizada no teste TIC, constituída por uma agulha (<i>Pluge</i>), a mola (<i>Spring</i>) e o cano (<i>barrel</i>). [6].....	8
Figura 6 – Tipos de sondas utilizados para a testagem pelo método TIC. [6]	9
Figura 7 – Exemplificação de uma cama de agulhas. [8].....	11
Figura 8 – Descrição geral de um adaptador de teste [9]	12
Figura 9 – Área representado a posição de sucessivos contactos da mesma agulha sobre o alvo. [9]	13
Figura 10 – Rastreamento da movimentação do pixel que irá permitir a obtenção do deslocamento.[13]	14
Figura 11 – Tipos de DIC tendo em conta as dimensões. [14].....	14
Figura 12 – Exemplificação de requisitos para o padrão a aplicar no objeto em teste. [13]	15
Figura 13 – Densidade de manchas do padrão. [14].....	15
Figura 14 – Análise do método DIC para um subconjunto. [14].....	17
Figura 15 – Análise do método DIC para o caso de vários subconjuntos. [14].....	17
Figura 16 - Formas diferentes de deslocamento linear para um subconjunto.[15]	18
Figura 17 – Diversos tipos de células de carga existentes. [16]	20
Figura 18 - À esquerda uma régua com escala magnética; À direita uma régua com escala ótica. [17]	21
Figura 19 – Unidade de exibição de escala linear KA-200. [17]	22
Figura 20 – Potenciómetro retilíneo. [19].....	22
Figura 21 – Sensor linear da Cambridge IC. [21]	23
Figura 22 – Chip - central de rastreamento da Cambridge IC. [21]	24
Figura 23 – Alvo E-core onde se observa o circuito ressonante interno. [21]	24
Figura 24 – Mesa a utilizar na ferramenta que se encontra no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho.	29
Figura 25 – Desenho técnico de uma cama de agulhas utilizada pela Controlar.....	30
Figura 26 - Desenho técnico de uma cama de agulhas utilizada pela Controlar.....	30

Figura 27- Mesa com aumento de largura através da adição de vigas na parte lateral.	31
Figura 28 – Aplicação de uma placa em cima da estrutura com utilização de cantoneiras.	32
Figura 29 – Posição do conjunto de placas que constituem a ferramenta.	33
Figura 30 – Fixação das placas externas à mesa.....	33
Figura 31- À esquerda imagem da guia linear escolhida; à direita imagem do patim wide block- tapped hole. [22]	34
Figura 32 – Ligação da guia às placas internas.....	35
Figura 33 – Furos passantes na mesa para auxiliar a aplicação dos parafusos nos patins.....	35
Figura 34 – Ligação das guias à mesa.....	35
Figura 35 – Varões a utilizar na ferramenta.....	36
Figura 36 – Aplicação dos varões na ferramenta.....	36
Figura 37 – Anilhas aplicadas entre o varão e a placa.....	37
Figura 38 – À direita utilização dos casquilhos nas placas internas. À esquerda um exemplo de um casquilho de esferas. [23]	37
Figura 39 – Parafuso de esferas pensado numa ideia inicial.....	38
Figura 40 – Ideia proposta para a aplicação de força na ferramenta.....	39
Figura 41 - Formato final do parafuso de esferas.....	39
Figura 42 – Exemplificação de uma porca de fixação.	40
Figura 43 – Casquilho linear do tipo standard.[24].....	40
Figura 44 – Conjunto de aplicação de força na ferramenta.....	40
Figura 45 – À esquerda fixação da célula de carga na placa interna. À direita peça adaptadora da célula de carga (a).....	41
Figura 46 – À esquerda ligação da célula de carga ao tubo integrante; À direita peça adaptadora da célula de carga (b).....	41
Figura 47 – Apoio ao tubo integrante.	42
Figura 48 - Subsistema responsável pela origem e transmissão da força na ferramenta.....	42
Figura 49 – 1º: Rasgo na placa interna. 2º: Aplicação de placa com furos roscados, que permite a fixação do impactador. 3º: Aplicação da placa final que possui os furos que fornecem suporte ao punção.	43
Figura 50 – Exemplificação dos rasgos executados na placa externa-obtenção de dados e na placa interna-suporte de objeto.	44
Figura 51 – A esquerda localização das chapas intermédias com a aplicação dos parafusos; à direita aperto dos parafusos através de porcas.	45

Figura 52 – À esquerda aplicação dos parafusos que permitem a fixação da placa interna às chapas de ligação; à direita aperto dos parafusos através de porcas.	45
Figura 53 – À esquerda encontra-se a placa de suporte que permite a aplicação das camas de agulhas na ferramenta. À direita encontra-se a montagem destes componentes, placa de suporte e cama, na placa interna.	46
Figura 54 – À esquerda encontra-se a ideia para o sistema roda mais o sistema anti vibratório, com roda niveladora, painel sandwich com uma placa anti vibratória, e a ligação à mesa. À direita encontra-se o modo de fixação do painel à chapa da roda.	47
Figura 55 – Subsistema vibratório, consistindo num pé anti vibratório e uma peça adaptadora para encaixe na mesa.	48
Figura 56 – Subsistema de movimentação.....	48
Figura 57 – Aplicação da segunda ideia para os subsistemas anti vibratórios e de movimentação.	49
Figura 58 – Utilização de cantoneiras de rasgo para suporte da régua linear.	50
Figura 59 – Formato da peça adaptadora à régua linear.	50
Figura 60 – Aplicação da peça adaptadora à guia linear: à esquerda ligação da peça ao cursor da guia; à direita ligação da peça à retaguarda da placa.....	51
Figura 61 - Opções de montagem para o parafuso de esferas: A) Fixo-livre; B) Fixo-apoiado; C) Fixo-Fixo-[25].....	54
Figura 62 – Comprimento efetivo. [28]	58
Figura 63 – Enunciado das cargas descentradas aplicadas nos varões. [29].....	59
Figura 64 – Consideração para o cálculo do momento no varão. [29]	60
Figura 65 – Deformação do varão. [29]	60
Figura 66 – Carregamento através de um momento. [29].....	61
Figura 67 – Coluna sujeita a carregamento excêntrico a atuar fora dos planos de simetria	62
Figura 68 – Chaveta do tipo A. [33]	67
Figura 69 – Carregamento e dimensões de uma chaveta. [33].....	67
Figura 70 – Distância para os eixos dos furos. [27]	71
Figura 71 – Carregamento aplicado de forma a separar um conjunto unido por um parafuso. [33]....	73
Figura 72 – Método cone de pressão. [33].....	74
Figura 73 – Caso de simplificação do método do cone de pressão. [33].....	75
Figura 74 – Simbologia utilizada para a parte lisa e roscada do parafuso. [33]	76
Figura 75 – Ferramenta de avaliação de deformação.	87

Figura 76 – Aplicação da câmara no ensaio.....	87
Figura 77 – Método de obtenção das distâncias do punção à origem.	90
Figura 78 – Diagrama de corpo livre para a obtenção dos momentos.....	91
Figura 79 – Diagrama de corpo livre para o cálculo da deformação nos varões.....	92
Figura 80 – varão utilizado na ferramenta.....	94
Figura 81 - Furos necessários para aplicação dos parafusos de ligação mesa-placa.....	101
Figura 82 – Localização dos furos de ligação entre os patins e a placa interna.	102
Figura 83 – Utilização de parafusos na mesa.	105
Figura 84 – Condições de fronteira e cargas definidas para o cálculo do numérico da parte superior.	108
Figura 85 – Malha de 10 mm aplicada na ferramenta.....	109
Figura 86 – À esquerda deformação total em mm; À direita tensão equivalente segundo von-Mises em MPa.	110
Figura 87 – Deformação direcional segundo o eixo do x para a secção superior em mm.	110
Figura 88 – Condições de fronteira no cálculo numérico da parte inferior.	111
Figura 89 – Malha realizada para o cálculo da secção inferior.	112
Figura 90 – À esquerda deformação total existente na secção inferior da ferramenta em mm. À direita tensão equivalente segundo von-Mises em MPa.	113
Figura 91 – Deformação segundo o eixo do Y em mm.	113
Figura 92 – À esquerda deformação total em mm para o pé anti vibratório; À direita tensão equivalente segundo von-Mises para o pé anti vibratório em MPa	114
Figura 93 – Modelação da cama de agulhas em estudo.	123
Figura 94 – Condições de fronteira aplicados na cama de agulhas.....	124
Figura 95 – Aplicação da carga na cama de agulhas.....	124
Figura 96 -Exemplificação da malha aplicada na cama de agulhas.	125
Figura 97 – Resultados da deformação total obtidos no primeiro cálculo para a cama de agulhas....	126
Figura 98 – Aplicação da carga no segundo cálculo realizado na cama de agulhas.....	126
Figura 99 – Excerto da malha utilizada no segundo cálculo numérico da cama de agulhas.	127
Figura 100 – Deformação total ocorrida na cama de agulhas após aplicação de carga.	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Folga axial de um parafuso de esferas. [25].....	52
Tabela 2 – Comprimento total do eixo do parafuso tendo em conta a classe de precisão em mm [25]	52
Tabela 3 – Combinações padrão de eixo parafuso e avanço em mm. [25].....	53
Tabela 4 – Combinação diâmetro exterior e avanços dos eixos do parafuso em mm. [25]	54
Tabela 5- Fator de carga f_w . [25]	55
Tabela 6 -Fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura. [27].....	57
Tabela 7 – Curva de encurvadura dependente da secção transversal. [27]	57
Tabela 8 - Fator de contacto f_C . [30].....	64
Tabela 9 - Fator de carga f_W . [30]	64
Tabela 10 – Fatores de segurança da guia linear. [31]	65
Tabela 11 – Fator de contacto de uma guia linear. [31]	66
Tabela 12 – Fator de carga para guia linear. [31].....	66
Tabela 13- Fator de sobrecarga e binário de cálculo por chaveta. [33].....	68
Tabela 14 – Dimensões das chavetas conforme o diâmetro do veio. [33]	69
Tabela 15 – Dimensão do comprimento da chaveta. [33].....	69
Tabela 16 – Comprimentos normalizados para uma chaveta. [33]	70
Tabela 17 – Valores nominais da tensão de cedência e da tensão de rotura à tração [27]	72
Tabela 18 - Propriedades de resistência de um parafuso de cabeça sextavada exterior. [33].....	74
Tabela 19 – Propriedades mecânicas de parafusos de rosca métrica. [33].....	77
Tabela 20 – Características propostas para os componentes existentes na força de ensaio.....	79
Tabela 21 - Características propostas para os componentes existentes na fixação das placas	82
Tabela 22 - Características propostas para os componentes existentes no sistema de movimentação.	83
Tabela 23 - Características propostas para os componentes que permitem obter o valor da deformação.	85
Tabela 24 - Características propostas para os componentes no sistema da mesa.	86
Tabela 25 – Valores de força descentrada aplicada em cada varão tendo em conta o quadrante em N.	91
Tabela 26 – Dimensionamento da chaveta.	96
Tabela 27 -Dimensionamento do volante.....	98
Tabela 28 – Propriedades do aço estrutural utilizado, encontrado na galeria do Ansys.....	107
Tabela 29 – Propriedades do AISI 1045 adicionadas à biblioteca do Ansys. [41]	107

Tabela 30 – Estudo da convergência da malha no cálculo numérico da secção superior.	109
Tabela 31 – Estudo de convergência da malha na superfície da mesa.	112
Tabela 32 – Orçamentação do Projeto	117
Tabela 33 – Propriedades mecânicas do papel fenólico PFCP206. [43].....	124
Tabela 34 – Convergência de malha do primeiro cálculo para a cama de agulhas.	125
Tabela 35 - Convergência de malha do segundo cálculo para a cama de agulhas.	127
Tabela 36 – Resultados de força obtidas com posicionamento do punção do quadrante superior esquerdo.	136
Tabela 37- Resultados de força obtidas com posicionamento do punção do quadrante superior direito.	137
Tabela 38 - Resultados de força obtidas com posicionamento do punção do quadrante inferior esquerdo.	138
Tabela 39 - Resultados de força obtidas com posicionamento do punção do quadrante inferior direito.	140
Tabela 40 – Resultados obtidos para a deformação do varão	141

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Percentagem de defeitos que podem ocorrer na produção de PCB. [3].....	6
Gráfico 2 – Variação da força da mola com o curso de trabalho.[6]	9
Gráfico 3 – Diagrama força-curso de vários tipos de agulhas. [7]	10
Gráfico 4 – Diagrama de blocos de funcionamento simplificado do sensor de precisão linear. [21]	23
Gráfico 5 – Fatores de acoplamento das bobinas. [21]	25
Gráfico 10 - Árvore de objetivos.....	28
Gráfico 7 – Fator de rigidez fH . [30].....	63
Gráfico 8 - Fator de temperatura fT . [30].....	63
Gráfico 8 – Fator de dureza para as guias lineares [31].....	65
Gráfico 9 – Fator de temperatura para as guias lineares [31]	65
Gráfico 11 – Estudo da convergência de malha no cálculo numérico da secção superior.	109

LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS E SIGLA

Abreviaturas/Acrónimos/Sigla	Designação
PCI	Placa de circuito impresso
PCB	Placa de circuito impresso
MVI	Inspeção manual visual
AOI	Inspeção ótica automática
TC	<i>Test in circuit</i>
ICT	<i>Test in circuit</i>
FTC	Teste de Circuito Funcional
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
DVC	Correlação do volume digital
OIML	Organização Internacional de Metrologia Legal
DRO	<i>Digital Reads Outs</i>
CTU	Unidade central de rastreamento
EMF	Campos eletromagnéticos
BOM	<i>Bill of materials</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Designação	Unidade
x^*	Deslocamento final do subconjunto em x.	Pixels
y^*	Deslocamento final do subconjunto em x.	Pixels
u	Deslocamento do subconjunto de centro em P em x	Pixels
v	Deslocamento do subconjunto de centro em P em y	Pixels
Δx	Varição de posição em x	Pixels
Δy	Varição de posição em x	Pixels
<i>wavelength</i>	Comprimento de onda do sinal	mm
N_{ED}	Esforço atuante	N
$N_{C,RD}$	Esforço resistente de compressão	N
A	Área	mm^2
F_y	Tensão de cedência	N/mm^2
γ_{M0}	Coefficiente Parcial de segurança de secções transversais de qualquer classe	—————
W	Força aplicada	N
x_0	Distância da carga ao centro em x	mm
y_0	Distância da carga ao centro em y	mm
X'	Distância entre s centros dos varões em x	mm
Y'	Distância entre s centros dos varões em y	mm
M	Momento aplicado	Nmm
a	Distância ao lado encastrado mais longo	mm
B	Distância ao lado encastrado mais curto	mm
E	Módulo de Elasticidade	Pa
I	Momento de inercia	mm^4
w	Deformação aplicada no varão	mm
V_0	Esforço transversal quando $x=0$	N
M_0	Momento quando $x=0$	N
F_w	Carga associada à deformação	N
$\overline{F_w}$	Carga associada à deformação quando $X=L$	N
$\overline{F_\theta}$	Carga associada ao declive quando $X=L$	N

F_{θ}	Carga associada ao declive	N
c	Momento aplicado	Nmm
a_c	Distancia à aplicação do momento	mm
σ	Tensão	Pa
P	Carga aplicada	N
h	Altura da chaveta	mm
$(\sigma_{adm})_{centrica}$	Tensão de cedência à carga centrada admissível	Pa
$(\sigma_{adm})_{flexão}$	Tensão de cedência à flexão admissível	Pa
L_v	Comprimento de vida	mm
f_H	Fator de rigidez	_____
f_T	Fator de temperatura	_____
f_C	Fator de Contacto	_____
f_W	Fator de carga	_____
P_u	Carga equivalente	N
P_{ca}	Carga axial permitida	N
l_a	Comprimento de montagem	mm
η_{f1}	Fator de montagem 1	_____
η_2	Fator de montagem 2	_____
P_{ct}	Carga de compressão de tensão permitida	N
T_a	Movimento linear do parafuso de esferas	$kgfmm$
F_b	Força linear aplicada no parafuso de esferas	kgf
η_1	Eficiência mecânica 1	_____
α	Ângulo de avanço	Graus
β	Ângulo de fricção	Graus
η_2	Eficiência mecânica 2	_____
T_c	Torque do parafuso de esferas	$kgfmm$
r	Raio	mm
T	Momento torsor	Nmm
τ	Tensão de corte	Pa
b	Largura de uma chaveta	mm
h	Altura de uma chaveta	mm
f_s	Fator de segurança	_____

N_{Ed}	Esforço aplicado que pode gerar encurvadura	N
$N_{b,Rd}$	Esforço normal resistente à encurvadura	N
x	Coefficiente de redução	————
γ_{M1}	Coefficiente parcial de segurança para a resistência dos elementos em relação a fenômenos de encurvadura	————
f_y	Tensão de cedência	N/mm^2
ϕ	Valor para calcular o coeficiente de redução	————
α_{imp}	Fator de imperfeição para a encurvadura de elementos compridos	————
$\bar{\lambda}$	Valor da esbelteza normalizado	————
N_{cr}	Valor crítico para do esforço normal para o modo de encurvadura	N
i	Raio de giração relativo ao eixo considerado	mm
L_e	Comprimento equivalente	mm
$F_{V,Ed}$	Resistência ao corte por plano de corte	N
$F_{b,Rd}$	Resistência ao esmagamento	N
$F_{V,Rd}$	Força de corte aplicado	N
$F_{t,Ed}$	Resistência à tração	N
$F_{t,Rd}$	Tração aplicada	N
$B_{p,Rd}$	Resistência ao punçoamento	N
α_V	Constante tendo em conta a aplicação a classe do parafuso	
f_{ub}	Tensão de rotura de um parafuso	N
γ_{M2}	Resistência dos parafusos	————
k_1	Constante associada as dimensões do local dependendo do tipo de parafuso	————
t	Espessura	mm
α_b		
k_2	Fator de aplicação da cabeça do parafuso	————
f_b		
t_p	Menor espessura dos componentes a ligar	mm
n_o	Coefficiente contra a separação dos membros	————
F_i	Pré-tensão	————

C	Fração de carga exterior suportada pelo parafuso	—————
F_p	Força de prova	N
A_t	Área resistente do parafuso	mm
S_p	Tensão de prova	Pa
k_b	Constante de rigidez do parafuso	N/mm
k_m	Constante de rigidez dos membros do parafuso	N/mm
k_t	Constante de rigidez da parte riscada do parafuso	N/mm
k_d	Constante de rigidez da parte lisa do parafuso	N/mm
L_{10}	Vida nominal de um rolamento	Milhões de revoluções
$P_1/P_1/P_1/P_4$	Carga descentrada aplicada ao varão de guiamento	N
D, d	Diâmetro	mm
c_d	Carga Dinâmica Básica	N
c_e	Carga Estática Básica	N

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1
$$x^* = u + \frac{\delta u}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta u}{\delta y} \Delta y$$

Equação 2
$$y^* = v + \frac{\delta v}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta v}{\delta y} \Delta y$$

Equação 3
$$C_{ZNSSD}(p) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x, y) - f_m}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2}} - \frac{g(x^*, y^*) - g_m}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x, y) - g_m]^2}} \right]^2$$

Equação 4
$$C_{ZNCC}(p) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{[f(x, y) - f_m] \times [g(x^*, y^*) - g_m]}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2} \times \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x^*, y^*) - g_m]^2}} \right]^2$$

Equação 5
$$Posição = \frac{Posição\ obtida\ pelo\ CTU}{65536} \times Sinlength$$

Equação 7
$$P_{ca} = \frac{\eta_{f1} \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{l_a^2} \times 0,5 = \eta_2 \frac{d_1^4}{l_a^2} \times 10^4$$

Equação 8
$$P_{ct} = \sigma \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = 116d_1^2$$

Equação 9
$$L = \left(\frac{C_a}{f_w \cdot F_a} \right)^3 \times 10^6$$

Equação 10
$$T_a = \frac{F_b \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot \eta_1}$$

Equação 11
$$\eta_1 = \tan \alpha / \tan(\alpha + \beta)$$

Equação 12
$$\alpha = \tan^{-1} \frac{l}{\pi \cdot D_m}$$

Equação 13
$$\beta = \tan^{-1} \mu$$

Equação 14
$$T_c = \frac{F_b \cdot l \cdot \eta_2}{2 \cdot \pi}$$

Equação 15
$$\eta_2 = \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha)}$$

Equação 16
$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

Equação 17

$$N_{b,Rd} = \frac{x \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

Equação 18

$$x = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

Equação 19

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_{imp}(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

Equação 20

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

Equação 21

$$N_{cr} = \frac{E \cdot A \cdot \pi^2}{\lambda^2}$$

Equação 22

$$\lambda = \frac{Le}{i}$$

Equação 23

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Equação 24

$$P1 = \frac{1}{4}W + \frac{x_0}{2X'}W + \frac{y_0}{2Y'}$$

Equação 25

$$P2 = \frac{1}{4}W - \frac{x_0}{2Y'}W + \frac{y_0}{2Y'}$$

Equação 26

$$P3 = \frac{1}{4}W + \frac{x_0}{2X'}W - \frac{y_0}{2Y'}$$

Equação 27

$$P4 = \frac{1}{4}W - \frac{x_0}{2X'}W - \frac{y_0}{2Y'}$$

Equação 28

$$M1 = \frac{Wab^3}{L^2}$$

Equação 29

$$M2 = \frac{Wba^3}{L^2}$$

Equação 30

$$w = w_0 - \theta_0 - V_0 \frac{x^3}{3!EI} - M_0 \frac{x^2}{2EI} + F_w$$

Equação 31

$$V_0 = -\frac{12EI}{L^3}F_w - \frac{6EI}{L^2}F_\theta$$

Equação 32

$$M_0 = \frac{6EI}{L^2}F_w + \frac{2EI}{L}F_\theta$$

Equação 33

$$F_w = \frac{c \langle x - a_c \rangle^2}{2EI}$$

Equação 34

$$F_\theta = -\frac{c \langle x - a_c \rangle}{2EI}$$

Equação 35

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{P}{A} + \frac{M \times h/2}{I}$$

Equação 36

$$\frac{\frac{P}{A}}{(\sigma_{\text{adm}})_{\text{centrica}}} + \frac{\frac{M \times h/2}{I}}{(\sigma_{\text{adm}})_{\text{flexão}}} \leq 1$$

Equação 37

$$\frac{\frac{P}{A}}{(\sigma_{\text{adm}})_{\text{centrica}}} + \frac{\frac{M_x \times h_1/2}{I_x}}{(\sigma_{\text{adm}})_{\text{flexão}}} + \frac{\frac{M_z \times h_2/2}{I_z}}{(\sigma_{\text{adm}})_{\text{flexão}}} \leq 1$$

Equação 38

$$P_{ct} = \sigma \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = 116d_1^2$$

Equação 39

$$L = \left(\frac{C_a}{f_w \cdot F_a} \right)^3 \times 10^6$$

Equação 40

$$L_v = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot f_C \cdot c_d}{f_w \cdot P_c} \right)^3 \times 50$$

Equação 41

$$P_u = K \cdot M$$

Equação 42

$$P \leq \frac{C_o}{f_s}$$

Equação 43

$$M \leq \frac{(M_a, M_b, M_c)}{f_s}$$

Equação 44

$$L_v = \left(\frac{f_H + f_T + f_C}{f_w} \cdot \frac{c_e}{P_c} \right)^3 \times 50$$

Equação 45

$$M = F \times r$$

Equação 46

$$T = F \times r = F \times \frac{d}{2} \approx F = \frac{2T}{d}$$

Equação 47

$$\sigma = \frac{4 \cdot T}{d \cdot l \cdot h}$$

Equação 48

$$\tau = \frac{2 \cdot T}{d \cdot l \cdot b}$$

Equação 49

$$F_{V.Ed} \leq F_{V.Rd}$$

Equação 50

$$F_{V.Ed} \leq F_{b.Rd}$$

Equação 51

$$F_{t.Ed} \leq F_{t.Rd}$$

Equação 52

$$F_{t.Ed} \leq B_{p.Rd}$$

Equação 53

$$F_{V.Rd} = \frac{\alpha_V \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$$

Equação 54

$$F_{b.Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

Equação 55

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0}$$

Equação 56

$$F_{t.Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

Equação 57

$$B_{p.Rd} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot f_b \cdot t_p}{\gamma_{M2}}$$

Equação 58

$$\frac{F_{V.Ed}}{F_{V.Rd}} + \frac{F_{t.Ed}}{1,4 \cdot F_{t.Rd}} < 1$$

Equação 59

$$n_o = \frac{F_i}{P(1 - C)}$$

Equação 60

$$F_i = 0,75 \cdot F_p$$

Equação 61

$$F_i = 0,90 \cdot F_p$$

Equação 62

$$F_p = A_t \cdot S_p$$

Equação 63

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m}$$

Equação 64

$$k = \frac{0.5774 \cdot \pi \cdot E \cdot d}{\ln\left(\frac{(1.1155t + D - d)(D + d)}{(1.1155t + D - d)(D - d)}\right)}$$

Equação 65

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}$$

Equação 66

$$k_m = \frac{\pi \cdot E \cdot d \cdot \tan \alpha}{2 \ln\left(\frac{(l \cdot \tan \alpha + d_w - d)(d_w + d)}{(l \cdot \tan \alpha + d_w - d)(d_w - d)}\right)}$$

Equação 67

$$k_m = \frac{0.5774 \cdot \pi \cdot E \cdot d}{2 \ln\left(5 \frac{0.5774 \cdot l + 0.5d}{0.5774 \cdot l + 2.5d}\right)}$$

Equação 68

$$k_t = \frac{A_t \cdot E}{l_t}$$

Equação 69

$$k_d = \frac{A_d \cdot E}{l_d}$$

Equação 70

$$k_d = \frac{A_d \cdot E}{l_d}$$

Equação 71

$$k_b = \frac{A_d \cdot A_t \cdot E}{A_d \cdot l_d + A_t \cdot l_t}$$

Equação 72

$$\frac{N_{ED}}{N_{c,RD}} \leq 1$$

Equação 73

$$N_{c,RD} = \frac{A \times F_y}{\gamma_{M0}}$$

Equação 74 $Carga\ estática \times altura \leq Peso\ Próprio \times distância\ À\ roda$

1. INTRODUÇÃO

Neste projeto encontra-se o desenvolvimento de uma ferramenta que irá permitir a obtenção da deformação de camas de agulhas. As camas de agulhas são placas aproximadamente retangulares, utilizadas por um componente fundamental de um equipamento de teste de placas de circuitos impressas, PCB. As camas de agulhas suportam e guiam normalmente uma quantidade elevada de agulhas de teste, que provocam a sua deformação transversal. Se a flecha da placa for muito elevada, retira-se ao teste a precisão necessária para obter resultados fiáveis no teste elétrico dos componentes PCB. Podendo ser de diferentes materiais e de tamanhos variados a cama de agulhas não se deverá deformar transversalmente para além do limite funcional.

Como em qualquer projeto existem sempre especificações a realizar, sendo para a conceção da ferramenta é necessária a utilização de uma estrutura pré-existente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, a utilização de um sistema DIC, *digital image correlation*, e uma ferramenta operada manualmente a projetar.

Tendo em conta as especificações e o objetivo principal, da avaliação da deformação, é necessário idealizar a ferramenta, tendo em consideração outros pontos, como o preço, a universalidade da ferramenta, entre outros.

Na idealização da ferramenta deve-se ter em conta as dimensões a utilizar e o género de componente a aplicar. Esta ferramenta deve ser verificada quanto aos vários esforços nela aplicada.

A construção da ferramenta será efetuada após a realização do projeto, a partir dos variados desenhos técnicos, realizados em função de uma orçamentação prevista e considerações de montagem.

1.1 Objetivos

O objetivo deste projeto é a criação e construção de uma ferramenta, que utilize o sistema DIC na obtenção de dados e permita testar as camas de agulhas.

Esta ferramenta é destinada a avaliação da deformação na superfície de placas, mas também deve ser possível a sua adaptação a outros componentes e geometrias de forma a conceder-lhe uma certa universalidade.

Para a sua construção realizam-se os vários desenhos técnicos para a produção dos seus componentes.

1.2 Empresa Controlar

A Controlar é uma empresa fundada em 1995 operando numa rede global, possuindo unidades de produção e empresas em vários países, como é o caso de Portugal, mais especificamente em Alfena, Porto. Trata-se de uma empresa referenciada nas áreas da automação industrial e de sistemas de teste, desenvolvendo hardware/software, testes funcionais e de qualidade para dispositivos eletrónicos e robótica, e desenvolvimento e integração de sistemas.

O tema em estudo neste trabalho enquadra-se num projeto entre esta empresa, a Universidade do Minho e o INL para o desenvolvimento de soluções tecnológicas que se enquadram com sistema de ICT.

1.3 Motivação

Este projeto permite a obtenção de uma ferramenta específica com uma capacidade de aplicação de carga, e com um sistema de obtenção de dados de deformação, deslocamento, entre outros permitindo efetuar uma nova gama de ensaios, o que permite melhorar o laboratório de Ensaios de Materiais da Universidade do Minho. Além que no futuro, se possa adicionar novas funcionalidades à ferramenta, como por exemplo para ensaios com vibração, com potencial de expansibilidade.

Esta ferramenta também é interessante para aplicações industriais, como é o caso da empresa Controlar, porque os componentes por eles utilizados, como o caso da placa de circuitos elétricos ou cama de agulhas, são de difícil adaptação às máquinas de ensaios convencionais.

Este projeto é uma prova aos vários conhecimentos obtidos durante o curso, uma vez que na realização do projeto tem-se de aplicar as várias matérias lecionadas ao longo da aprendizagem, sendo necessário, por exemplo, conhecimentos de modelação, materiais, desenho técnico e mecânica dos materiais. Além disto, permitir adquirir novas competências como um pensamento crítico às diferentes ideias pensadas, a desenvolver a identificação de pontos negativos, o contacto com empresas e verificar a exigência necessária para produzir uma peça.

1.4 Estrutura da Dissertação

No capítulo inicial, encontra-se algumas considerações para contextualizar o leitor ao trabalho realizado nesta dissertação. Foram também referidas as razões da motivação deste trabalho e os seus objetivos.

No segundo capítulo é apresentado o estado de arte. É realizada uma pesquisa sobre o tema, aprofundando-se acerca das placas PCB, verificando o *teste-in-circuit*, onde se explora o que acontece nestes, mais especificamente na cama de agulhas. De seguida averigua-se a normalização recomendada para a ferramenta,

O terceiro capítulo contém os fundamentos teóricos utilizados para o dimensionamento da ferramenta. Este encontra-se dividido em duas partes, a teoria, formulas e elementos de apoios utilizados nos cálculos teóricos e a as considerações necessárias para o cálculo numérico.

No quarto capítulo encontra-se o pré-projecto onde se podem observar as especificações da ferramenta assim como fatores a ter em conta para a sua conceção. Neste capítulo encontra-se a idealização da ferramenta apresentando-se às diferentes opções criadas para cada subsistema e a justificação da seleção.

O quinto capítulo encontra-se, detalhadamente, a definição da ferramenta, apresentando-se os elementos a utilizar, dimensões, entre outros. De seguida apresentam-se os cálculos realizados, tanto números como analíticos, que validam as escolhas realizadas anteriormente. Também são apresentados os diversos desenhos técnicos desde os diversos componentes a fabricar até ao desenho de conjunto. Ainda neste capítulo, encontra-se realizado um estudo numérico de uma cama de agulhas, este estudo permite obter uma deformação teórica que servirá como comparação com os resultados a obter pela ferramenta.

O sexto, e último capítulo, são tecidas algumas conclusões que podem ser retiradas neste projeto e sobre o cumprimento das metas estabelecidas inicialmente. Adicionalmente são realizadas algumas sugestões futuras sobre trabalhos futuros, para a continuação do desenvolvimento da ferramenta.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

Neste capítulo encontra-se a pesquisa de informação necessária para a realização do projeto, conhecendo-se as placas de circuito interno, a normalização a aplicar segundo a diretiva máquina e um estudo sobre componentes para obter força e deslocamento.

2.1 Placa PCB

A tecnologia eletrônica atual utiliza placas de circuito impresso (PCI (PCB)), Figura 1, para montar componentes, de modo a criar circuitos eletrônicos. Com importância crescente, estas placas encontram-se em melhoria sucessivas tanto por parte da placa, como nos componentes a montar, mas também na maneira de produzir.



Figura 1 – Exemplificação de uma placa de circuito impresso

Como referido, este componente encontra-se desde a sua criação a ser desenvolvido, com o intuito da obtenção de progressos tecnológicos. Inicialmente esta placa de circuitos eletrónicos era realizada através de camadas de material condutor, sendo estas separadas por um material não condutor, o dielétrico, este não executa apenas uma separação física das camadas condutoras como fornece o suporte para as ligações e os seus componentes.

Com o avanço tecnológico, à medida que a complexidade dos circuitos aumentava foi necessário implementar um novo processo de fabrico, obtendo-se os PCI através de multicamadas. Este processo consiste em três ou mais camadas de cobre de dupla face no substrato isolante, sendo realizado por vários núcleos internos e várias folhas de cobre. A escolha do número de núcleos é dependente da aplicação e da escolha do projetista, porém a escolha do material desta secção é o ponto de partida do projeto de PCB. Entre os vários núcleos existem vários patamares, Figura 2, sendo estes realizados

através de folhas de cobre, a união destes componentes ocorre com auxílio de uma cola específica, a Prepreg. [1] [2]

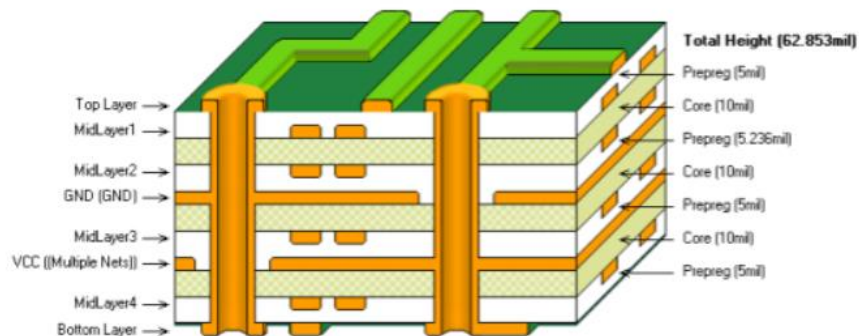


Figura 2 – Esquema de uma placa PCB obtida através de multicamada. [2]

Na utilização deste processo de produção é necessário estabelecer vias de comunicação entre os vários núcleos internos existentes e com a camada superior e inferior, sendo o acesso destas vias restringidas por vários circuitos. Esta conexão acaba por ser efetuada por diversos furos de dimensões reduzidas ou cavidades designando-se de microvias. [3]

Existem variados géneros de microvias, sendo especificadas tendo em conta o comprimento e a localização, caso atravessem totalmente a placa designam-se de *Through* Microvias, ou caso contrário, não transponham a totalidade da placa designam-se de *Blind* Microvias. Se a ligação vertical for realizada entre duas camadas interiores, ou seja, sem ligação ao exterior, então denominam-se de *Buried* vias. Quanto mais complexo e mais denso for o PCB maior os números de conexões verticais existentes. [3]

Nas placas PCB, em geral, a maioria das conexões é considerada horizontal, sendo as verticais menos utilizadas. Na Figura 3 podem-se observar as várias ligações existentes numa placa PCI. [3]

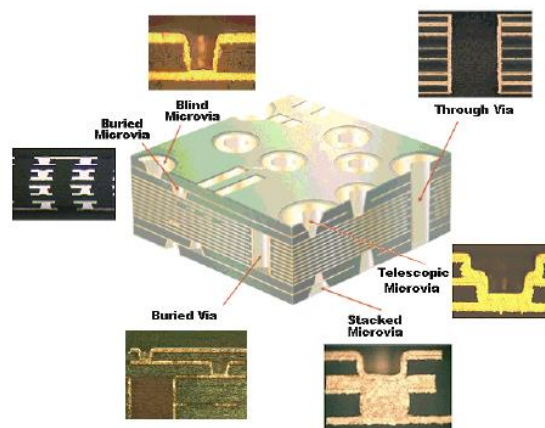


Figura 3 – Tipos de conexões existentes numa placa PCB. [3]

Após a produção das placas é necessário verificar a inexistência de defeitos e a sua funcionalidade. Através de dados obtidos de linhas de produção, sabe-se que uma placa PCB pode apresentar uma diversidade de erros, como por exemplo, apresentar uma descontinuidade da solda (*Opens solders*), falta de componentes (*Missing Part*), componente interno não funcional (*Dead IC*), problemas de fixação (*Fixture*), solda curta (*Short solder*) e defeito analógico (*Faulty Analog*).

No Gráfico 1 é possível observar a probabilidade de o defeito ocorrer na placa. [3]

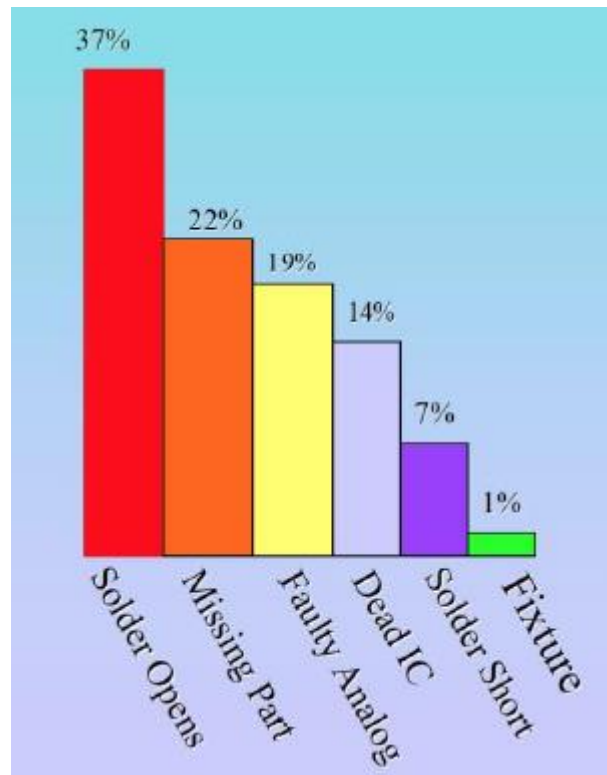


Gráfico 1 – Percentagem de defeitos que podem ocorrer na produção de PCB. [3]

Por observação do gráfico, retira-se que os erros mais comuns são existência de uma descontinuidade da solda, correspondente a 37% dos casos, e a falta de componentes, cerca de 22%, em contrapartida, problema de fixação é o defeito menos comum, possuindo uma percentagem de 1%. [3]

De forma a evitar que uma placa seja comercializada com algum defeito é necessário realizar uma inspeção normalmente localizada. Esta inspeção pode ocorrer de variadas formas, como por exemplo, uma inspeção manual visual (MVI), uma inspeção ótica automática (AOI), inspeção por Raios-X, o *test in circuit* (TIC) e o teste de circuito funcional (FTC). [4]

As três primeiras técnicas enumeradas especificam-se como testes visuais, verificando apenas erros físicos, enquanto os restantes métodos, ICT e FTC, são testes mais seguros e os mais usuais na indústria.

A inspeção manual visual, MVI, é uma técnica comparativa sem contacto, onde um operador compara visualmente a placa PBC produzida com uma imagem. Caso exista correspondência a placa encontra-se verificada e pode seguir para venda. Esta técnica caiu em desuso devido ao aumento da complexidade da placa, ou seja, utilizam-se componentes mais pequenos o que torna impossível a identificação do erro através do olho humano. A inspeção ótica automática, AOI, surge de modo a evitar as limitações do método MVI. Esta técnica utiliza câmaras de alta precisão de modo a detetar eventuais erros. É possível identificar com esta técnica a falta de um componente, defeitos na área do componente e na solda. Finalizando as técnicas visuais, a inspeção raio X segue a mesma metodologia que a inspeção ótica. Trata-se de um sistema raio x que através do espectro consegue identificar anomalias na placa PCB, como a falta de um componente e erros associados a solda. Esta é bastante cara em comparação com o teste AOI, cerca do triplo, e trata-se de um processo lento. [4]

Na Figura 4 encontra-se uma exemplificação destes métodos.

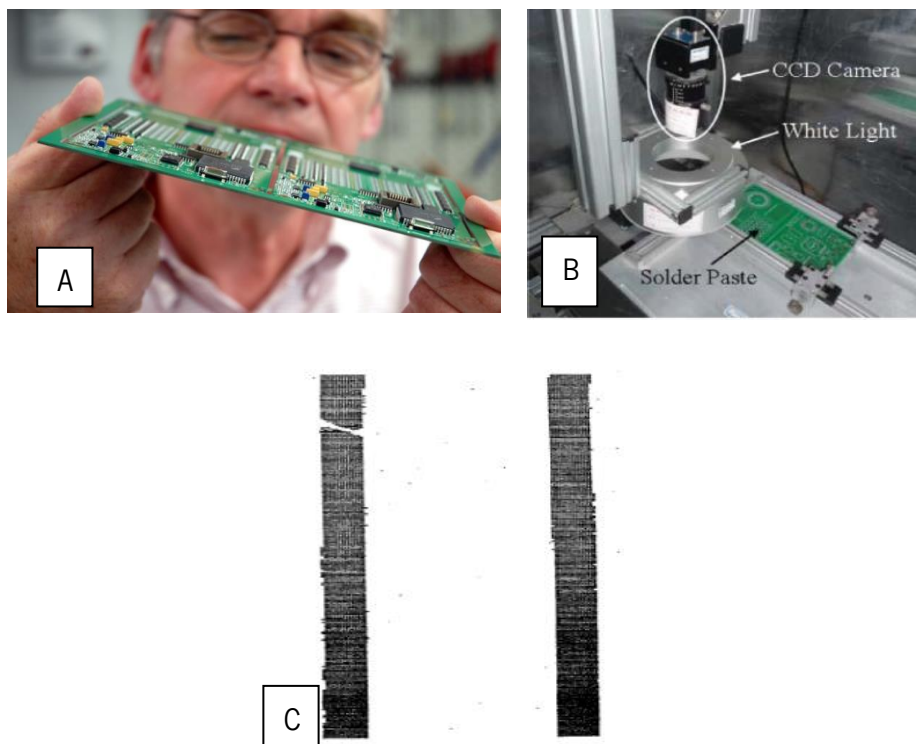


Figura 4 –Exemplificação dos métodos de inspeção visuais. A) Inspeção Manual Visual. B) Inspeção Manual Ótica. C) Inspeção Raio X. [4]

O teste de circuito funcional, FTC, testa as funcionalidades do sistema ou do software, garantido que as funções do circuito estão dentro das especificações. Este método funciona através de um conector de borda ou uma sonda de teste. Com a aplicação do FTC podem-se testar vários parâmetros de entrada

e comparar os resultados de saída com os valores esperados, podendo-se assim detetar oscilações de frequência incorretas, distorções de sinais e problemas de comunicação. [4]

O *test-in-circuit*, TIC, realiza um teste de avaliação eficiente da placa de circuito realizando uma verificação dos componentes do PCB através de uma sonda elétrica, sendo o contacto da sonda no PCB garantido pela aplicação de uma força externa, existindo diversas formas de a aplicar abrangido arranjos mecânicos, pneumáticos e sistema de vácuo.

Esta sonda mede a resistência, a capacidade, aberturas, nível de voltagens, entre outros parâmetros. Os valores obtidos pelas sondas são, posteriormente, comparados com valores de referência. Esta inspeção pode ser realizada através de duas configurações, com uma cama de agulhas ou por voo configurado. [5]

O método de voo configurado pode demorar bastante tempo, mas é bastante eficiente a detetar problemas de solda, falta de componentes e falhas de ligação. [4]

O sistema cama de agulhas permite medir em simultâneo todos os pontos solicitados no PCB. Tornando o procedimento de inspeção muito mais rápido.

2.1.1 TIC - Test in circuit

Neste subcapítulo aborda-se em detalhe o *test-in-circuit*, que recorre à cama de agulhas, componente que será testado pela ferramenta a produzir neste projeto.

Como visto anteriormente, neste teste várias sondas são aplicadas a uma placa PCB, existindo uma variedade enorme de sondas que podem ser utilizadas no teste, como por exemplo sondas de afinação fina, sondas de interface, sondas pneumáticas, entre outras. Cada uma possui a sua característica, alterando entre si o formato da agulha. Porém a sua metodologia é independente da função, sendo formadas por sistemas de mola e por um sistema de transmissão de dados para o testador. Na Figura 5 pode-se observar um esquema destas sondas de teste. [9]

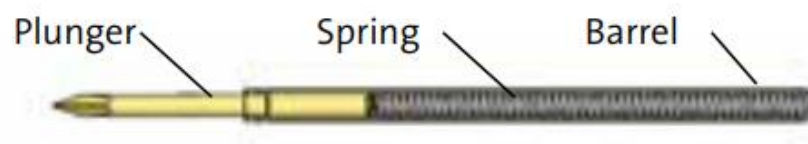


Figura 5 – Esquema de uma sonda utilizada no teste TIC, constituída por uma agulha (*Plunger*), a mola (*Spring*) e o cano (*barrel*). [6]

Na Figura 6 podem-se observar diferentes tipos de sondas disponíveis no mundo.

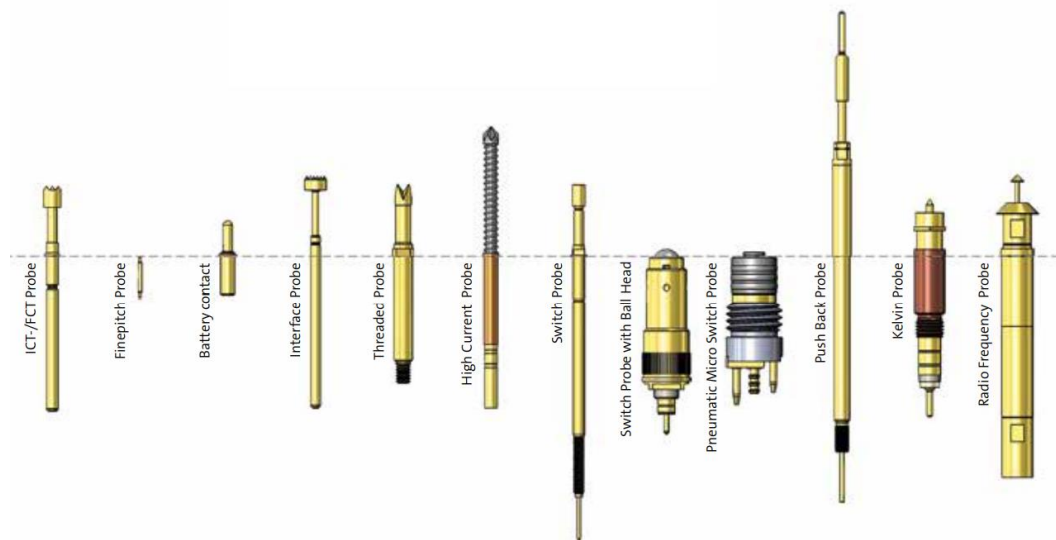


Figura 6 – Tipos de sondas utilizados para a testagem pelo método TIC. [6]

A força que a sonda exerce na placa durante o teste é proveniente da mola que define a força que será realizada no ensaio. A força da mola é dependente da aplicação final da sonda, porém deve garantir que a qualidade do contacto com o sistema elétrico e a penetração da sonda em camadas oxidadas, do mesmo modo que não deve provar danos na superfície da placa. O fabricante é quem define a força que a mola irá realizar, tendo em conta os fatores acima referidos e a ponta da sonda, que irá influenciar a penetração na superfície, sendo que este valor apresentará sempre uma tolerância de $\pm 20\%$, devido aos processos de fabricação e variações dos materiais. O valor definido pelo fabricante é considerado um valor nominal para um determinado curso, pois o valor da força aumenta proporcionalmente com o curso de trabalho. [6] No Gráfico 2 apresenta-se uma curva típica da variação da força da mola.

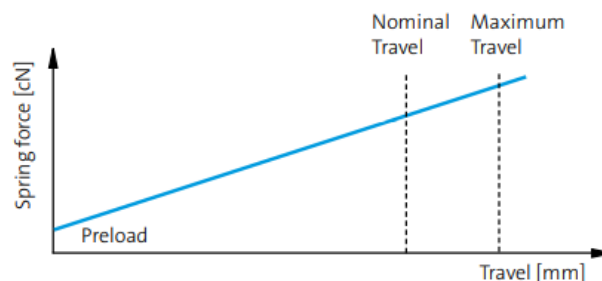


Gráfico 2 – Variação da força da mola com o curso de trabalho.[6]

Na observação do gráfico verifica-se que a força não inicia no zero, existindo uma pré-carga na mola que garante a existência de uma carga inicial, sendo esta gerada pela compressão da mola durante

a montagem na camisa. É recomendado que o curso não seja excedido pois irá influenciar, consideravelmente, o tempo de vida da sonda.

Pela análise do catálogo [6], averiguou-se qual era a força crítica dentre todas as agulhas presentes no documento, tendo-se confirmado que a força máxima presente era de 4N.[6] Este valor pode ser confirmado pelo seguinte gráfico, onde se verifica que para o curso de trabalho a força máxima de uma agulha atinge os 4N, Gráfico 3.

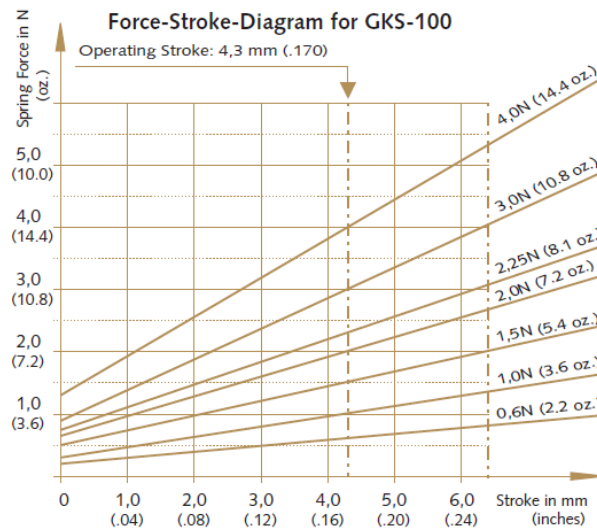


Gráfico 3 – Diagrama força-curso de vários tipos de agulhas. [7]

Na realização do *test-in-circuit* as sondas entram em contacto com a placa a testar, porém para tal acontecer é necessário a existência de um suporte e de um guiamento para estas sondas, a este componente designa-se cama de agulhas.

A cama de agulhas é um componente fundamental para a realização do *test-in-circuit*, onde se encontram aplicadas as sondas de teste no seu devido local, sendo este pré-determinado pela placa PCB em teste, portanto, é requerido à cama de agulhas precisão para garantir que as sondas se conectam nos nós da PCB. Posto isto, a cama de agulhas precisa de ser rígida de modo que na aplicação de força ela não flita, visto que, caso a cama de agulhas não esteja plana deixa de possuir o alinhamento necessário para as sondas realizarem o teste. A cama de agulhas apenas estará sujeita às forças exercidas pelas sondas. Na Figura 7 encontra-se uma exemplificação de uma cama de agulhas onde as sondas se encontram montadas.

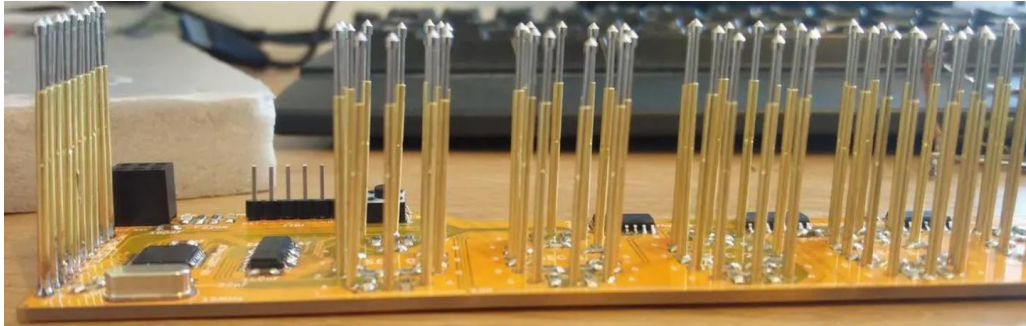


Figura 7 – Exemplificação de uma cama de agulhas. [8]

2.2 Normalização

Para a construção de uma ferramenta a normalização recomendada é a diretiva máquina, diretiva 2006/42/CE relativa às máquinas ([10]), que deve ser aplicada a equipamentos intermutáveis, componentes de segurança, acessórios de elevação, entre outros. Apesar de a conceção de vários componentes exigirem a aprovação desta diretiva exigem certas exceções, onde segundo o artigo 1, ponto 2, alínea H, “Estão excluídos do âmbito de aplicação da presente diretiva: As máquinas especialmente concebidas e construídas para efeitos de investigação para utilização temporária em laboratórios”, ([10]), pelo que segundo esta alínea não seria necessário a aplicação desta diretiva.

Apesar de existir uma exceção para o projeto, irá se conhecer como se deve aplicar a diretiva, de modo à ferramenta num futuro próximo ser aplicada noutras aplicações.

Seguindo o processo padrão, inicialmente verifica-se o Anexo 4 da diretiva máquina de modo a constar se a ferramenta de avaliação de deformação, que se considera equivalente a uma prensa, se encontra relacionada neste anexo. Por observação deste anexo confirma-se que a ferramenta em projeto não se encontra referida, por tal razão aplica-se o Anexo 8 desta diretiva ([10]. Este anexo 8 encaminha para um controle interno da produção, sendo necessário realizar um processo técnico,

Este processo deve ser constituído por uma descrição geral da máquina, pelo desenho de conjunto, bem como descrições e explicações pertinentes necessárias a compreensão do funcionamento da máquina.[10]

Deve possuir documentação relativa à avaliação dos riscos, que deverá incluir uma lista de requisitos essenciais da saúde e segurança aplicados na máquina e uma descrição da medida de proteção implementadas de forma a reduzir ou a eliminar os perigos, bem como uma indicação dos riscos.

Tem de possuir uma lista de todas as normas ou especificações técnicas que tenham sido utilizadas, todos os relatórios técnicos que mostrem resultados dos ensaios efetuados, um exemplar do manual de instruções e instruções de montagem. [10]

Se for o caso este processo técnico deve possuir toda a documentação CE. [10]

2.3 Obtenção de dados

Este subcapítulo do estado de arte tem intuito de fornecer auxílio ao capítulo 3.2, onde se efetua a idealização do componente. Neste espaço encontra-se uma abordagem à cama de agulhas e a outros componentes que permitem a obtenção de dados por parte da ferramenta, como é o caso da deformação, força e deslocamento.

2.3.1 Cama de agulhas

A cama de agulhas (agulhas ou sondas de contacto ou *test probes*) é um dos principais componentes do adaptador de teste, a Figura 8 apresenta uma descrição geral de um exemplo de um adaptador de teste.

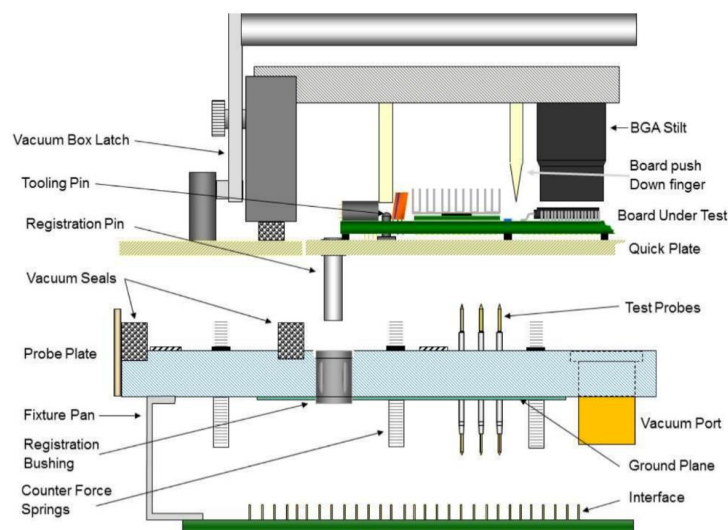


Figura 8 – Descrição geral de um adaptador de teste [9]

O componente “cama de agulhas” é customizado para um produto específico (PCB) e tem de apresentar robustez (rigidez) suficiente para assegurar o rigor e repetibilidade do posicionamento de cada agulha. A cama de agulhas é assim uma placa aproximadamente retangular, de um material isolante, por causa da necessidade de assegurar que cada agulha nela implantada é independente eletricamente da que é colocada na sua vizinhança. Na cama de agulhas são executados centenas ou até milhares de furos para alojamento dessas agulhas. Estas placas apresentam assim crescente dificuldade na sua

fabricação, porque os PCB com a tendência da sua redução de tamanho e aumento de densidade de componentes, têm pontos de teste cada vez mais próximos entre si e menor diâmetro.

O processo de teste do PCB implica que este seja pressionado contra a cama de agulhas para que seja estabelecido o contacto elétrico entre o PCB (pontos de teste) com as agulhas. Deste modo, as agulhas de teste exercem forças sobre o PCB, que se repercutem na cama de agulhas, levando à sua flexão.

O diagrama da Figura 9 mostra um estudo da variabilidade da posição de contacto de uma agulha sobre um ponto de teste relaticante à posição ideal (ou seja, o centro do furo de montagem).

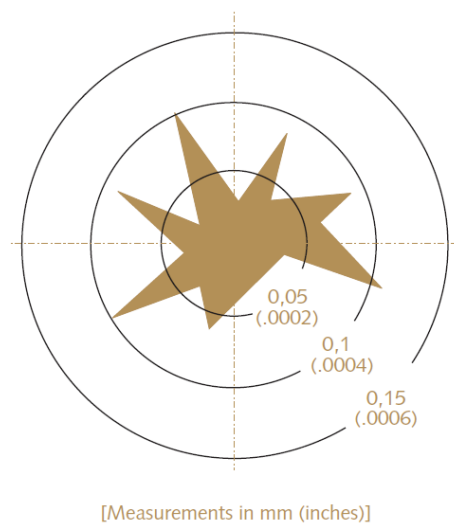


Figura 9 – Área representado a posição de sucessivos contactos da mesma agulha sobre o alvo. [9]

A deformação de flexão da cama de agulhas é assim crítica e precisa de ser avaliada previamente à sua utilização.

2.3.2 Digital Image Correlation

Existem diversas alternativas que permitem a medição de deformação num objeto sólido, incluindo medidores de deformação, extensómetros e o *digital image correlation* (DIC). Enquanto os medidores de deformação e os extensómetros apenas permitem uma medição da deformação/deslocamento, o DIC consegue fornecer diversas medições, podendo capturar deformações locais, fendas, concentração de tensões, deformações plásticas, entre outros.

O DIC é uma tecnologia ótica, sem necessidade de contacto, que realiza a medição de deformações e deslocamentos de uma forma direta. A tecnologia DIC parte da obtenção de várias imagens durante o ensaio. Através das imagens obtidas é realizado por um software um rastreamento da variação do

movimento do pixel que irá permitir a obtenção do movimento dos pontos de uma superfície, entre outros. [12]

Na Figura 10 pode-se observar este rastreamento.

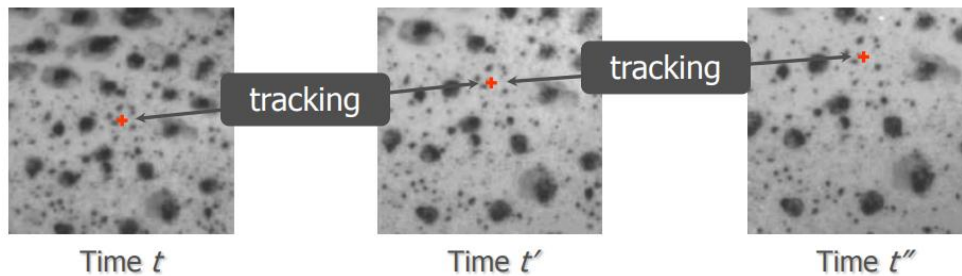


Figura 10 – Rastreamento da movimentação do pixel que irá permitir a obtenção do deslocamento.[13]

Existem diversos algoritmos DIC, sendo caracterizados pela dimensão, podendo ser 2D ou 3D. Uma diferença entre o DIC 2D e o DIC 3D verifica-se pelo número de câmaras, sendo que o DIC 2D apenas utiliza uma e o DIC 3D duas ou mais. Posto isto, o DIC 2D assume que as deformações da amostra apenas acontecem no plano perpendicular à câmara, não detetando deformações que ocorram fora deste, podendo ainda acontecer um erro devido a distorções da imagem. Já o DIC 3D consegue realizar leituras fora do plano paralelo da câmara, através de triangulações, e possui um método para calibração da lente, removendo assim as distorções de imagens.

Outra diferença entre estes trata-se na escala de comprimentos de imagem, enquanto no DIC 3D a escala de comprimentos é conectada, com precisão, à escala de comprimento físico do sistema de imagem, no DIC 2D a escala de comprimento é introduzida de uma forma simples e menos precisa entre o tamanho do pixel das imagens para o tamanho físico das imagens. [14]

Tanto o 2D como o 3D não conseguem medir deslocamentos dentro do volume do um material, para tal é necessário utilizar o DVC, correlação do volume digital, esta extensão do DIC transforma pixels para voxels, que são de uma forma simplificada pixéis tridimensionais. [14] Na Figura 11 encontra-se uma desmonstração destes três tipos DIC referidos.

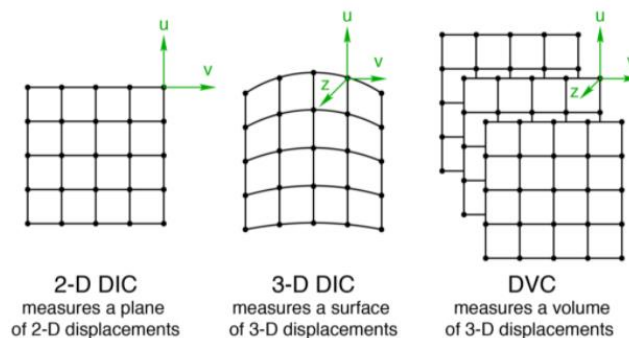


Figura 11 – Tipos de DIC tendo em conta as dimensões. [14]

Para a obtenção de imagem aplica-se um padrão no objeto a testar, uma vez que a superfície a analisar normalmente não se encontra nas condições exigidas por este método. Este padrão trata-se de um portador de informação da deformação, tendo de ser não repetitivo, isotrópico e de alto contraste. Na Figura 12 apresentam-se vários exemplos de padrões, podendo observar padrões que não cumprem os requisitos e um padrão validado. [13] [14]



Figura 12 – Exemplificação de requisitos para o padrão a aplicar no objeto em teste. [13]

O padrão aplicado deve cobrir a superfície da amostra na área de interesse além de mover-se e deformar-se com a amostra, contudo não pode exercer nenhuma tensão mecânica significativa. As manchas a aplicar podem ser deformáveis, sendo este caso o ideal, porém também podem ser um recurso rígido, movendo-se com a deformação da amostra e deformando de forma diferente, sendo que o seu uso pode adicionar erros ao cálculo. De forma a reduzir o erro, o padrão possui um bom contraste em tons de cinza, sendo as bordas das manchas suavizadas, em vez de nítidas e distintas do fundo. [14]

O padrão deve ser estável em relação ao meio ambiente, sendo a sua cor independente da temperatura e da luz, sendo que densidade das manchas deve ser 50% do padrão, Figura 13. [14]

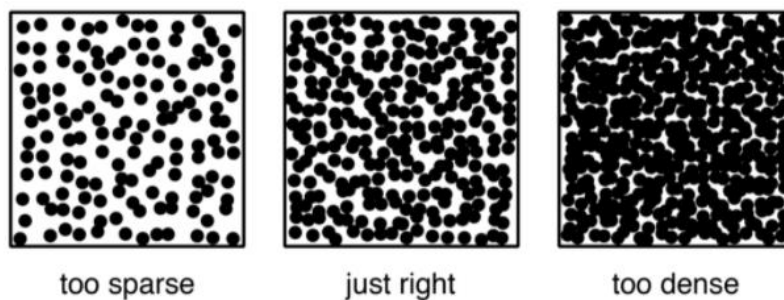


Figura 13 – Densidade de manchas do padrão. [14]

Existem diversas opções para obter o padrão, podendo ser através de pintura, tinturas e corantes, partículas de pó, gravura a laser, nanopartículas e padrões litografados. [14]

- **Pintura:** Os padrões de manchas pintadas são o mais usual, sendo a tinta compatível com a maioria dos materiais de engenharia e permitindo a realização rápida, com qualidade, de

padrões através de tinta spray. É recomendado o uso de tintas preto e branco, uma vez que outras cores possuem menos contraste inerente, utilizando fundo branco e manchas pretas.

- **Tintas e corantes:** Para materiais hiperplásticos, como polímeros e biomateriais, a tinta não é o suficiente para acompanhar a amostra. A adição de corantes à tinta permite que premiar o material melhorando o rastreamento.
- **Partículas de pó:** Para materiais húmidos ou pegajosos as partículas de pó conseguem uma melhor aderência que as tintas. Estas partículas também são utilizadas para obter menores manchas.
- **Gravura a laser:** Em certos casos, a superfície da amostra pode ser gravada a laser, este método permite que os padrões não se alterem em testes a elevadas temperaturas.
- **Nanopartículas:** Na utilização do processo DIC em microscopia eletrónica é imperativo a utilização de manchas muito reduzidas, na escala dos nanómetros, para tal, utiliza-se as nanopartículas.
- **Padrões litografados:** A litografia é um outro processo que permite atingir um tamanho pequeno para o padrão, porém com um maior controlo que a maioria dos outros métodos.

Numa análise DIC 2D, Figura 14, uma imagem com um padrão definido é rastreada (a); sendo uma selecionado um subconjunto (b); o centro do subconjunto, ponto vermelho, é o ponto de referência a partir do qual se irá realizar o cálculo do deslocamento (c); após o ensaio onde ocorreu a deformação é realizada uma combinação da imagem após a deformação com a imagem referência (d); após a combinação é calculado o deslocamento relativo ao centro do subconjunto entre a referência e as imagens deformadas, sendo este exemplificado pela diferença entre o ponto azul e vermelho (e). [14]

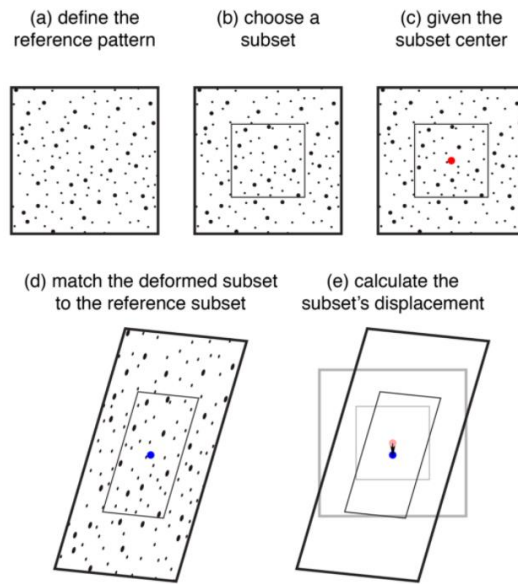


Figura 14 – Análise do método DIC para um subconjunto. [14]

O método anteriormente especificado, Figura 14, aplica-se apenas num subconjunto, sendo que no ensaio acontece este procedimento para vários subconjuntos. Obtendo vários pontos de referência estando cada um associado a um vetor de deslocamento, Figura 15. [14]

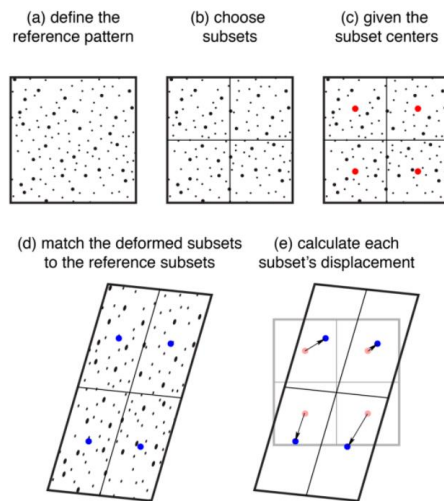


Figura 15 – Análise do método DIC para o caso de vários subconjuntos. [14]

Em termos analíticos, o DIC aproveita especificamente algoritmos de correspondência para resolver suposições iniciais com estimativa de pixel inteiro, de seguida, emprega sistemas de otimização iterativos não-lineares e interpolações certas para obter a precisão do subpixel. Analisando um subconjunto de ponto central P e rastreando-o nas restantes imagens aplicando as seguintes equações de primeira ordem que representam a transformação linear. [15]

$$x^* = u + \frac{\delta u}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta u}{\delta y} \Delta y \quad (1)$$

$$y^* = v + \frac{\delta v}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta v}{\delta y} \Delta y \quad (2)$$

Onde x^* e y^* representam os deslocamentos finais do ponto P ao longo do eixo axial x e y, respetivamente, u e v são componentes de deslocamento do subconjunto de centro P nas direções x e y. Δx e Δy são a distância inicial entre um ponto arbitrário e conhecido do subconjunto, Q, e do ponto central P. ([15] (Zhao, J., Sang, Y., & Duan, F., 2019)

O componente de gradiente do deslocamento do subconjunto de referência trata-se de $(\frac{\delta u}{\delta x}, \frac{\delta u}{\delta y}, \frac{\delta v}{\delta x}, \frac{\delta v}{\delta y})$, por sua vez a forma básica do deslocamento de P é $(u, v, \frac{\delta u}{\delta x}, \frac{\delta u}{\delta y}, \frac{\delta v}{\delta x}, \frac{\delta v}{\delta y})$. A Figura 16 mostra as seis formas diferentes de deslocamento linear para um subconjunto. [15]

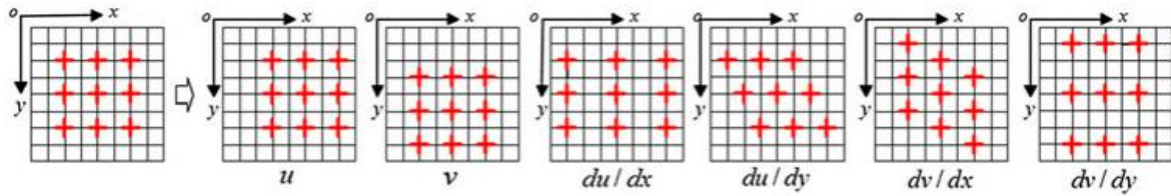


Figura 16 - Formas diferentes de deslocamento linear para um subconjunto. [15]

De forma a avaliar a semelhança de intensidade entre o subconjunto de referência e de destino, aplica-se o método dos critérios de correlação justificados, o critério de diferença de soma de quadrados normalizados de média zero (ZNSSD) e o critério de correlação cruzada normalizado de média zero (ZNCC). Ambos os critérios são insensíveis a mudanças de brilho e de contraste da imagem. [15]

$$C_{ZNSSD}(p) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x, y) - f_m}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2}} - \frac{g(x^*, y^*) - g_m}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x, y) - g_m]^2}} \right]^2 \quad (3)$$

$$C_{ZNCC}(p) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{[f(x, y) - f_m] \times [g(x^*, y^*) - g_m]}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2} \times \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x^*, y^*) - g_m]^2}} \right], \quad (4)$$

Conseqüentemente, verifica-se que existem dois tamanhos importantes para o processo, o tamanho do subconjunto e o tamanho da distância entre os centros dos subconjuntos, sendo estes medidos em pixels. [14]

O fator principal que rege o tamanho do subconjunto é que este deve possuir o tamanho necessário de modo que contenha três manchas no seu interior. Contudo fatores secundários devem ser levados em consideração, o tempo de computação, subconjuntos maiores exigem mais tempo de cálculo, e a realizar uma escolha entre a melhor correspondência de padrão para subconjuntos maiores, conseguindo mais exclusividade, e a melhor resolução espacial para padrões menores, obtendo menos suavização e uma filtragem espacial dos dados da imagem. [14]

2.3.3 Célula de Carga

Como será mais tarde apresentado, no subcapítulo 3.2, é necessário a implementação de um dispositivo, célula de carga, para obter a força aplicada no ensaio da ferramenta, sendo que este subcapítulo serve para demonstrar quais os diferentes tipos existentes no mercado e os seus princípios de funcionamento.

O funcionamento de uma célula de carga é através de *strain gauge*, extensômetro, que consiste em condutores elétricos fixos a um filme, sendo normalmente realizados em aço ou alumínio. Estes quando se encontram carregados deformam levemente, dentro da escala do micrómetro, regressando à forma original quando a carga é retirada, trabalhando assim no domínio elástico. [16]

Na ocorrência da aplicação de carga, o filme é “puxado” tornando os seus condutores mais longos, quando a carga é retirada ocorre uma contração, encurtando os condutores até as formas originais. Esta alteração de tamanho provoca uma oscilação da resistência dos condutores, que por sua vez, determinam a micro deformação, visto que a resistência aumenta com a deformação e diminui com a contração. Através da micro deformação a parte eletrônica, o amplificador, consegue determinar o peso. [16]

Existem diversos tipos de células de carga disponíveis no mercado, Figura 17, dividindo-se pelo tipo de carregamento, havendo células de compressão, de tipo beam, single point, de tração e de tração/compressão. Como seria de esperar as células de compressão são aplicadas quando existe um esforço de compressão e as de tração quando ocorre um esforço de tração, sendo que as células tração/compressão funcionam com ambos os esforços. As células single-point são aplicadas sob uma plataforma que se encontra carregada na parte superior, já as células do tipo beam são usadas quando

se possui várias células sob uma estrutura em aço que se encontra a ser carregada na parte superior. [16]

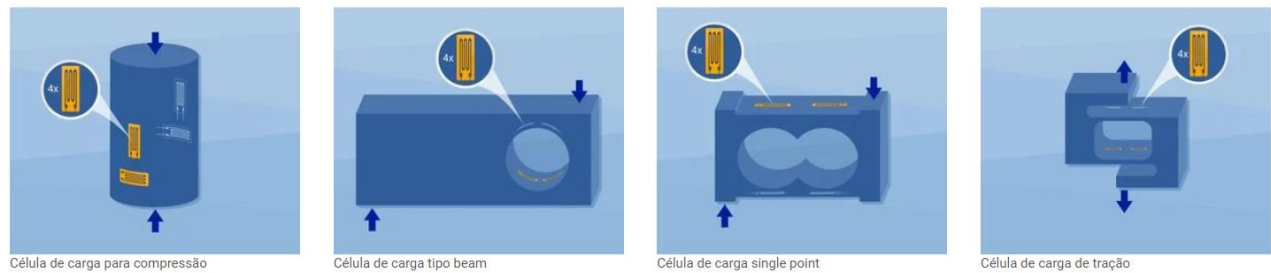


Figura 17 – Diversos tipos de células de carga existentes. [16]

Para a escolha da célula de carga, além de se verificar tipo de carregamento, é necessário ter em atenção outros fatores, como a classe de carga e a precisão. A classe de carga é o intervalo de valores de força possíveis de leitura, ou seja, existe um conjunto de valores limitados por um valor superior e inferior que a célula consegue ler.

A precisão desempenha um papel fundamental, visto que uma célula pouco precisa adiciona um erro maior na medição. Existem diversas classes de precisão e segundo a OIML R 60, organização internacional de metrologia legal, da classe D1 até a C2 compreendem-se às classe mais grosseiras, usadas usualmente para a medição de água, areia, entre outros, da classe C3 até a C6 possui uma precisão intermédia, atingindo valores na escala do micro, por fim a classe C6, que corresponde às células de carga com maior precisão. [16]

2.3.4 Sensor Linear

Para finalizar o estudo dos componentes necessários à obtenção de dados segue-se uma análise aos sensores lineares, essenciais para a obtenção do deslocamento. Dentro das várias possibilidades, equaciona-se para aplicar na ferramenta a régua linear, o potenciômetro e o sensor de precisão linear.

➤ **Régua Linear**

A régua linear trata-se de um componente bastante aplicado em várias máquinas ferramentas, sendo fácil de utilizar e obter resultados fiáveis.

A régua linear utiliza escalas lineares do tipo *digital reads outs*, DRO, que consegue captar o movimento e converter a informação obtida em um sinal digital, sendo este emitido pelo codificador. Estes géneros de escala podem ser em vidro de precisão, escala ótica, ou podem ser indutivas/magnéticas. Exemplos destas escalas podem ser observados na Figura 18. [17]



Figura 18 - À esquerda uma régua com escala magnética; À direita uma régua com escala ótica. [17]

As escalas óticas são normalmente aplicadas em situações onde a precisão é uma prioridade, sendo resistentes a mudanças de forma, densidade e tamanho. Este vidro é especialmente projetado para formar um padrão em um sensor fotoelétrico quando a luz, uniformemente espaçada, o interceta, posteriormente o sensor irá gerar sinais para o DRO. Este género de escala oferece uma boa proteção contra a sujidade, contudo são vulneráveis à contaminação. [17]

As escalas indutivas/magnéticas possuem uma secção transversal menor tornando-as uma excelente escolha em máquinas com limitação de espaço. Ao contrário das escalas de vidro, o funcionamento destas escalas é através de leituras de energia, detetando as diferenças de energia e convertendo-as em pulsos elétricos lidos pelo DRO. Este tipo de componente possui o comprimento ajustável, podendo ser cortado em qualquer comprimento, além disto, são resistentes a líquidos e sujidade. [17]

À medida que o cursor da régua se movimenta com o objeto consegue-se obter o deslocamento, enviando este valor em forma de sinal para um leitor próprio, Figura 19 , unidade de exibição para escala linear, que têm como objetivo enviar o sinal obtido para um aparelho eletrónico, como por exemplo um computador.



Figura 19 – Unidade de exibição de escala linear KA-200. [17]

O leitor pode transferir os dados da medição de duas formas, num modo disparo, onde os dados são emitidos por sinais de ondas provenientes de um sinal de toque ou comandos de um computador, e no modo intervalo, onde os dados de medição podem ser produzidos em intervalos específicos. [17]

➤ Potenciômetro

O potenciômetro é um instrumento de medição que por definição pode ser considerado uma resistência de três terminais que pode controlar a corrente elétrica. Estes divisores de tensão permitem a medição de um potencial elétrico ou tensão, uma vez que ao variar a resistência é possível medir a diferença de potencial entre uma tensão conhecida e uma desconhecida. [18]

Existem dois tipos de potenciômetros, o retilíneo e rotativos, sendo que para o projeto interesse recaí nos retilíneos. O potenciômetro retilíneo, Figura 20, trata-se de um tipo de sensor de posição destinado a realizar a medição de um deslocamento, numa direção linear, através da variação de resistência. Usualmente estes são acionados por uma haste que se encontra conectada ao objeto a medir e a um controle deslizante interno. [20]



Figura 20 – Potenciômetro retilíneo. [19]

O potenciômetro linear divide de forma proporcional uma tensão regulada que se encontra aplicada na faixa operacional e fornece uma saída de tensão proporcional, fator importante para a posição do deslizante interno. A resistência dentro do circuito altera-se tendo em conta a posição do carro, sendo esta proporcional às quedas de tensão. Como a resistência muda proporcionalmente no

caminho percorrido pelo contacto deslizante, a distância pode-se ser determinada pela mudança na tensão. [19]

➤ **Sensor de Precisão**

O sensor de precisão linear, desenvolvido pela *Cambridge IC*, é uma alternativa aos sensores lineares básicos, sendo constituído por vários componentes, um sensor linear em forma de régua, uma unidade central de rastreamento, CTU, um alvo E-core e um adaptador CTU. [21]

De forma simplificada, Gráfico 4, a unidade central de rastreamento é colocada no sensor linear e o alvo E-core colocado no objeto a medir, à medida que o objeto se movimenta a unidade central consegue rastrear o seu sinal e enviar para o adaptador que emite os dados para um software.

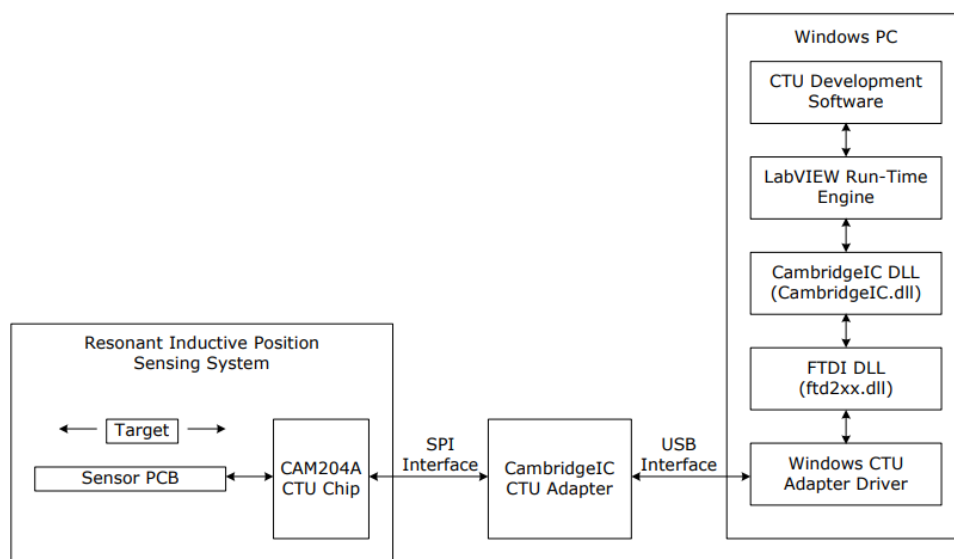


Gráfico 4 – Diagrama de blocos de funcionamento simplificado do sensor de precisão linear. [21]

Detalhadamente o método de funcionamento é possível graças à indução de ressonância. O sensor linear, Figura 21, é constituído através de cinco bobinas, a EX, a KCOSA, a KCO SB, a KSINA e a KSINB, possuindo um espaço dedicado a montagem da central de rastreamento, CTU, Figura 22.



Figura 21 – Sensor linear da Cambridge IC. [21]



Figura 22 – Chip - central de rastreamento da Cambridge IC. [21]

O CTU é responsável por gerar ciclos corrente alternada na bobina EX do sensor, sendo gerados a uma frequência específica que irá coincidir com a frequência de ressonância de um ressoador. Este ressoador encontra-se na estrutura do alvo E-core, Figura 23. [21]

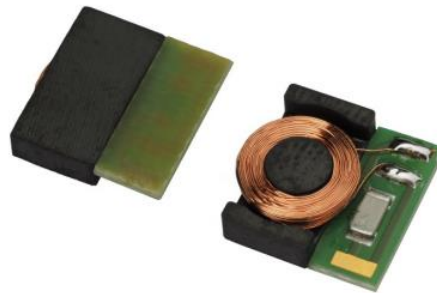


Figura 23 – Alvo E-core onde se observa o circuito ressonante interno. [21]

Quando a corrente de excitação é removida o ressoador continua a ressoar, sendo que o sinal se encontra a decair exponencialmente, conseqüentemente estes colocam as outras bobinas do sensor a gerar campos eletromagnéticos, EMFs. Enquanto tal acontece o CTU consegue rastrear a amplitude relativa que o sinal decadente possui em cada bobina. As amplitudes medidas são proporcionais aos fatores de acoplamento entre o ressoador e as 4 bobinas do sensor, a KCOSA, a KCOSB, a KSINA e a KSINB, sendo a KCOSA e KSINA consideradas bobinas de sensor finas e as restantes, KCOSB e KSINB, bobinas de sensor grossas. O fator de acoplamento varia conforme a posição, existindo doze períodos de repetição ao longo da faixa de medição, Gráfico 5. [21]

O chip CTU mede os fatores de acoplamento e executa o cálculo da tangente inversa para poder determinar a posição fina, uma medida de precisa da posição. A medição obtida através deste cálculo não é afetada por mudanças nos níveis de sinais absolutos, causadas por variações de tensão na fonte de alimentação, temperatura, entre outros. Apesar disto trata-se de um resultado ambíguo, tal acontece porque existem vários locais ao longo do sensor que possuem a mesma posição fina, gerados devido à natureza repetitiva do padrão do sensor.

De forma a resolver o problema da ambiguidade o CTU realiza também leituras das bobinas do sensor grosso, resultando na medição de posição grosseira. Estas também possuem um padrão sinusoidal, contudo com um período mais longo, o que resulta numa menor precisão.

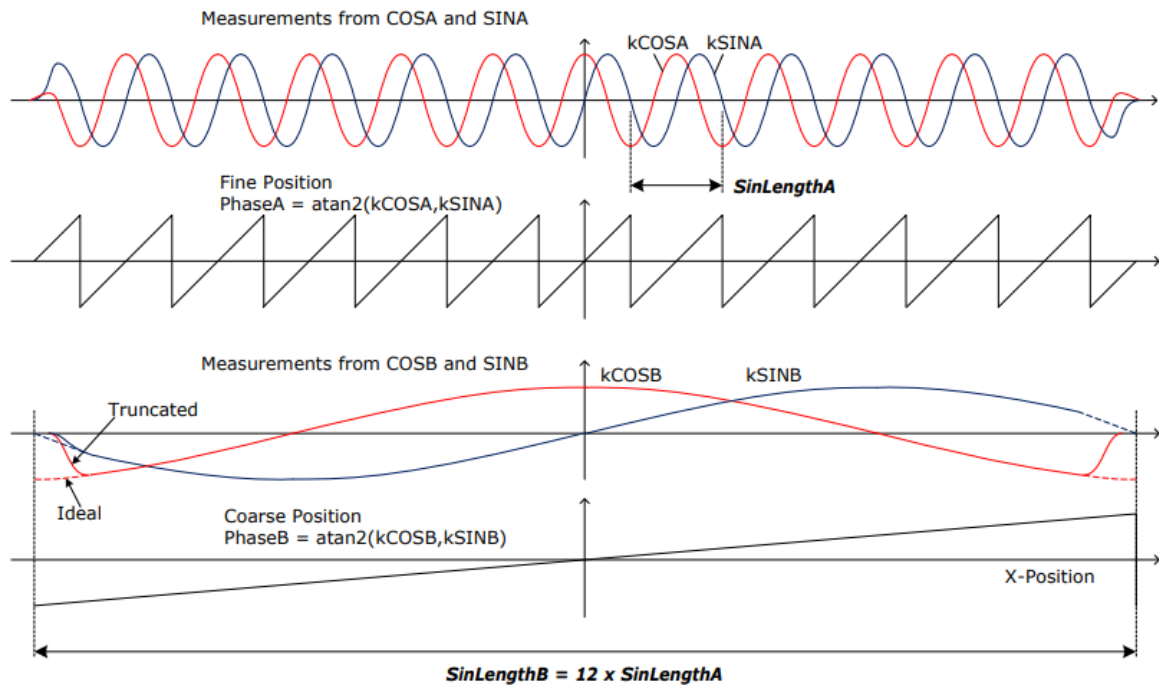


Gráfico 5 – Fatores de acoplamento das bobinas. [21]

A central de rastreamento de posição combina ambas as posições, fina e grosseira, de forma a obter um valor absoluto, sendo precisa e exata como os valores da bobina do sensor fino e absolutas como os valores das bobinas do sensor grosso. [21]

O valor da posição retirado pelo CTU não se encontra em unidades físicas, a transformação é realizada através do software da *Cambridge IC*, sendo o modelo matemático realizado por este descrito na seguinte equação. [21]

$$Posição = \frac{Posição\ obtida\ pelo\ CTU}{65536} \times wavelegth \quad (5)$$

A variável *wavelegth* é outra designação para o *wavelegth A*.

3. PRÉ-PROJECTO

Neste capítulo será desenvolvido o pré-projecto, onde se realiza o esboço inicial da ferramenta que se irá desenvolver, apresentando-se diversas soluções para os variados problemas escolhendo a que melhor se enquadra ao projeto.

3.1 Objetivos do Projeto

No início de qualquer projeto existe apenas uma vaga ideia do que se pretende, havendo uma ideia geral pouco detalhada. De forma a clarificar ao máximo os objetivos e permitir uma melhor idealização da solução final para tal deve-se criar uma lista de objetivos, que deve ser facilmente perceptível e clara, que posteriormente leva a uma árvore de objetivos, um formato representativo da lista realçando os objetivos e o meio de como os obter. Na realização desta lista deve-se verificar a existência de especificações para o projeto, existindo três, a utilização de uma mesa que se encontra no departamento de engenharia mecânica da Universidade do Minho, aplicar a tecnologia do *digital image correlation* para obter os dados da deformação e que a ferramenta seja manual.

O principal objetivo desta ferramenta será testar a cama de agulhas, utilizada na verificação das placas PCB, de forma a conhecer a deformação que estas sofrem, tratando-se assim de um ensaio de compressão. Apesar da existência de um objetivo principal existem também objetivos secundários que são desejados, como por exemplo, a segurança da ferramenta. De seguida, encontra-se a lista de objetivos.

Lista de Objetivos

- Realizar ensaios de flexão em placas;
- Obtenção de deformação de forma precisa (utilização do *software* DIC);
- Obtenção de dados de deslocamento e força;
- Universalidade,
- Simplicidade;
- Segurança;
- Custos reduzidos;
- Baixa manutenção;

A realização de ensaios de flexão e a obtenção da deformação transversal são os objetivos principais claros da ferramenta. A obtenção dos dados de deslocamento e força aplica-se para complementar os resultados do ensaio.

O objetivo da segurança é facilmente perceptível, uma vez, que no funcionamento da ferramenta o utilizador e as proximidades da ferramenta não podem sofrer qualquer tipo de dano. O custo reduzido implica a procura de várias alternativas e optar, sempre que seja possível, por uma solução mais barata, uma vez que a qualidade da ferramenta não pode ser afetada.

Com a simplicidade procura-se que o funcionamento seja o mais direto possível. A universalidade indica que o projetista ao definir a ferramenta deve fazê-la no modo que no futuro seja possível adaptar novas funcionalidades ou a possibilidade de substituir componentes de forma facilitada.

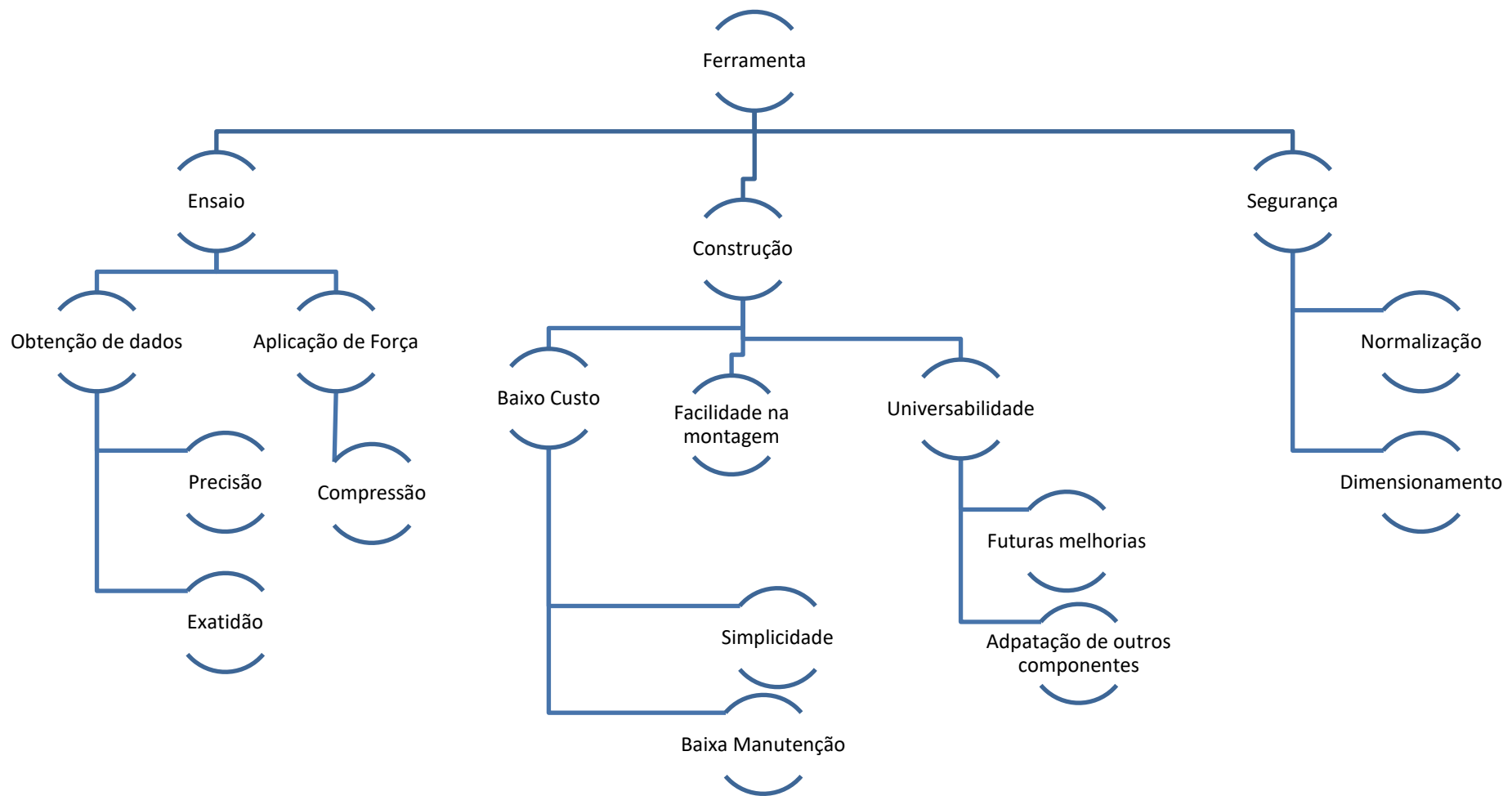


Gráfico 6 - Árvore de objetivos

3.2 Arquitetura da ferramenta

Neste subcapítulo procede-se a idealização da ferramenta, esta deve seguir as especificações e os objetivos proposto. Nesta conceção são apresentadas várias soluções para determinados subsistemas da ferramenta escolhendo a solução que se prevê mais adequada.

Utilização da Mesa

Como foi referido no subcapítulo anterior, capítulo 3.1, existem especificações a aplicar no projeto, como é o caso da utilização de uma mesa específica e do sistema DIC, devido a estas exigências o ensaio de flexão terá de ocorrer numa forma horizontal. A mesa a utilizar, observada Figura 24, é composta por vários tubos quadrangulares de 50x50x3mm com comprimentos variados, sendo unidos através de soldadura.

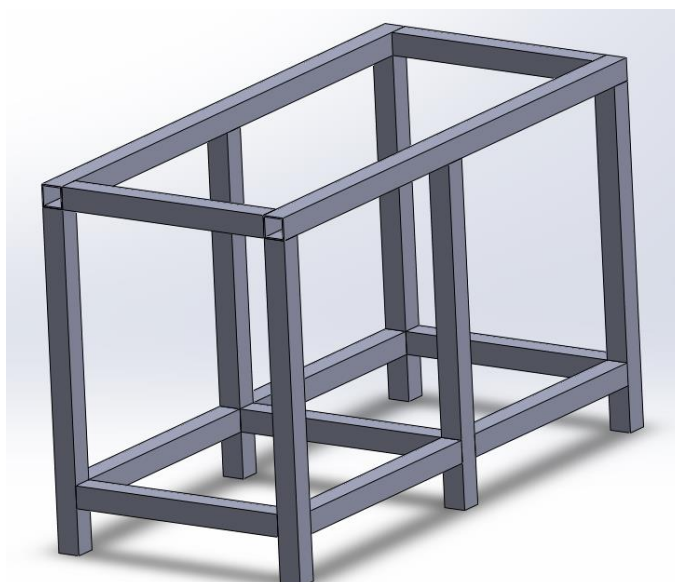


Figura 24 – Mesa a utilizar na ferramenta que se encontra no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho.

Esta mesa possui uma altura de 805mm, um comprimento de 1305 mm e uma largura de 605 mm, sendo realizada, possivelmente, num aço S235.

Pela empresa Controlar obteve-se alguns desenhos técnicos de camas de agulhas por eles utilizadas, que se podem observar na Figura 25 e Figura 26.

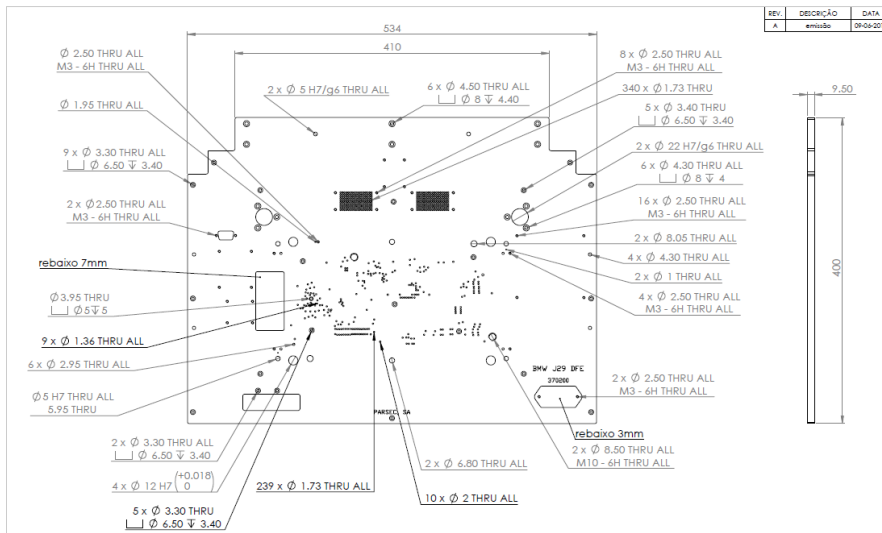


Figura 25 – Desenho técnico de uma cama de agulhas utilizada pela Controlar.

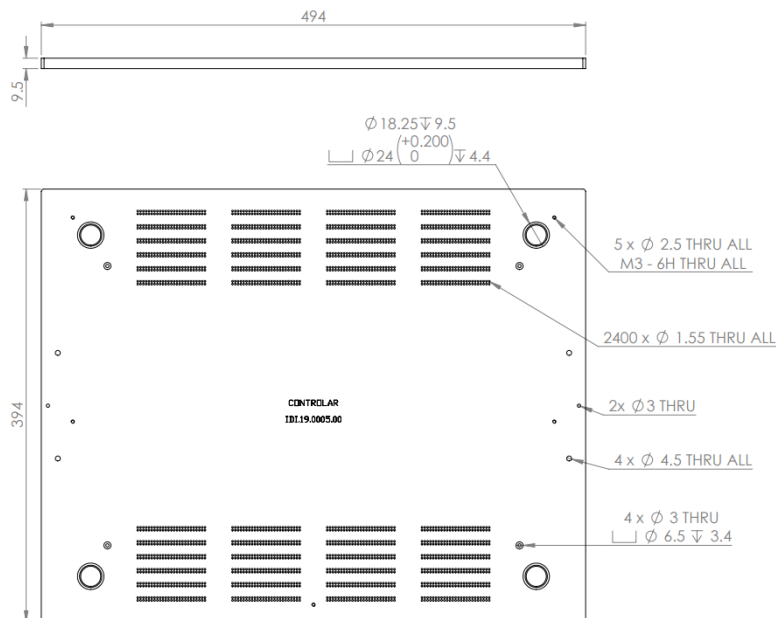


Figura 26 - Desenho técnico de uma cama de agulhas utilizada pela Controlar.

A cama de agulhas apresentada na Figura 25 possui um comprimento de 534 mm, uma altura de 400 mm e uma espessura de 9.50 mm, podendo suportar mil agulhas. Já a cama de agulhas definida na Figura 26 possui uma largura de 494 mm, uma altura de 394 mm e uma espessura de 9.50 mm, suportando no máximo duas mil e quatrocentas sondas. Posto isto, pela informação obtida no estado de arte, capítulo 2.3.2 , sabe-se que que a sonda crítica aplica 4N de carga e tendo em conta o número máximo de agulhas das camas, 2400, a ferramenta deve conseguir aplicar 9,6 kN.

As dimensões das camas de agulhas acarretam um problema, observando as dimensões descritas na Figura 25, cama de agulhas de maior dimensão, verifica-se que a largura desta, 534mm, é bastante próxima da largura da mesa, 605mm, sobrando pouco espaço, cerca de 70 mm, para realizar a ferramenta.

Para resolver esta situação, surgem duas alternativas, ou se realiza um aumento da largura da mesa ou aplica-se uma espécie de superfície de forma a aumentar a mesa.

O aumento da largura poderia acontecer de duas formas, ou se dá uma separação da mesa inicial substituindo as vigas transversais existentes por vigas de maior comprimento, ou se adiciona mais vigas nas partes laterais da mesa. Neste aspeto a primeira opção referida não é uma opção, visto que será necessário separar ligações soldadas, que pode deixar as vigas longitudinais danificadas, que seriam reutilizadas, da mesma forma que pode causar uma perda de rigidez localizada nas zonas anteriormente soldadas e nas zonas onde se realizaria a nova soldadura. Sendo assim, num possível aumento da mesa optar-se-ia pela adição de vigas na lateral da mesa. Na Figura 27 apresenta-se a aplicação desta possível solução.

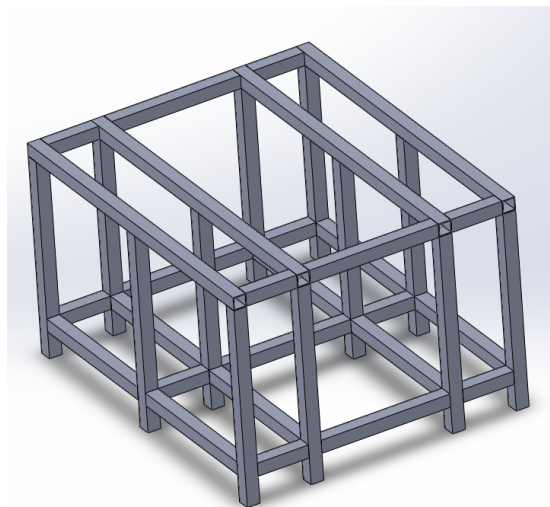


Figura 27- Mesa com aumento de largura através da adição de vigas na parte lateral.

Em relação à segunda alternativa, o aumento da largura da mesa seria proveniente pela aplicação de uma placa metálica em cima da estrutura, sendo que a fixação da mesma ocorreria de forma aparafusada nas pernas da mesa, com a utilização de cantoneiras. Na Figura 28 pode-se observar esta alternativa.

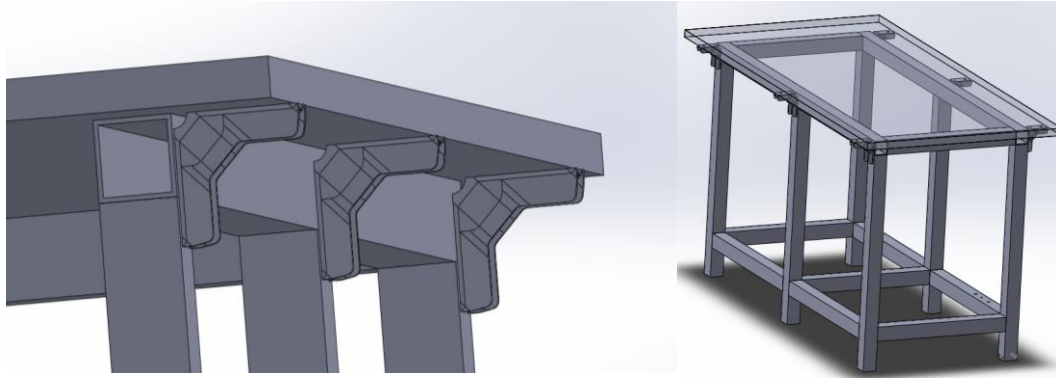


Figura 28 – Aplicação de uma placa em cima da estrutura com utilização de cantoneiras.

Avaliando as duas soluções apresentadas a escolhida para aplicação do projeto será a utilização de uma chapa metálica na mesa, tratando-se de uma solução mais simples de realizar, mais económica e deixa mais suporte para futuras alterações. A escolha deve-se a inexistência de uma nova soldadura, processo mais complexo e mais caro que a furação e o aparafusamento de parafusos, e a facilidade em trabalhar sobre um espaço de superfície maior.

Definição para o ensaio

De modo a efetuar o ensaio de compressão horizontalmente, devido às condições impostas, a solução encontrada foi utilizar um conjunto de placas metálicas. Este conjunto utiliza quatro placas, existindo duas placas que delimitam o tamanho da ferramenta, sendo nomeadas de placas externas, e duas placas que efetuam o ensaio sendo denominadas de internas. A dimensão destas placas deve ser superior as dimensões das camas de agulhas em teste, observando o catálogo da empresa *MeusBurger* selecionaram-se dois tamanhos de placas quadrangulares, 696x696x56mm e 646x646x56mm, onde as placas externas são as de maior tamanho e as placas internas as de menor.

Além de delimitarem o tamanho da ferramenta as placas externas possuem outras funções, uma será responsável por suportar o sistema de aplicação de força, por onde o operador irá fornecer força à ferramenta, designando-se então por placa externa-origem de força, e a outra terá de possuir um rasgo passante de modo que seja possível a obtenção de imagens do ensaio, designando-se de placa externa-obtenção de dados.

Nas placas internas, uma terá de possuir um rasgo passante sendo nesta que será aplicada a cama em teste, sendo designada de placa interna-suporte de objeto, o rasgo deve ser suficientemente grande para permitir que as imagens captem a informação necessária. A placa interna restante é responsável pela aplicação da força na cama de agulhas em teste, designando-se de placa interna-aplicação de força.

A posição das placas externas deve ocorrer no extremo da mesa para que seja possível um aproveitamento total do espaço, Figura 29.

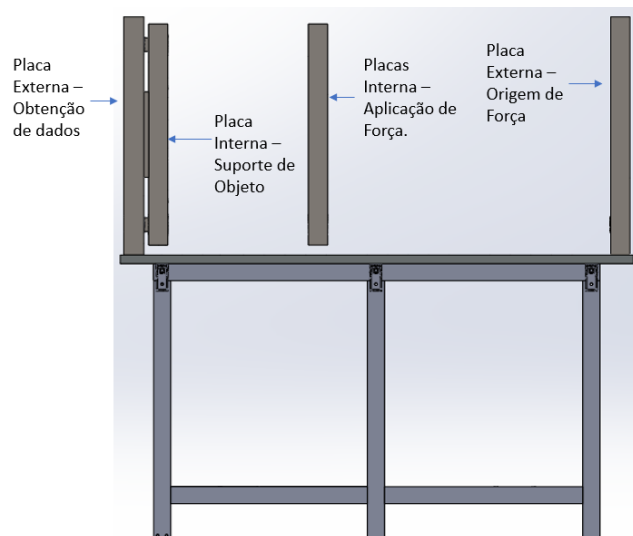


Figura 29 – Posição do conjunto de placas que constituem a ferramenta.

Como se verifica as placas externas encontram-se aplicadas na mesa, tendo então de serem fixas nela, esta junção ocorre pela utilização de 5 parafusos aplicados pela mesa e roscados nas placas, Figura 30.

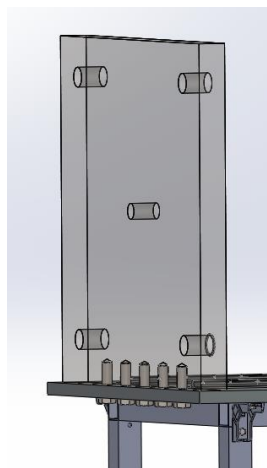


Figura 30 – Fixação das placas externas à mesa.

As placas em relação à mesa encontram-se descentradas, estando o máximo possível descaídas para um lado, de modo a libertar espaço no lado oposto para se aplicar um leitor de deslocamento.

Durante a realização do ensaio das camas de agulhas, para a obtenção de resultados mais fidedignos a placa interna-suporte ao objeto de ensaio terá de ser fixa à placa externa-obtenção de dados,

deste modo evitam-se possíveis movimentos da placa interna resultantes pela aplicação da carga. Este pormenor será abordado posteriormente.

A força do ensaio é dada pela movimentação da placa interna-aplicação de força que irá deslocar-se a uma velocidade razoavelmente lenta, a uma velocidade utilizada num ensaio de tração, esta placa terá de possuir um ou vários impactadores que provocam no embate força no objeto em teste.

Movimentação das placas

Como visto anteriormente, na ferramenta é necessário a movimentação das placas internas onde é imperativo que este movimento ocorra da forma mais suave possível, visto que se trata de um fator importante na precisão da ferramenta. A movimentação destas placas ocorre de duas formas, através de varões e através de guias lineares.

A principal forma de movimentação será através de duas guias lineares, onde apenas existirá um movimento retilíneo com um grau de liberdade. As guias têm de ser suficientemente rígidas de modo a suportarem o peso das placas e a transmitir os esforços para a mesa. Através de um fabricante escolheu-se de entre várias ofertas de guias lineares, tendo se optado por uma guia para carga pesadas, Figura 31, com um comprimento de 1385 mm e uma espessura de 15 mm. Cada guia possuirá dois patins, sendo estes do tipo “*wide block- tapped hole*”.

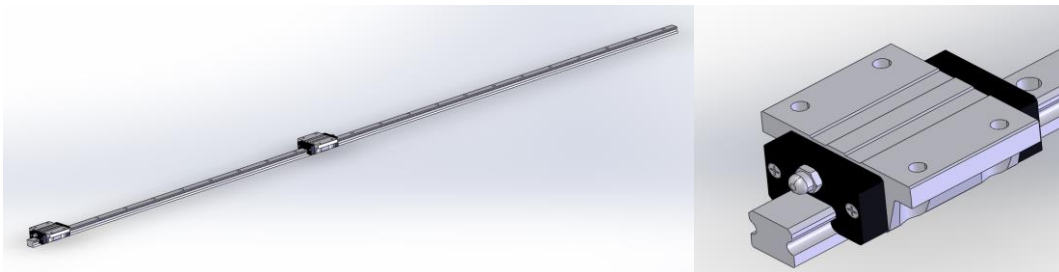


Figura 31- À esquerda imagem da guia linear escolhida; à direita imagem do patim wide block- tapped hole. [22]

A ligação das placas internas à guia ocorre através de 4 parafusos M4 ligados através dos patins, por tal razão estes são mais longos que o normal e possuem um furo roscado. Nesta ligação é adicionado uma placa intermédia, Figura 32, cujo objetivo é garantir que a superfície da placa e a superfície do patim se encontram paralelas, isto pois, apesar da qualidade destas superfícies, podem existir alguns empenos/imperfeições que afetem a ligação, consequentemente afetará à qualidade do movimento. Caso existam irregularidades esta chapa é maquinada de modo a realizar a correção.

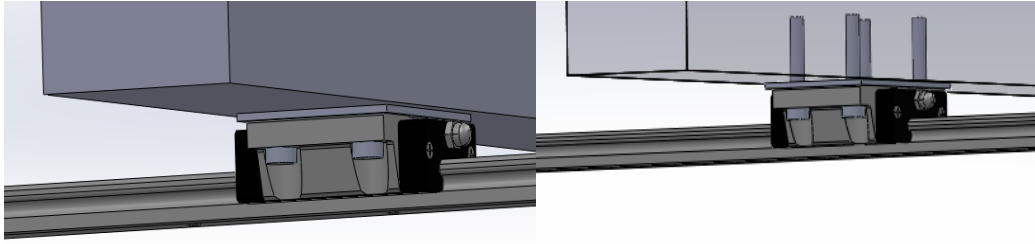


Figura 32 – Ligação da guia às placas internas.

O aperto dos parafusos nas placas internas podem ser dificultados, visto a existência de pouco espaço de trabalho, para auxiliar este procedimento realizam-se dois furos passantes de 12 mm de diâmetro na superfície da mesa, Figura 33.

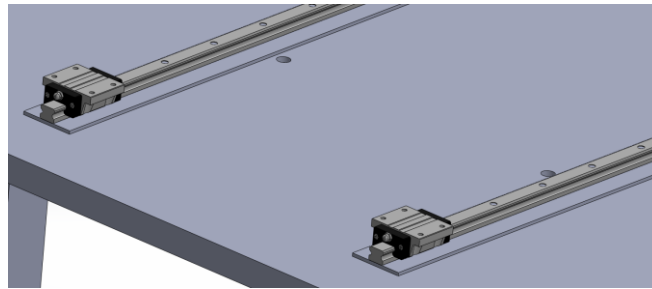


Figura 33 – Furos passantes na mesa para auxiliar a aplicação dos parafusos nos patins.

As guias lineares encontram-se aplicadas na mesa, através de parafusos M3, como no caso anterior, fixação dos patins às placas, é necessário cuidado, uma vez que a existência de irregularidades na mesa é bastante provável afetando o movimento. De modo a contornar este problema fixa-se a guia linear numa régua prismática, que por sua vez encontra-se ligada à superfície da mesa, como se pode observar na Figura 34.

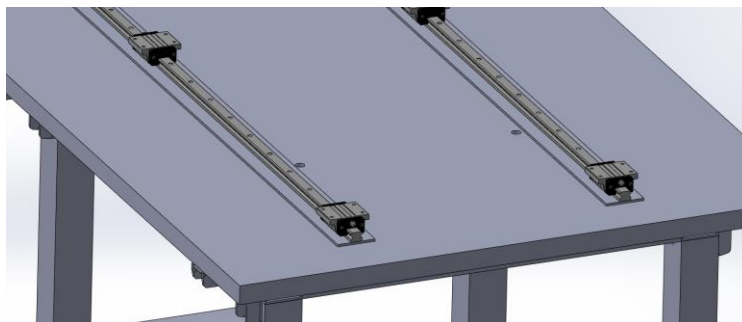


Figura 34 – Ligação das guias à mesa.

O uso das guias lineares permite a movimentação das placas internas, contudo não garantem a precisão do movimento, uma vez que pode ocorrer oscilações das placas em relação ao seu eixo, por exemplo, de forma a confirmar a precisão adiciona-se ao sistema varões de guiamento longitudinal.

Estes varões vão conduzir as placas ao longo do percurso, tendo de ser suficientemente rígidos para suportar as cargas do ensaio sem deformar. Na Figura 35 pode se observar um dos varões idealizados.

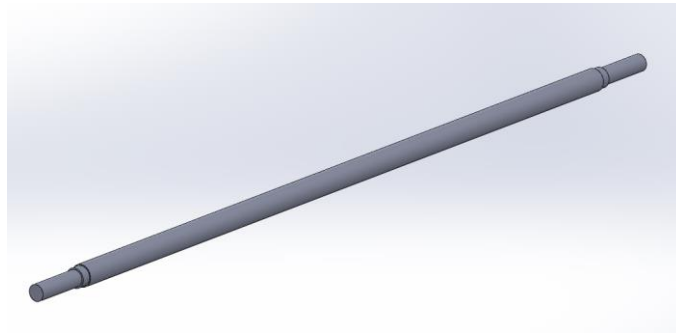


Figura 35 – Varões a utilizar na ferramenta.

Pela observação dos varões, nota-se a existência de uma redução de diâmetro nas extremidades, tal acontece devido ao facto desta zona ser roscada para permitir a aplicação de porcas. As porcas são aplicadas com o intuito de fixar os varões, sendo utilizadas duas em cada lado. Este número de porcas aumenta o esforço aplicado nos varões, porém impede que a porca desenrosque, Figura 36.

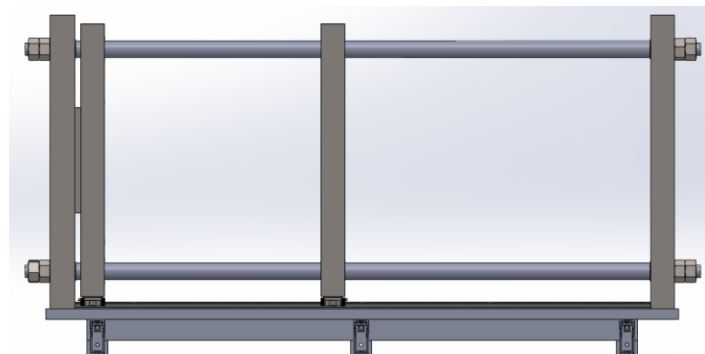


Figura 36 – Aplicação dos varões na ferramenta.

Como referido anteriormente e observado na Figura 35 existem nos varões vários patamares de diâmetros para possibilitar a fixação dos varões, sendo que a existência do patamar intermédio tem como função suavizar a mudança de diâmetro. Com a variação, a zona de maior diâmetro do varão estará em contacto com a superfície da placa promovendo a criação de tensões naquela zona, sendo isto limitante no projeto. De forma a evitar a deformação tanto do varão tanto da placa aplica-se uma anilha entre o varão e a placa, resolvendo o problema enunciado. Esta anilha também permite um ajustamento dos

varões, pois caso o comprimento deste não se encontre correto altera-se a espessura da anilha de forma a corrigir o erro, Figura 37.

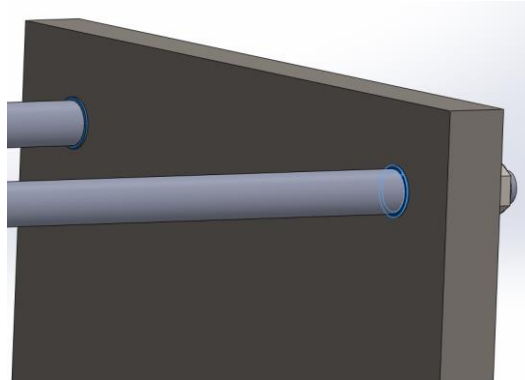


Figura 37 – Anilhas aplicadas entre o varão e a placa.

O contacto pontual entre placas e varões provocará atrito e um desgaste acentuado dos componentes, reduzindo a vida destes e afetando a precisão do movimento. Visto isto, é necessário a utilização de uma peça que forneça um movimento suave das placas nos varões, tal pode ser obtido através de casquilhos de esferas. Estes géneros de casquilhos possuem faixas onde se situam esferas, sempre em circulação, fornecendo movimentos suaves e bastante precisos. A fixação do casquilho na placa ocorre através da utilização de quatro parafusos, Figura 38.

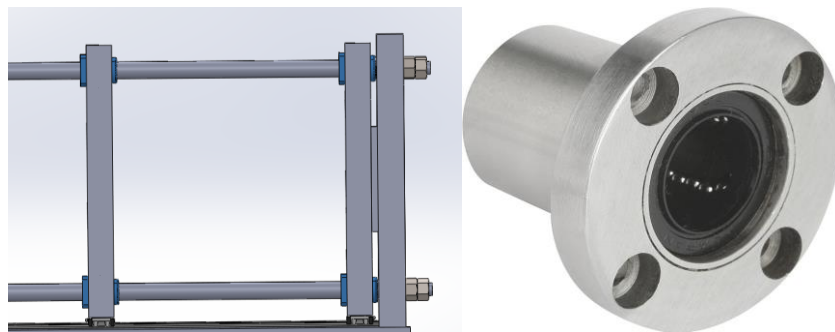


Figura 38 – À direita utilização dos casquilhos nas placas internas. À esquerda um exemplo de um casquilho de esferas. [23]

Força de ensaio

A força de ensaio é dada pela movimentação da placa interna-aplicação de força até ao objeto em teste, podendo esta dividida em duas ocasiões distintas, a origem da força e a sua transmissão, e a forma como a força é aplicada no objeto a ensaiar.

Iniciando pela origem da força, devido à especificação do projeto, esta será manual, sendo o operador quem irá fornecer a carga necessária para o ensaio. Para tal poder acontecer é necessário a utilização de um volante, contudo com o uso deste componente estar-se-á a fornecer carga rotativa invés de uma carga linear, para realizar a conversão é necessário a utilização de um parafuso de esferas. A montagem deste subsistema pode ocorrer de formas variadas, sendo que inicialmente a solução passaria por um parafuso de esferas adaptado, com um comprimento de menor diâmetro, para a introdução de vários componentes, estado ligado no extremo o volante necessário à introdução de força, Figura 39

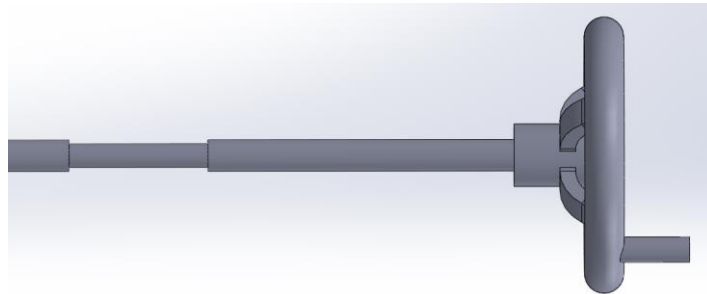


Figura 39 – Parafuso de esferas pensado numa ideia inicial.

A existência do espaço de menor diâmetro permite que a placa externa-origem de força se encontre ali situada, criando a limitação do espaço da ferramenta, sendo que após a placa externa apenas se encontram os componentes necessários para a introdução de força. Estando a placa situada na zona de introdução de força é necessário pensar na transmissão de carga que lhe pode ocorrer, de modo a diminuir ou até mesmo eliminar estes carregamentos aplica-se, imediatamente antes e após a placa, rolamentos axiais de esferas. Tendo em conta futuras melhorias na ferramenta, é deixado um espaço entre a placa e o volante para a introdução de uma roda dentada, este componente será importante para uma futura automatização da ferramenta.

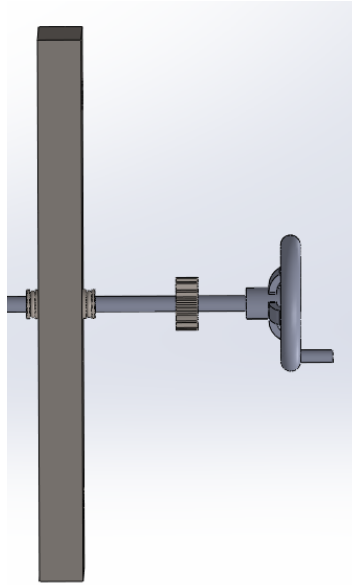


Figura 40 – Ideia proposta para a aplicação de força na ferramenta.

O facto de ser necessário um parafuso de esferas adaptado leva a um aumento do custo do componente e dificuldades em instalar o sistema sem folga. De modo a evitar estas dificuldades, o parafuso de esferas inicialmente possuiria um diâmetro inferior, utilizado para a aplicação dos componentes necessários à introdução da força, aumentando para o diâmetro normal na parte roscada, como se verifica na seguinte Figura 41.

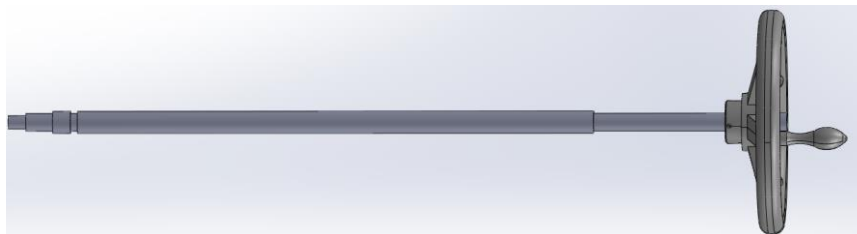


Figura 41 - Formato final do parafuso de esferas.

No espaço de menor diâmetro encontra-se situada a placa externa, mantendo-se, como referido na ideia anterior, a aplicação de rolamentos axiais e transversais de esferas, sendo que se aplicará na superfície dos rolamentos duas anilhas, para evitar que o contacto com outras superfícies seja realizado pelos rolamentos. Como na ideia anterior, nesta também se aplica uma roda dentada, de forma a permitir uma futura automatização. Para fixar todos estes componentes adiciona-se uma porca de fixação de chaveta, Figura 42, estas são utilizadas para fixações em eixos. A fixação destes elementos é através de uma arruela que se irá dobrar numa abertura da porca.



Figura 42 – Exemplificação de uma porca de fixação.

Como o parafuso de esferas é passante na placa externa-origem da força, este irá, após aplicação da força, rodar no interior da placa, de modo que não exista contacto aço com aço, para evitar desgaste e atrito aplica-se nesta zona um casquilho linear do tipo sem flange, na Figura 43 pode-se observar um exemplo deste tipo de componente.



Figura 43 – Casquilho linear do tipo sem flange.[24]

Na Figura 44 pode-se observar a idealização da ideia previamente apresentada.

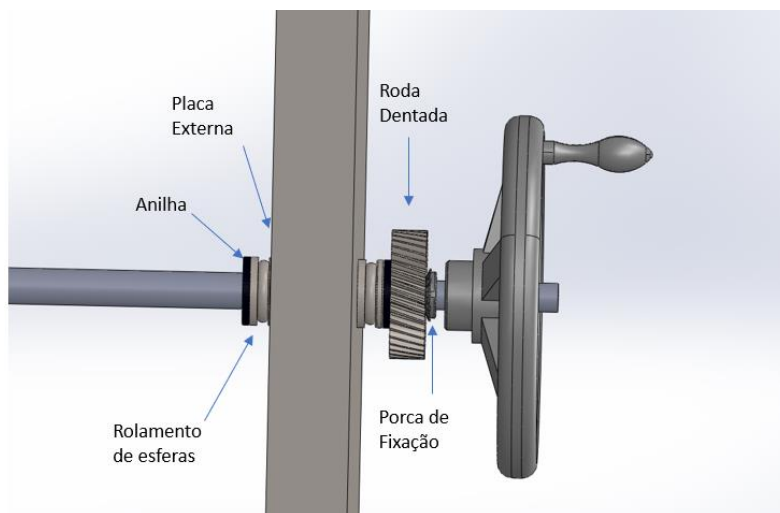


Figura 44 – Conjunto de aplicação de força na ferramenta.

Definida a forma que a força é introduzida na ferramenta, bem como o componente que a irá transmitir, parafuso de esferas, é necessário idealizar como esta será transmitida à placa interna e ao objeto em teste.

Na transmissão de força à placa interna é preciso aplicar uma célula de carga, de modo a ser possível conhecer a força utilizada no teste. Nesta idealização deve-se ter em conta a universalidade, pois uma alteração no modelo da célula não deve implicar grandes alterações na ferramenta. Por tal modo, aplica-se uma peça de ligação entre a placa e a célula, esta peça encontra-se roscada na placa e possui um furo roscado para a fixação da célula de carga. Caso aconteça uma mudança de célula apenas será necessária uma alteração nesta peça. Na Figura 45 pode se observar esta peça e a sua fixação.

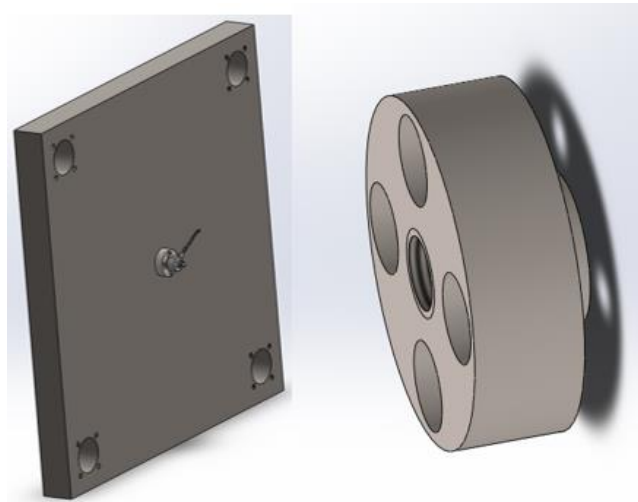


Figura 45 – À esquerda fixação da célula de carga na placa interna. À direita peça adaptadora da célula de carga (a)

Com a aplicação da célula de carga na placa interna é essencial realizar um modo de adaptar este leitor de dados com o parafuso de esferas, tal pode ser realizado pela aplicação de um tubo integrante. Numa das pontas deste tubo será aplicada na flange, componente que se encontra no parafuso de esferas, e na outra ponta situa-se uma outra peça adaptadora de forma a fixar a célula de carga no tubo. Esta peça adaptadora (b) será roscada no tubo integrante, Figura 46, e para tal é conjugada com uma porca, assim ao apertar-se a porca estar-se-á a fixar esta peça adaptadora no tubo integrante.



Figura 46 – À esquerda ligação da célula de carga ao tubo integrante; À direita peça adaptadora da célula de carga (b)

Ao aplicar-se carga na ferramenta estar-se-á a aplicar rotação no parafuso de esferas, movendo a flange de forma linear que se encontra fixa ao tubo integrante. Desta forma o tubo irá percorrer o parafuso movimentando à placa, a força aplicada para este movimento ocorrer é lida através da célula de carga. Esta montagem irá permite a aplicação de carga, contudo é importante garantir que a placa interna não possuí rotação e a existência de um apoio para o tubo integrante, devido as dimensões deste. Para a resolução de ambos os problemas aplica-se um apoio na placa, Figura 47, este apoio será aberto de modo a reduzir o peso e permitir a passagem dos fios relativos à célula de carga, possuindo uma chave para aplicar ao tubo, impedindo que a placa interna possua rotação proveniente do parafuso de esferas.

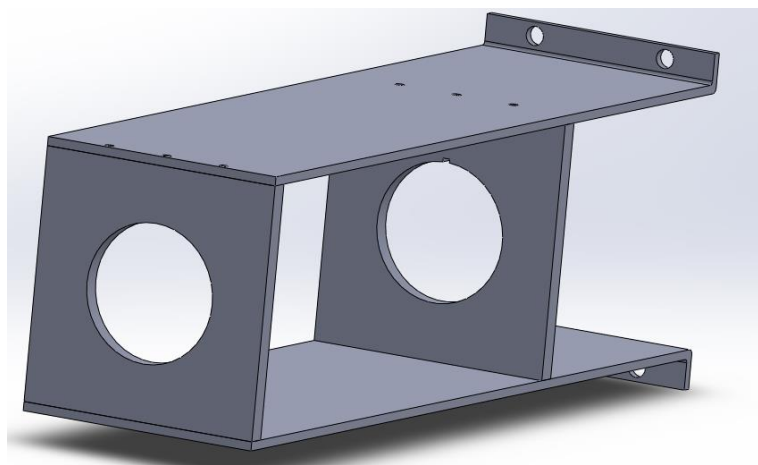


Figura 47 – Apoio ao tubo integrante.

Na Figura 48 visualiza-se a parte do subsistema responsável pela origem e transmissão da força na ferramenta.

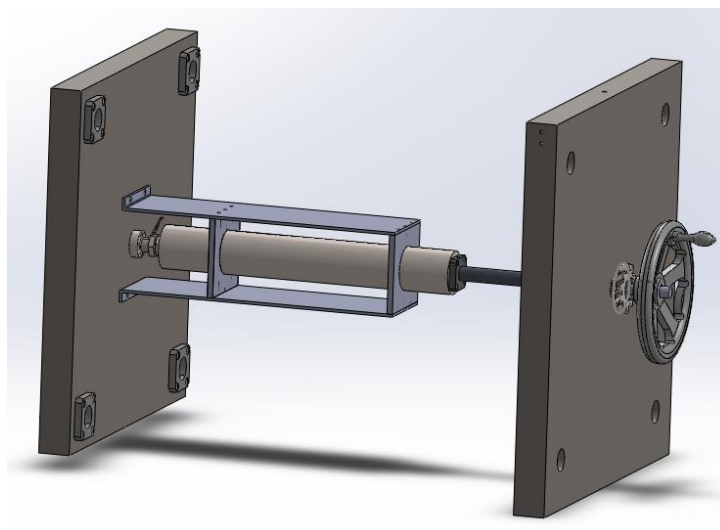


Figura 48 - Subsistema responsável pela origem e transmissão da força na ferramenta.

Finalizando a primeira etapa da força de ensaio, origem e transmissão, segue-se a aplicação de força, que deve ser o mais aproximado possível ao que ocorre na tecnologia TIC. Como visto no capítulo 2.1.1, durante o processo TIC a cama de agulhas encontra-se sujeita à força exercida pelas molas das sondas, pelo que será necessário submeter à cama de agulhas a um processo similar. Posto isto, a aplicação de força da ferramenta no objeto em teste ocorre através de um ou vários impactadores, sendo preciso adaptar a placa interna para os fixar. A placa interna além de suportar os impactadores deve possuir uma forma que torne uma posição universal, isto acontece devido ao facto de existirem diversos formas de camas de agulhas e a ferramenta de avaliação de deformação deve conseguir testar qualquer formato.

Inicialmente foi pensado num impactador móvel inserido na placa interna conseguindo movimentar-se dentro de um espaço permitido. Tal ideia foi descartada por ser bastante complexo tornar o punção fixo durante o ensaio, o que causaria uma aplicação de força incorreta que consequentemente levaria a obtenção de resultados inválidos.

A solução final trata-se da utilização de vários furos pré-definidos onde se pode aplicar um ou vários punções. Na adaptação desta ideia à placa interna, optou-se na realização de um espaço quadrangular na placa, estando os seus cantos arredondados para facilitar a maquinagem. Neste são aplicadas outras duas placas, a primeira a ser aplicada, possui vários furos de menores dimensões para possibilitar enroscar o punção, sendo a segunda com furos de maior dimensão com a finalidade de fornecer suporte ao impactador. O agrupamento destas placas à placa interna ocorreria pela aplicação de 4 parafusos. Na Figura 49 pode-se observar o procedimento anteriormente descrito.

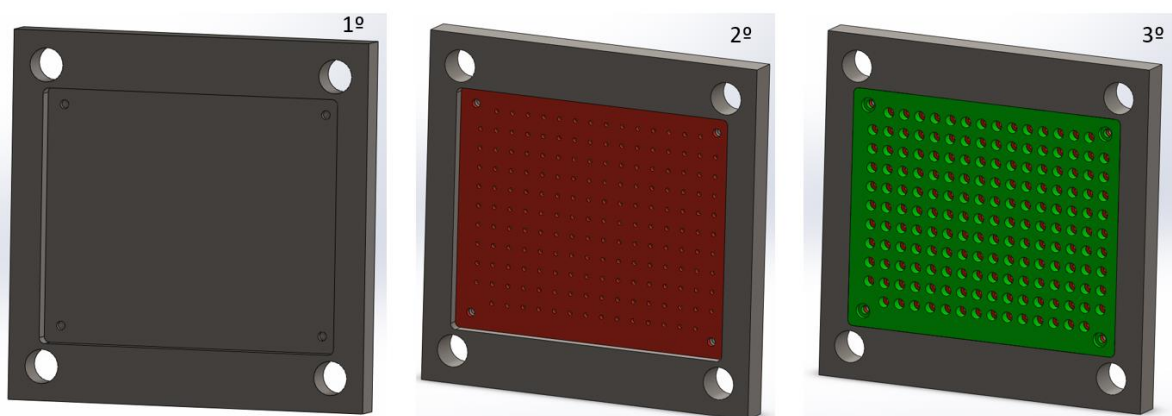


Figura 49 – 1º: Rasgo na placa interna. 2º: Aplicação de placa com furos roscados, que permite a fixação do impactador. 3º: Aplicação da placa final que possui os furos que fornecem suporte ao punção.

Obtenção da deformação

A obtenção do valor da deformação ocorre pelo sistema DIC, que necessita obter imagens do ensaio. Para tal acontecer é necessário a realização de um espaço central na placa externa-obtenção de dados e na placa interna-suporte de objeto.

Estes espaços são quadrangulares com os cantos arredondados com um raio de 10mm, onde na placa externa aplica-se um rasgo com uma altura de 456 mm e largura de 536 mm, já na placa interna o rasgo possui uma altura de 380 mm e uma largura de 514 mm. As dimensões do rasgo na placa interna foram definidas pelas dimensões da cama de agulha, por sua vez as dimensões do rasgo da placa externa têm de ser superiores ao outro rasgo de modo a ser possível uma maior captação.

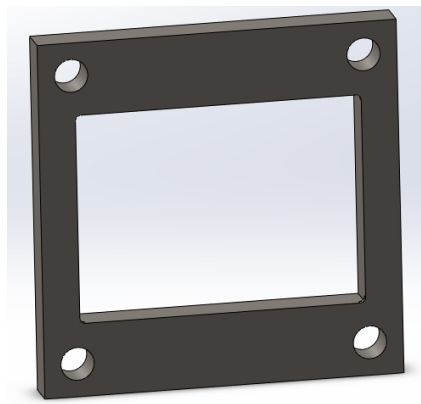


Figura 50 – Exemplificação dos rasgos executados na placa externa-obtenção de dados e na placa interna-suporte de objeto.

Fixação das Placas

Como já foi referido anteriormente, na execução do ensaio da cama de agulhas a placa interna de suporte será fixada na placa externa de obtenção de dados, garantindo desta forma que na aplicação de carga não ocorre nenhum movimento da placa interna-suporte de objeto.

O componente de ligação escolhido para realizar a junção das duas placas foi o parafuso, visto ser fácil de aplicar e de retirar quando necessário. A aplicação deste ligador gera um contacto das placas, o que não pode ser possível, visto que os casquilhos aplicados na placa interna não podem encontrar-se em contacto com a placa externa.

De forma a resolver a limitação aplica-se quatro chapas, duas laterais duas nos topos, que funcionam como intermediárias, onde a placa interna encontra-se ligada a estas 4 chapas, que por sua vez encontram-se fixadas na placa externa. Com a aplicação destas chapas intermédias os casquilhos da placa interna não se encontram em contacto com a superfície da placa externa.

A fixação das chapas intermédias na placa externa ocorre através de quatro parafusos laterais, dois em cada lado, um parafuso na parte superior e outro na parte inferior, sendo todos eles embutidos nas próprias chapas e apertados por porcas. Na Figura 51 pode-se observar esta fixação.

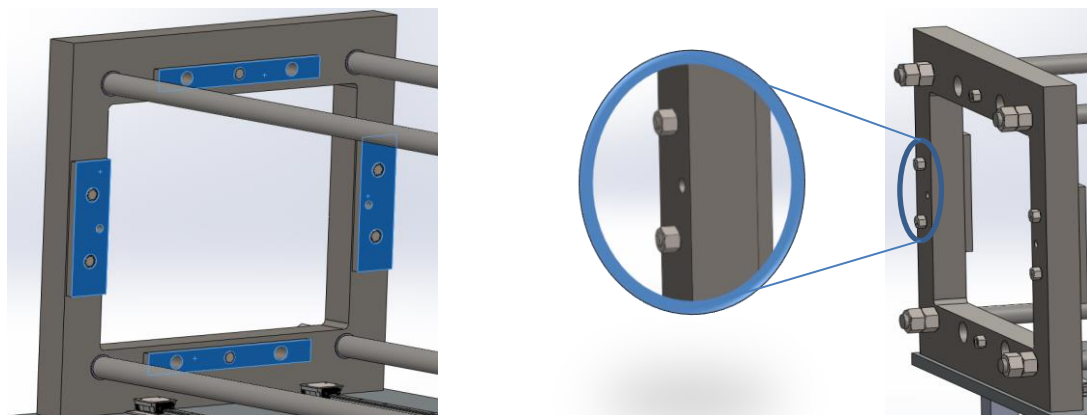


Figura 51 – A esquerda localização das chapas intermédias com a aplicação dos parafusos; à direita aperto dos parafusos através de porcas.

A junção destas chapas intermédias com a placa interna ocorre por dois parafusos aplicados na parte lateral, um em cada lado, e dois na parte superior e dois na parte inferior, como anteriormente, todos os parafusos são embutidos, sendo neste caso embutidos na placa interna. Estes parafusos são totalmente passantes, sendo apertados por roscas já após a placa externa, Figura 52.

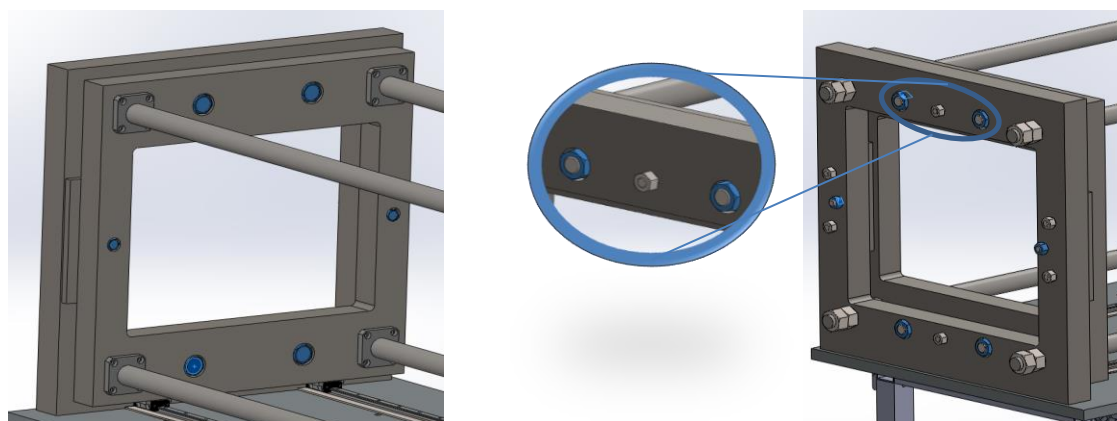


Figura 52 – À esquerda aplicação dos parafusos que permitem a fixação da placa interna às chapas de ligação; à direita aperto dos parafusos através de porcas.

Caso os parafusos sejam de grande dimensão tal será traduzido para as porcas e como estas se encontram no plano da captação de imagens pode originar um problema de contraste, por tal, caso as porcas sejam de elevada dimensão devem ser embutidas na placa externa.

Suporte da cama de agulhas

Para a cama de agulhas ser testada é necessário aplicá-la na ferramenta devendo acontecer da mesma forma que esta é utilizada no teste TIC. Como existem variados tipos de cama de agulhas, variando na forma como são utilizadas, não é possível fixar diretamente a cama de agulhas na placa interna-suporte de objeto. Portanto a aplicação da cama de agulhas na ferramenta passa pela utilização de uma placa de suporte, esta placa possui um formato que permite fixar a cama de agulhas e fixar-se na placa interna.

A realização da placa adaptadora deve ter em consideração a menor das camas de agulhas já apresentada na Figura 26. Por observação do desenho técnico esta cama de agulhas apenas é fixada lateralmente, encontrando-se a parte superior e inferior livre, este detalhe tem de ser cumprido pela placa adaptadora. Tendo em conta estas especificações, a placa adaptadora é composta por duas chapas laterais ligadas entre si através de uma chapa superior e inferior, utilizando parafusos. A ligação da cama de agulhas a esta placa adaptadora é realizada pelos furos utilizados normalmente nos testes, por sua vez esta placa seria fixa à ferramenta através de 8 parafusos aplicados nas partes laterais, Figura 53.



Figura 53 – À esquerda encontra-se a placa de suporte que permite a aplicação das camas de agulhas na ferramenta. À direita encontra-se a montagem destes componentes, placa de suporte e cama, na placa interna.

Sistema de locomoção e anti vibratório da ferramenta

Definida a parte superior da ferramenta, a responsável pelo ensaio, segue-se o subsistema de locomoção e o subsistema de anti vibratório da ferramenta, estes são responsáveis para mover a ferramenta caso seja preciso e absorver as vibrações do ensaio, de modo a tornar a ferramenta estável e permitir uma boa focagem da câmara. As arquiteturas destes sistemas foram idealizadas em duas formas distintas.

A primeira opção seria juntar ambos os subsistemas, obtendo-se uma espécie de painel *sandwich* aplicado em cima de uma roda niveladora. Este painel *sandwich* seria composto por duas chapas metálicas onde no seu interior encontrar-se-ia uma placa anti vibratória, sendo a junção através de quatro parafusos, os corpos destes parafusos teriam de ser revestidos por um tubo elástico para o corpo metálico não entrar em contacto com a placa anti vibratória. As cabeças dos parafusos não podem ser diretamente aplicadas na placa para evitar deformações, sendo então apoiadas em borrachas. A junção deste painel à roda é realizada pela última chapa metálica do painel e pela chapa da roda, nesta ligação aplicam-se quatro parafusos embutidos na chapa metálica do painel.

Encontrando-se idealizado os subsistemas é necessário aplicá-los na mesa, para tal acontecer a chapa metálica superior do painel possui uma espécie de encaixe, que permite entrar na perna da mesa, este é realizado de forma metálica e fixo pela utilização de dois parafusos, Figura 54.

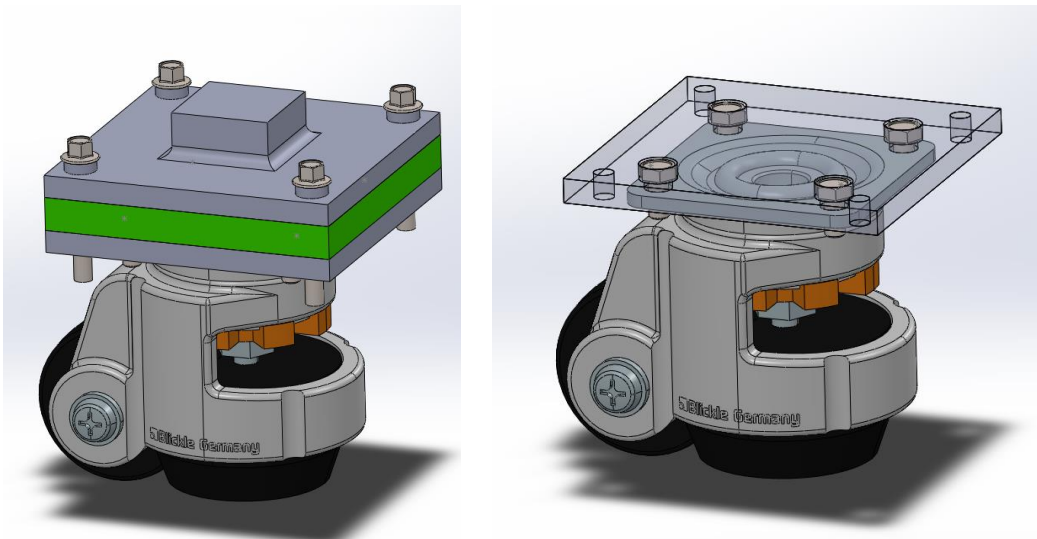


Figura 54 – À esquerda encontra-se a ideia para o sistema roda mais o sistema anti vibratório, com roda niveladora, painel sandwich com uma placa anti vibratória, e a ligação à mesa. À direita encontra-se o modo de fixação do painel à chapa da roda.

Em contrapartida, ao contrário da primeira opção apresentada, a segunda opção ocorre pela separação dos dois subsistemas, consistindo na aplicação de vários pés anti vibratórios na mesa e de quatro rodas nas vigas transversais da mesa. Os pés anti vibratórios consistem numa base anti vibratória com uma haste, onde a haste permite subir e descer o pé, conforme o que for pretendido, através de uma porca. De modo a adaptar-se estes componentes à mesa é aplicado um adaptador que irá entrar no espaço aberto da viga quadrangular que constitui a perna da mesa, sendo estes adaptadores fixado por dois parafusos, Figura 55.

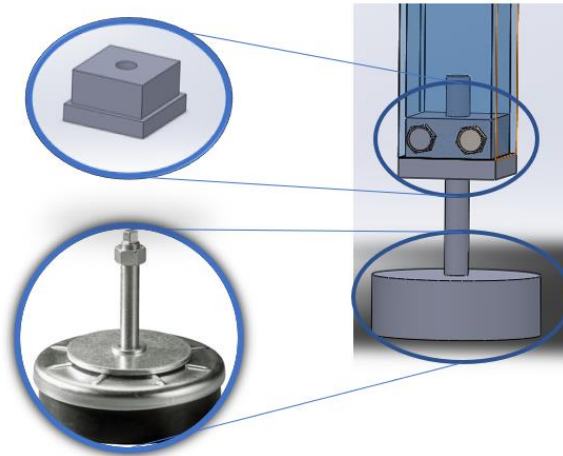


Figura 55 – Subsistema vibratório, consistindo num pé anti vibratório e uma peça adaptadora para encaixe na mesa.

O subsistema de movimentação consiste nas rodas a serem aplicadas nas vigas transversais da mesa, tal acontece através de uma chapa metálica intermédia. A fixação deste subsistema, Figura 56, ocorre em duas vertentes, uma é a fixação da chapa na viga transversal por dois parafusos, sendo a outra a fixação da chapa intermédia com a chapa da roda através de quatro parafusos. As dimensões da chapa intermédia devem ser superiores à chapa da roda.

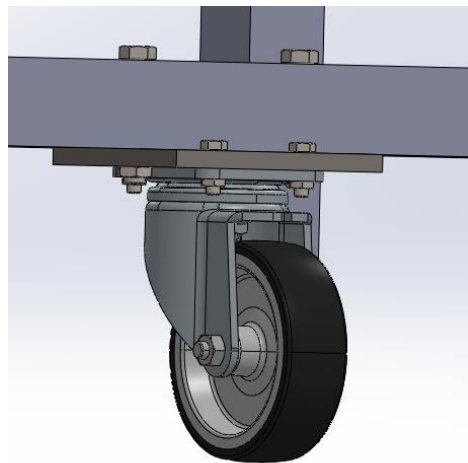


Figura 56 – Subsistema de movimentação.

Nesta idealização, aplica-se em todas as pernas da mesa o subsistema anti vibratório e nas quatro vigas transversais o subsistema de movimentação, como pode ser observado na seguinte figura, sendo que o comprimento da haste do pé anti vibratório deve ser de tal ordem que permita que quando o pé se encontre em contacto com o chão as rodas se encontrem levantadas.

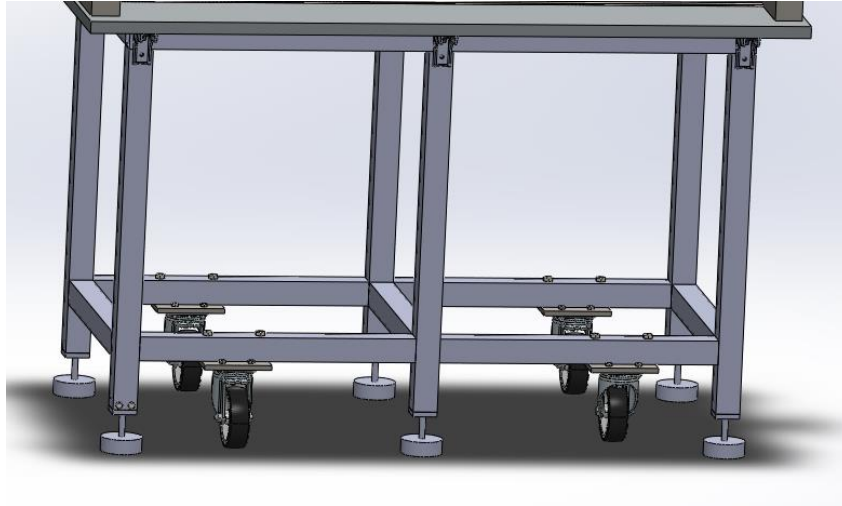


Figura 57 – Aplicação da segunda ideia para os subsistemas anti vibratórios e de movimentação.

Dentro das duas ideias apresentadas optasse pela segunda, Figura 57, ambas as ideias são simples, conseguindo realizar as tarefas sem limitações e possuindo boa rigidez associada. O fator de determinante para a escolha foi o custo, visto que produção da segunda ideia será menor conseguindo realizar com qualidade o amortecimento e a movimentação.

Medição de deslocamento

Na realização do ensaio é importante a obtenção do dado de deslocamento da placa interna-aplicação de força, como foi visto no estado de arte, capítulo 2.3.4, a medição pode ser realizada por diferentes componentes, sensor de precisão linear, potenciômetro e régua linear.

Tendo em conta o método de funcionamento dos três sistemas em questão, rejeita-se a utilização do sensor de precisão linear, isto pois este dispositivo funciona através de métodos indutivos e rastreamento de sinais existindo um receio que fatores externos possam condicionar o resultado, como outro material sem ser o alvo entrar em ressonância ou o CTU, chip de central, captar sinais que não os pretendidos.

Por tal, sobram duas opções fiáveis em termos de funcionamento, o potenciômetro e a régua linear, o preço do potenciômetro acaba por ser menor, uma vez que será necessário adquirir a régua linear e o um leitor de dados, contudo, em termos de espaço, o potenciômetro é possui dimensões que dificultam à sua aplicação no projeto.

Como o leitor de deslocamento deve ser aplicado na parte lateral da placa, visto a colocação lateral do instrumento é preferível por razões de acessibilidade e de segurança.

A régua linear precisa de se encontrar fixa na mesa e o seu cursor conjugado na placa interna-aplicação de força. Como a placa interna, devido aos patins da guia linear, encontra-se, desfasada em

relação a superfície da mesa é indispensável levar a guia até este nível, tal pode acontecer pela aplicação de duas cantoneiras, estas são responsáveis por tanto por fixar a régua na mesa como levá-la até a altura necessária. De modo a possuir-se um maior controlo da posição da régua estas cantoneiras não possuem furos, mas sim rasgos, o uso destes permite uma maior liberdade na posição, como se pode visualizar na Figura 58.

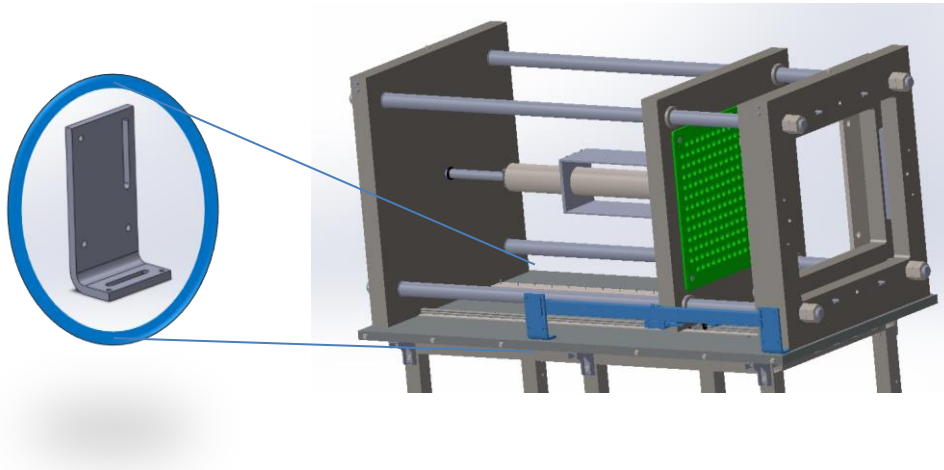


Figura 58 – Utilização de cantoneiras de rasgo para suporte da régua linear.

A junção do cursor à placa interna não pode ocorrer diretamente, isto deve-se ao facto dos furos responsáveis de realizar esta ligação não permitem o sentido necessário, leitor-placa, sendo assim é essencial adaptar uma peça intermédia. Para esta peça intermédia opta-se por uma forma tipo L a ser fixada na parte inferior do cursor e na retaguarda da placa. Na Figura 59 pode-se observar o formato da peça adaptadora à régua linear.

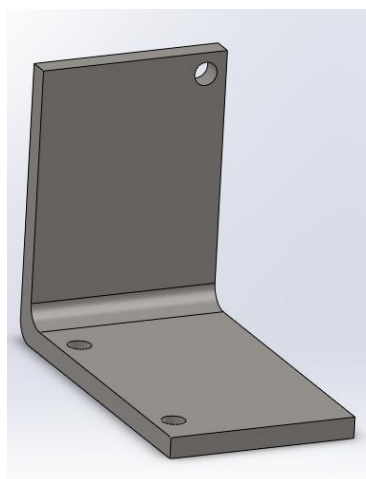


Figura 59 – Formato da peça adaptadora à régua linear.

A secção horizontal da peça efetua a ligação ao cursor e deve ter as dimensões deste, da mesma forma a posição dos furos também é dependente do cursor. A secção vertical que efetua a ligação à placa deve ser aplicada entre no espaço livre existente entre a placa e o casquilho, Figura 60.

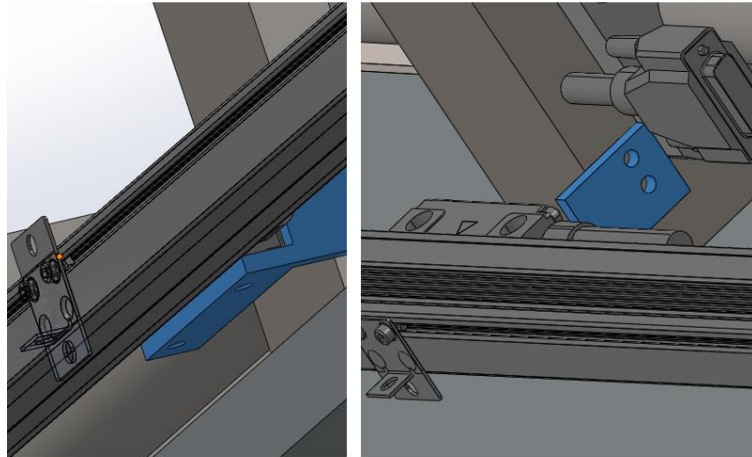


Figura 60 – Aplicação da peça adaptadora à guia linear: à esquerda ligação da peça ao cursor da guia; à direita ligação da peça à retaguarda da placa

4. FUNDAMENTOS TEÓRICO DE APOIO AO PROJETO

Este capítulo serve de apoio teórico ao dimensionamento que será realizado no subcapítulo 5.2, apresentado o procedimento necessário à efetuação do dimensionamento dos vários componentes da ferramenta.

4.1 Cálculo Teórico

Neste subcapítulo encontra-se o estudo da parte analítica do dimensionamento que é necessário realizar.

Parafuso de Esferas

Para o dimensionamento do fuso de esferas segue-se as recomendações indicadas no catálogo da THK, [25], e no catálogo da HIWIN, [26].

Inicialmente verifica-se a precisão do ângulo de avanço, existindo várias classes de precisão, as categorias de C0 a C5 são definidas pelas linearidade e propriedade direcional, enquanto de C7 a C10 definem-se no erro da distância de percurso em relação a 300 mm. [25] A escolha da classe é executada

em função da ferramenta. Seguidamente na Tabela 1 observa-se a folga axial do parafuso de esferas, sendo esta caracterizada pelos padrões G.

Tabela 1 – Folga axial de um parafuso de esferas. [25]

Símbolo de Folga	G0	GT	G1	G2	G3
Folga axial	0 ou menos	0 a 0,005	0 a 0,01	0 a 0,02	0 a 0,05

Para finalizar o tópico da precisão do ângulo de avanço verifica-se através da Tabela 2 o comprimento máximo existente para as diferentes classes selecionadas.

Tabela 2 – Comprimento total do eixo do parafuso tendo em conta a classe de precisão em mm [25]

Diâmetro externo do eixo parafuso	Comprimento total do eixo parafuso					
	C0	C1	C2	C3	C5	C7
4	90	110	120	120	120	120
6	150	170	210	210	210	210
8	230	270	340	340	340	340
10	350	400	500	500	500	500
12	440	500	630	680	680	680
13	440	500	630	680	680	680
14	530	620	770	870	890	890
15	570	670	830	950	980	1100
16	620	730	900	1050	1100	1400
18	720	840	1050	1220	1350	1600
20	820	950	1200	1400	1600	1800
25	1100	1400	1600	1800	2000	2400
28	1300	1600	1900	2100	2350	2700
30	1450	1700	2050	2300	2570	2950
32	1600	1800	2200	2500	2800	3200
36	2000	2100	2550	2950	3250	3650
40		2400	2900	3400	3700	4300
45		2750	3350	3950	4350	5050
50		3100	3800	4500	5000	5800
55		3450	4150	5300	6050	6500
63		4000	5200	5800	6700	7700
70				6300	6450	7650
80			7900		9000	10000
100			10000	10000		

Segue-se a seleção de carga, Tabela 3, como a carga do parafuso é dependente do avanço do mesmo, uma vez que este fator se encontra relacionado com o ângulo do parafuso, quanto maior for o avanço mais acentuado se torna o ângulo levando ao parafuso suportar menos carga. A escolha do avanço realiza-se por observação da seguinte tabela, onde se verifica os componentes normalizados existentes para uma combinação de diâmetro externo do eixo do parafuso e o avanço.

Tabela 3 – Combinações padrão de eixo parafuso e avanço em mm. [25]

Diâmetro externo do eixo parafuso	Avanço																						
	1	2	4	5	6	8	10	12	15	16	20	24	25	30	32	36	40	50	60	80	90	100	
4	●																						
5	●																						
6	●																						
8	●	●					●	○															
10		●	●				●	○															
12		●		●		●																	
13											○												
14		●	●	●		●																	
15							●			●			○			○							
16			○	●	○		○			●													
18							●																
20			○	●	○	○	●	○		●							○		○				
25			○	●	○	○	●	○		○	●		○					○					
28				○	●	○	○																
30																			○			○	
32			○	●	●	○	●	○		○					○								
36					○	○	●	○		○	○	○				○							
40				○	○	○	●	●		○	○			○			○				○		
45					○	○	○	○		○	○												
50				○		○	●	○		○	○			○		○		○					○
55								○	○	○	○			○		○							
63								○	○	○	○												
70								○	○		○												
80								○	○		○												
100											○												
120																							

●: produtos padronizados [estoque de produtos padrão equipados com eixos parafuso padronizados (com pontas de eixo retificadas/sem retífica)]
○: estoque semipadrão

A partir do avanço pode-se retirar o diâmetro de eixo a partir da Tabela 4, da mesma forma que se realizou para o caso anterior.

Tabela 4 – Combinação diâmetro exterior e avanços dos eixos do parafuso em mm. [25]

Unidade: mm

Diâmetro do eixo	Avanço		
	5	10	20
16	●	—	—
20	●	—	—
25	●	●	—
32	●	●	—
40	○	●	○*
50	—	○	○*
63	—	○	○*

●: eixo retificado, eixo CES ○: somente eixo retificado *: somente o modelo EB (sem pré-carga)

Encontrando-se defendido o avanço é necessário verificar a seleção de montagem do parafuso na ferramenta, este pode se encontra de várias formas como se pode observar Figura 61. No caso A tratasse de uma montagem fixa-livre, o caso b uma montagem fixa-apoiada e por fim o caso c é do tipo fixa-fixa.

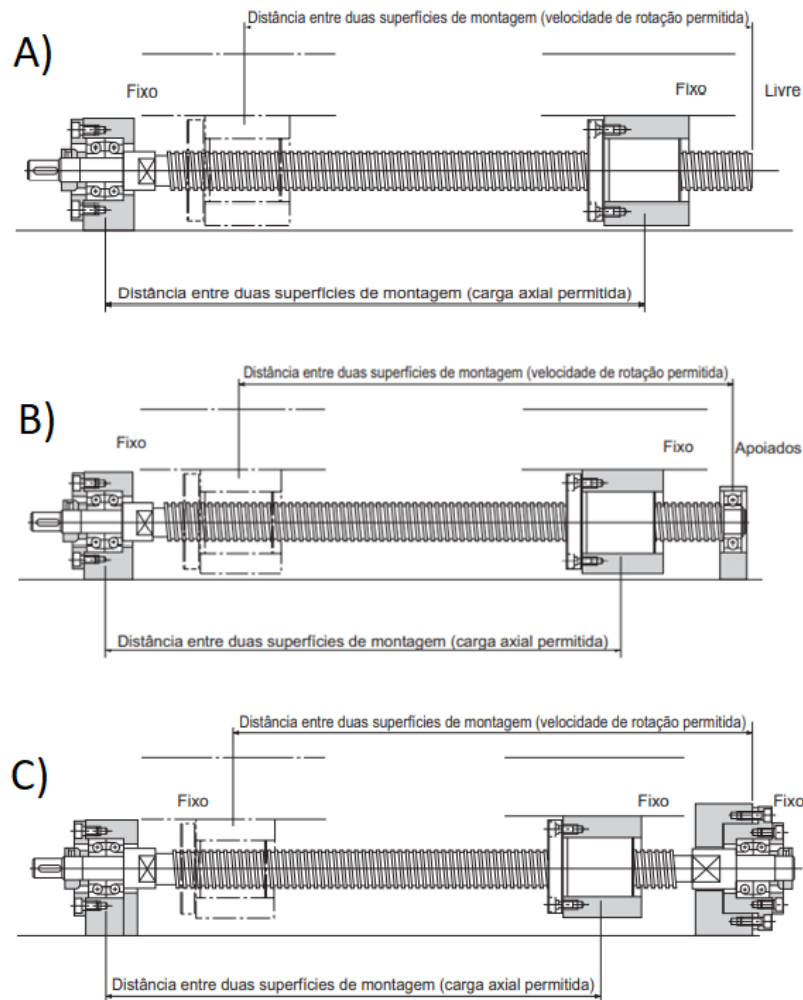


Figura 61 - Opções de montagem para o parafuso de esferas: A) Fixo-livre; B) Fixo-apoiado; C) Fixo-Fixo- [25]

Encontrando-se todas estas variáveis definidas realiza-se o cálculo da carga axial permitida, esta permite seleccionar um eixo que não deforme quando a carga máxima de compressão for aplicada, na direcção axial. [25]

$$P_{ca} = \frac{\eta_{f1} \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{l_a^2} \times 0,5 = \eta_2 \frac{d_1^4}{l_a^2} \times 10^4 \quad (6)$$

Os valores de η_{f1} e η_{f2} são dependentes da selecção de montagem, assumindo os seguintes valores. [25]

Fixo - Livre	$\eta_{f1} = 0,25$	$\eta_{f2} = 1,3$
Fixo - Apoiado	$\eta_{f1} = 2,00$	$\eta_{f2} = 10,0$
Fixo - Fixo	$\eta_{f1} = 4,00$	$\eta_{f2} = 20,0$

No seguimento do cálculo da carga axial permitida é necessário calcular a carga de compressão de tensão permitida em relação à tensão de escoamento no eixo do parafuso.

$$P_{ct} = \sigma \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = 116d_1^2 \quad (7)$$

Quando o parafuso de esferas se encontra em movimento recebe tensão de forma repetitiva nas suas pistas e esferas, caso se atinga o limite as pistas quebram e as superfícies lascam como escamas, chegando ao fim de vida do componente. Para calcular o tempo de vida, em revoluções, aplica-se a seguinte fórmula. [25]

$$L = \left(\frac{C_a}{f_w \cdot F_a} \right)^3 \times 10^6 \quad (8)$$

O fator de carga é um valor tabelado e pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5- Fator de carga f_w . [25]

Vibrações/Impacto	Velocidade (V)	f_w
Leve	Muito Baixo, $v \leq 0,25m/s$	1 a 1,2
Fraco	Lento, $0,25 < v \leq 1,00m/s$	1,2 a 1,5
Médio	Médio, $1,00 < v \leq 2,00m/s$	1,5 a 2
Forte	Forte, $v > 2,00m/s$	2 a 3,5

Sabendo que o parafuso de esferas permite a transformação de um movimento rotativo em linear, após o parafuso se encontrar todo definido, carga axial aplicada não ultrapasse a carga axial

permitida e o tempo de vida seja de acordo o desejado, pode-se calcular esta transformação da seguinte forma. [26]

$$T_a = \frac{F_b \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot \eta_1} \quad (9)$$

A eficiência mecânica 1 pode ser obtida da seguinte forma.

$$\eta_1 = \tan \alpha / \tan(\alpha + \beta) \quad (10)$$

Onde o ângulo alfa e beta são dados pelas seguintes equações.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{l}{\pi \cdot D_m} \quad (11)$$

$$\beta = \tan^{-1} \mu, \text{ sendo } 0,003 < \mu < 0,01 \quad (12)$$

Enquanto o oposto, conversão do movimento linear em rotativo é calculado da seguinte forma.

$$T_c = \frac{F_b \cdot l \cdot \eta_2}{2 \cdot \pi} \quad (13)$$

A eficiência mecânica 2 pode ser obtida pela seguinte equação.

$$\eta_2 = \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha)} \quad (14)$$

Encontrando-se definido o parafuso de esferas é necessário validá-lo em relação à encurvadura, como no caso deste componente a carga encontra-se aplicada de forma centrada à validação segue o euro código 3 parte 1:1 [27]. Para ocorrer esta validação à seguinte condição tem de ser verdadeira.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (15)$$

Onde o valor da resistência à encurvadura do elemento comprimido é dado pela seguinte equação.

$$N_{b,Rd} = \frac{x \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (16)$$

O coeficiente de redução para o modo de encurvadura de compressão axial é calculado pela seguinte fórmula.

$$x = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (17)$$

Em que,

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_{imp}(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (18)$$

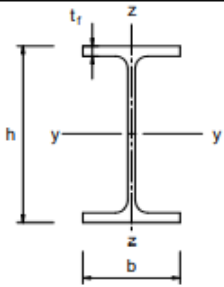
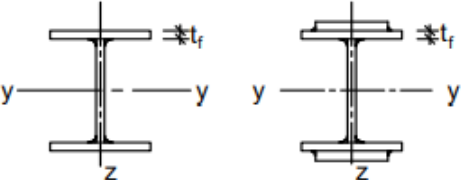

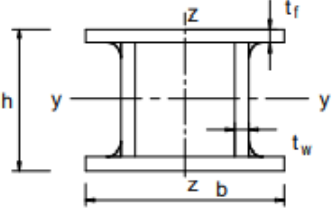
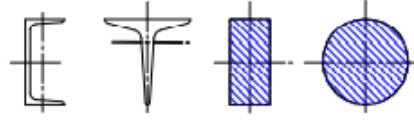
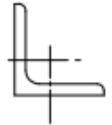
O fator de imperfeição depende da curva de encurvadura, sendo este valor dado pela Tabela 6.

Tabela 6 -Fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura. [27]

Curva de encurvadura	α_0	a	b	c	d
Fator de imperfeição	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

As curvas de encurvadura são dependentes da secção transversal, na Tabela 7 verifica-se as curvas correspondentes a cada tipo de secção.

Tabela 7 – Curva de encurvadura dependente da secção transversal. [27]

Secção transversal		Limites	Encurva- dura em relação ao eixo	Curva de encurvadura		
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
Perfis laminados		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm $40 \text{ mm} < t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	a b	α_0 α_0
				y-y z-z	b c	a a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ mm $t_f > 100$ mm	y-y z-z	b c	a a
				y-y z-z	d d	e c
Perfis I soldados		$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	b c	b c	
		$t_f > 40$ mm	y-y z-z	c d	c d	
Secções tubulares		acabadas a quente	qualquer	a	α_0	
		enformadas a frio	qualquer	c	c	
Secções em caixão soldadas		em geral (excepto como abaixo indicado)	qualquer	b	b	
		soldaduras espessas: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	qualquer	c	c	
Perfis U, T e secções cheias			qualquer	c	c	
Cantoneiras			qualquer	b	b	

Posto isto, a esbelteza normalizada é calculada da seguinte maneira.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (19)$$

Onde,

$$N_{cr} = \frac{E \cdot A \cdot \pi^2}{\lambda^2} \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{Le}{i} \quad (21)$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (22)$$

O comprimento efetivo, varia dependendo das condições de fronteira, sendo para o caso do tubo integrante considerado o seguinte.

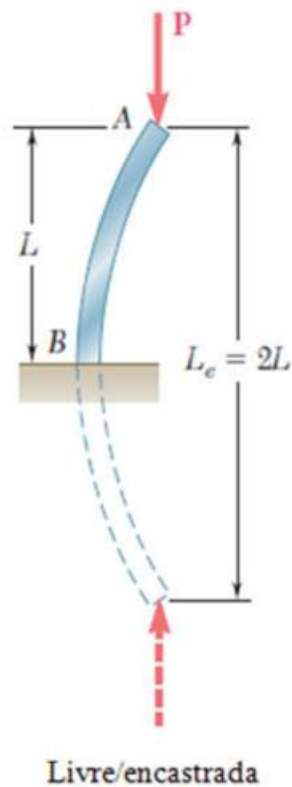


Figura 62 – Comprimento efetivo. [28]

Varões

A utilização do varão na ferramenta possui uma limitação referente à sua deformação, pretendendo-se que estes valores se encontrem dentro escala do micrómetro. Como se trata de um componente de grande dimensão, a sofrer forças compressivas, deve ser realizada uma verificação à encurvadura.

Primeiramente realiza-se o estudo da deformação uma vez que esta análise influencia o restante estudo.

A força exercida pela ferramenta não é diretamente aplicada nos varões, por tal é necessário obter a força excêntrica aplicada nestes. Na encontra-se uma ilustração de como se pode realizar este dimensionamento, onde a carga de ensaio W cria as cargas excêntricas, P_1, P_2, P_3 e P_4 nos diferentes varões.

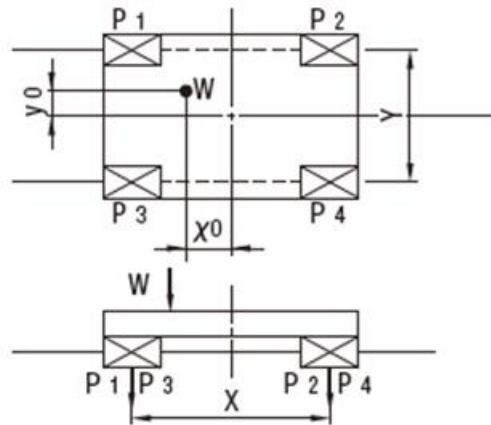


Figura 63 – Enunciado das cargas descentradas aplicadas nos varões. [29]

A partir desta simplificação a carga aplicada em cada varão é dada pelas seguintes equações onde, Y' e X' correspondem a distância entre os centros dos varões, enquanto y_0 e x_0 a distância da carga ao centro da placa. [29]

De modo a obter a carga existente em cada varão aplica-se as seguintes fórmulas.

$$P_1 = \frac{1}{4} W + \frac{x_0}{2X'} W + \frac{y_0}{2Y'} \quad (23)$$

$$P_2 = \frac{1}{4} W - \frac{x_0}{2X'} W + \frac{y_0}{2Y'} \quad (24)$$

$$P3 = \frac{1}{4}W + \frac{x_0}{2X'}W - \frac{y_0}{2Y'} \quad (25)$$

$$P4 = \frac{1}{4}W - \frac{x_0}{2X'}W - \frac{y_0}{2Y'} \quad (26)$$

Pela resolução das fórmulas acima descritas obtêm-se a carga excêntrica em cada varão pelo que se pode proceder ao cálculo do momento que estas forças causam. Para este procedimento considera-se que o varão se encontra duplamente encastrado, como se pode observar na Figura 64. [29]

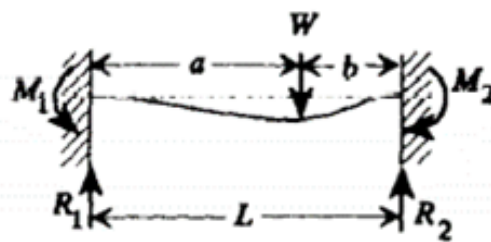


Figura 64 – Consideração para o cálculo do momento no varão. [29]

Esta consideração para o cálculo do momento pode ser encontrada no livro “*Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices*”. [29]

$$M1 = \frac{Wab^3}{L^2} \quad (27)$$

$$M2 = \frac{Wba^3}{L^2} \quad (28)$$

O momento do varão dá-se pela subtração, do momento causado pela carga do ensaio pelo momento excêntrico. Com o momento do varão pode-se calcular a sua deformação com o apoio do livro anteriormente referido [29], Figura 65. O valor da deformação pode ser obtido da seguinte forma.

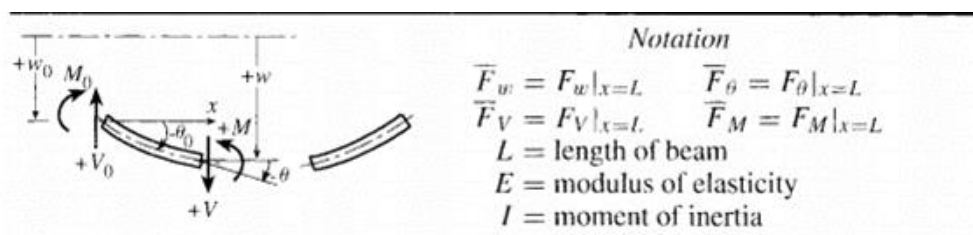


Figura 65 – Deformação do varão. [29]

$$w = w_0 - \theta_0 - V_0 \frac{x^3}{3!EI} - M_0 \frac{x^2}{2EI} + F_w \quad (29)$$

Como se trata de um encastramento duplo, as seguintes condições iniciais são iguais a zero.

$$w_0 = 0; \quad \theta_0 = 0;$$

Sendo as restantes dadas pelas seguintes equações.

$$V_0 = -\frac{12EI}{L^3} \overline{F_w} - \frac{6EI}{L^2} \overline{F_\theta} \quad (30)$$

$$M_0 = \frac{6EI}{L^2} \overline{F_w} + \frac{2EI}{L} \overline{F_\theta} \quad (31)$$

Como o carregamento é realizado através de um momento as restantes variáveis são dadas pelas seguintes equações.

$$F_w = \frac{c < x - a_c >^2}{2EI} \quad (32)$$

Caso x seja menor que a, F_w é igual a zero.

$$F_\theta = -\frac{c < x - a_c >}{2EI} \quad (33)$$

Caso x seja menor que a, F_θ é igual a zero, Figura 66.



Figura 66 – Carregamento através de um momento. [29]

Finalizando o cálculo da deformação inicia-se a verificação à encurvadura, sendo como no caso anterior é necessário realizar com uma carga excêntrica.

Numa verificação da encurvadura com este tipo de carregamento, a tensão normal é a resultante do esforço axial e do momento produzido, sendo que a tensão máxima aplicada não pode ultrapassar a tensão admissível. [28]

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P}{A} + \frac{M \times h/2}{I} \quad (34)$$

Existem dois métodos possíveis para realizar a verificação, o método da tensão admissível e o iterativo, optando-se pelo uso do método iterativo uma vez que é menos conservador. Neste método utilizam-se diferentes tensões admissíveis para o carregamento concêntrico e para o momento fletor. [28]

$$\frac{\frac{P}{A}}{(\sigma_{adm})_{centrica}} + \frac{\frac{M \times h/2}{I}}{(\sigma_{adm})_{flex\~ao}} \leq 1 \quad (35)$$

Como a carga excêntrica não se encontra em nenhum dos planos de simetria, o momento fletor pode-se decompor nas suas componentes M_x e M_z , Figura 67, o que resulta uma alteração na fórmula acima descrita. [28]

$$\frac{\frac{P}{A}}{(\sigma_{adm})_{centrica}} + \frac{\frac{M_x \times h_1/2}{I_x}}{(\sigma_{adm})_{flex\~ao}} + \frac{\frac{M_z \times h_2/2}{I_z}}{(\sigma_{adm})_{flex\~ao}} \leq 1 \quad (36)$$

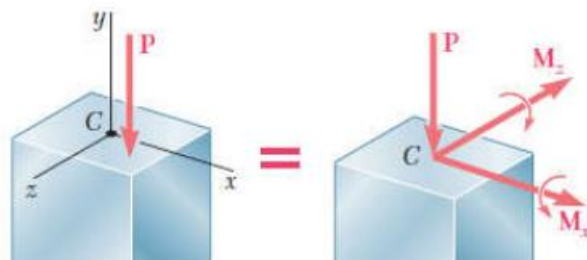


Figura 67 – Coluna sujeita a carregamento excêntrico a atuar fora dos planos de simetria [28]

$$P_{ct} = \sigma \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = 116d_1^2 \quad (37)$$

Casquilhos

Os casquilhos são um componente dependentes do diâmetro do varão, sendo o seu dimensionamento realizado com apoio de um catálogo da THK. [30]

Após a seleção do género de casquilho a utilizar (se é circular, quadrado, entre outras opções), da confirmação das medidas e do método de fixação, pode-se calcular o tempo de vida que o componente possui. Este cálculo é realizado pela seguinte equação.

$$L_v = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot f_C}{f_W} \cdot \frac{c_d}{P_c} \right)^3 \times 50 \quad (38)$$

Os fatores f_H , fator de rigidez, Gráfico 7, f_T , fator de temperatura, Gráfico 8, f_C , fator de contacto, Tabela 8, e f_W , fator de carga, Tabela 9. A carga dinâmica básica, c_d , é fornecida pelo fabricante assumindo 2160 N para casquilhos com flange e 882 N para casquilhos sem flange. [30]

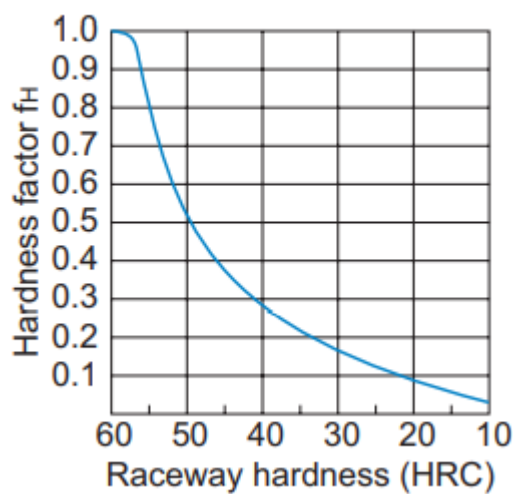


Gráfico 7 – Fator de rigidez f_H . [30]

Normalmente o valor deste fator é igual a 1 visto que existe rigidez suficiente.

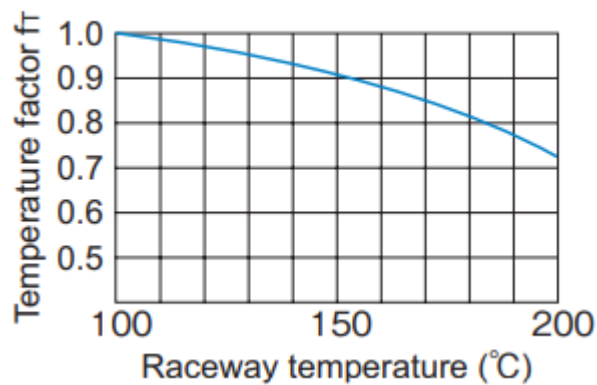


Gráfico 8 - Fator de temperatura f_T . [30]

Para caso de temperaturas inferiores a 100 graus assume-se este fator igual a 1.

Tabela 8 - Fator de contacto f_c . [30]

Número de casquilhos em contacto próximo	Fator de Contacto f_c
2	0.81
3	0.72
4	0.66
5	0.61
Uso Normal	1

Tabela 9 - Fator de carga f_w . [30]

Vibrações/Impacto	Velocidade (V)	f_w
Débil	Muito baixa, $V \leq 0.25 \text{ m/s}$	1 a 1.2
Fraca	Baixa, $0.25 < V \leq 1.00 \text{ m/s}$	1.2 a 1.5
Média	Média, $1.00 < V \leq 2.00 \text{ m/s}$	1.5 a 2
Forte	Alta, $V > 2.00 \text{ m/s}$	2 a 3

No caso da ocorrência de um carregamento com momento a carga P_c é substituída na equação por uma carga equivalente P_u , sendo esta carga obtida da seguinte forma. [30]

$$P_u = K \cdot M \quad (39)$$

Tubo integrante

O dimensionamento do tubo integrante é realiza por uma verificação à encurvadura, contudo neste caso a carga encontra-se aplicada de forma centrada. Este cálculo segue o euro código 3 parte 1:1 encontrando-se já explicado no ponto do parafuso de esferas.

Guia Linear

Para a utilização de uma guia linear a carga aplicada ou o momento aplicado não podem ser superior a resistência da guia, esta condição encontra-se descrita nas seguintes equações. [31]

$$P \leq \frac{C_o}{f_s} \quad (40)$$

$$M \leq \frac{(M_a, M_b, M_c)}{f_s} \quad (41)$$

O fator de segurança é retirado da Tabela 10. [31]

Tabela 10 – Fatores de segurança da guia linear. [31]

Condições de uso	Limites inferiores de f_s
Condições de operação normais	1 a 2
Quando bom desempenho é requerido	2 a 4
Com existência de vibrações e impacto	3 a 5

O cálculo do tempo de vida nominal da guia, ou seja, o a distância total percorrida onde 90% das guias lineares é capaz de alcançar sem sinais de dano é dada pela seguinte equação.

$$L_v = \left(\frac{f_H + f_T + f_C}{f_W} \cdot \frac{c_e}{P_c} \right)^3 \times 50 \quad (42)$$

Neste caso o fator de dureza é dado pelo Gráfico 9.

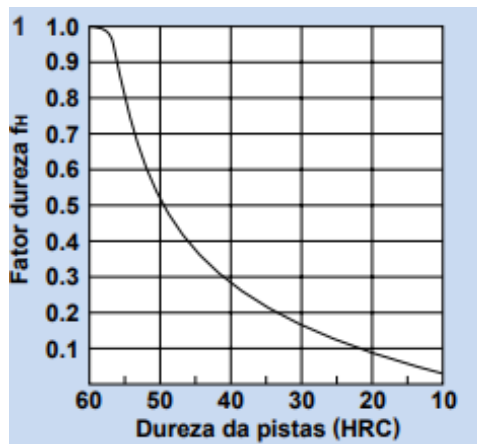


Gráfico 9 – Fator de dureza para as guias lineares [31]

O fator de temperatura é retirado do Gráfico 10.

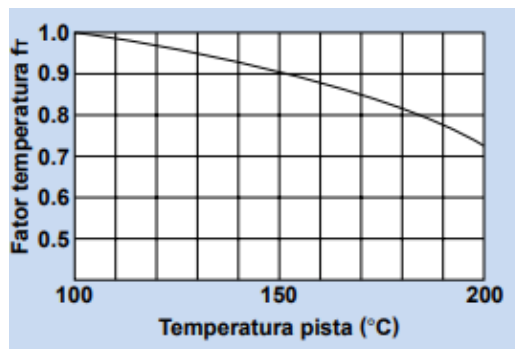


Gráfico 10 – Fator de temperatura para as guias lineares [31]

O fator de contacto é lido através da Tabela 11.

Tabela 11 – Fator de contacto de uma guia linear. [31]

Número de blocos utilizados encostados	Fator de contacto
2	0,81
3	0,72
4	0,66
5	0,61
6 ou mais	0,6
Uso normal	1

O fator de carga é retirado da seguinte tabela.

Tabela 12 – Fator de carga para guia linear. [31]

Vibração/impacto	Velocidade	f_w
Muito fraco	Muito lenta, $v \leq 0,25 \text{ m/s}$	1 a 1.2
Fraco	Lenta, $0,25 < v \leq 1 \text{ m/s}$	1.2 a 1.5
Moderado	Média, $1 < v \leq 2 \text{ m/s}$	1.5 a 2
Forte	Rápida, $v > 2 \text{ m/s}$	2 a 3.5

A carga estática básica, C_e , é fornecida pelo fabricante sendo para o caso do projeto de 8600 N.

Rolamentos

O dimensionamento de um rolamento dependendo da carga suportada por este, para rolamentos cuja carga aplicada é puramente axial, esta não deverá ser superior a 0,5 da capacidade de carga estática. [32]

Anilhas

Para as anilhas aplicadas no projeto apenas se verifica se a tensão aplicada nestas não ultrapassa a tensão de cedência das mesmas à compressão.

Volante

O dimensionamento do volante trata-se de calcular o diâmetro ótimo para o utilizador operar com menos força possível a ferramenta.

Após o dimensionamento do parafuso de esferas obtêm-se o momento necessário introduzir na ferramenta, pelo que através da seguinte fórmula é possível realizar várias iterações de modo a escolher o diâmetro ótimo.

$$M = F \times r \quad (43)$$

Pelo catálogo de um fornecedor verifica-se os diâmetros existentes e aplicam-se os vários raios na equação conhecendo o valor da força correspondente.

Chaveta

A chaveta é um componente mecânico que impede a rotação relativa entre duas peças permitindo a passagem de torque. Para o dimensionamento a chaveta opta-se pelo uso de um tipo A como se pode observar na seguinte figura.

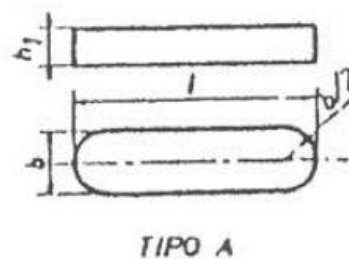


Figura 68 – Chaveta do tipo A. [33]

O carregamento a que uma chaveta se encontra sujeita na sua utilização é apresentada na Figura 69, assim como as suas dimensões.

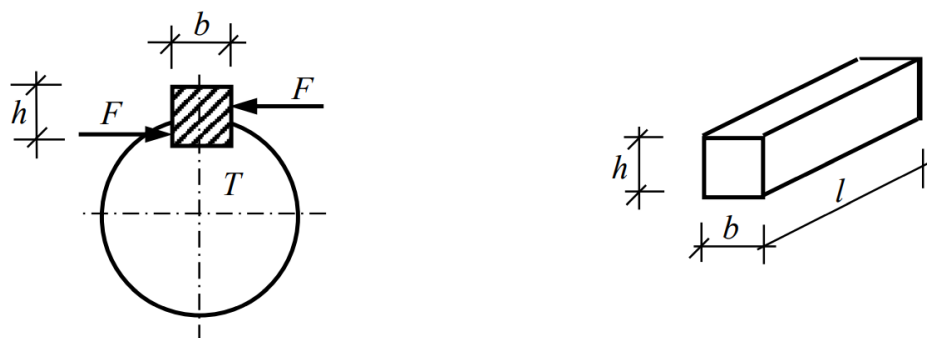


Figura 69 – Carregamento e dimensões de uma chaveta. [33]

A força F é criada pelo momento tórsor aplicado na chaveta, sendo por isso que pela equação do momento se pode calcular a força aplicada. [33]

$$T = F \times r = F \times \frac{d}{2} \approx F = \frac{2T}{d} \quad (44)$$

Através da força exercida pode-se calcular as tensões aplicadas na chaveta, tanto a tensão de compressão, esmagamento superficial, como a de corte. [33]

$$\sigma = \frac{4 \cdot T}{d \cdot l \cdot h} \quad (45)$$

$$\tau = \frac{2 \cdot T}{d \cdot l \cdot b} \quad (46)$$

Caso exista mais de uma chaveta aplicada é importante ter em consideração um fator de sobrecarga e obter o binário aplicado em cada chaveta. Na seguinte tabela pode-se obter a informação necessária para esta consideração. [33]

Tabela 13- Fator de sobrecarga e binário de cálculo por chaveta. [33]

Nº de chavetas	Fator de sobrecarga	Binário de cálculo por chaveta
2	0,20	$\frac{T}{2} + 0,2 \frac{T}{2} = 0,6T$
3	0,15	$\frac{T}{3} + 0,15 \frac{T}{3} = 0,383T$
≥ 4	0,10	$\frac{T}{n} + 0,10 \frac{T}{n}$

Para a obtenção das dimensões da chaveta, apresentadas na Figura 69, interpretam-se as Tabela 14 e Tabela 15, onde é necessário entrar com o diâmetro do veio onde se encontra a chaveta aplicada

Tabela 14 – Dimensões das chavetas conforme o diâmetro do veio. [33]

Dimensões em mm

Aplicabilidade	d		Chaveta		Escatéis				Desvios	
	de	a	b (*)	h	t	t _i	t'	t _i '	de t e t'	de t _i e t _i '
Veios cilíndricos ou veios cônicos com chavetas paralelas à geratriz Veios cônicos com chaveta paralela ao eixo	6	8	2	2	d- 1,1	d+ 1,0	1,2	d _i + 0,9	+0,1 0	+0,1 0
	8	10	3	3	d- 1,7	d+ 1,4	1,8	d _i + 1,3		
	10	12	4	4	d- 2,4	d+ 1,7	2,5	d _i + 1,7		
	12	17	5	5	d- 2,9	d+ 2,2	3	d _i + 2,2		
	17	22	6	6	d- 3,5	d+ 2,6	3,5	d _i + 2,7	+0,2 0	
	22	30	8	7	d- 4,1	d+ 3	4	d _i + 3,2		
	30	38	10	8	d- 4,7	d+ 3,4	4,5	d _i + 3,7		
	38	44	12	8	d- 4,9	d+ 3,2	4,5	d _i + 3,7		
	44	50	14	9	d- 5,5	d+ 3,6	5	d _i + 4,2		
	50	58	16	10	d- 6,2	d+ 3,9	5	d _i + 5,2		
	58	65	18	11	d- 6,8	d+ 4,3	6	d _i + 5,3		
	65	75	20	12	d- 7,4	d+ 4,7	6	d _i + 6,3		
	75	85	22	14	d- 8,5	d+ 5,6	7	d _i + 7,3	+0,2 0	
	85	95	25	14	d- 8,7	d+ 5,4	7	d _i + 7,3		
	95	110	28	16	d- 9,9	d+ 6,2	8	d _i + 8,3		
	110	130	32	18	d- 11,1	d+ 7,1	9	d _i + 9,3		
	130	150	36	20	d- 12,3	d+ 7,9	10	d _i + 10,3	+0,3 0	
	150	170	40	22	d- 13,5	d+ 8,7	11	d _i + 11,3		
	170	200	45	25	d- 15,3	d+ 9,9	13	d _i + 12,3		
	200	230	50	28	d- 17	d+ 11,2	14	d _i + 14,3	+0,3 0	+0,3 0
	230	260	56	32	d- 19,3	d+ 12,9	16	d _i + 16,3		
	260	290	63	32	d- 19,6	d+ 12,6	16	d _i + 16,4		
	290	330	70	36	d- 22	d+ 14,2	18	d _i + 18,4		
	330	380	80	40	d- 24,6	d+ 15,6	20	d _i + 20,4		
380	440	90	45	d- 27,5	d+ 17,7	23	d _i + 22,4			
440	500	100	50	d- 30,4	d+ 19,8	25	d _i + 25,4			

Com as dimensões da chaveta, b e h, pode-se retirar o comprimento da mesma pela Tabela 15.

Tabela 15 – Dimensão do comprimento da chaveta. [33]

Dimensões em mm.

b (*)	h ₁	h ₂	l		b (*)	h ₁	h ₂	l	
			de	a				de	a
2	2		6	20	25	14	9	70	280
3	3		6	36	28	16	10	80	320
4	4		8	45	32	18	11	90 (*)	360
5	5	3	10 (*)	56	36	20	12	100	400
6	6	4	14	70	40	22		110	400
8	7	5	18	90	45	25		125	400
10	8	6	22	110	50	28		140	400
12	8	6	28	140	56	32			
14	9	6	36	160	63	32			
16	10	7	45	180	70	36			
18	11	7	50	200	80	40			
20	12	8	56	220	90	45			
22	14	9	63	250	100	50			

Os comprimentos de chavetas com largura superior a 50 mm são fixados em cada caso.

Com as dimensões totalmente definidas aplica-se as fórmulas anteriormente apresentadas, verificando o comprimento mínimo permitido para a chaveta. Com este valor observa-se os

comprimentos normalizados, Tabela 16, caso o valor mínimo coincida com um normalizado esse é escolhido, caso contrário opta-se pelo valor imediatamente acima.

Tabela 16 – Comprimentos normalizados para uma chaveta. [33]

Comprimento l (mm)	Desvios (mm)
6-8-10-12-14-16-18-20-22-25-28	0 -0,2
32-36-40-45-50-56-63-70-80	0 -0,3
90-100-110-125-140-160-180-200-220-250-280-320-360-400	0 -0,5

Parafusos

O dimensionamento de um parafuso segue o Euro código 3, mais propriamente a parte 1:8, capítulo 3, a partir destes cálculos é possível indicar se a classe ou diâmetro escolhidos para um parafuso podem ser aplicados num determinado local. [27]

Inicialmente é necessário verificar o tipo de esforço a que o parafuso se encontra sujeito, podendo estar ao corte ou tracionado.

No caso das ligações aparafusadas ao corte, estas são distinguidas em três categorias, a categoria A é referente a uma resistência ao esmagamento, onde o valor do cálculo do esforço no estado limite último não pode exercer o valor de cálculo da resistência ao corte, possuindo as classes 4.6 a 10.9, inclusive. A categoria B serve para as ligações resistentes ao escorregamento no estado limite de utilização, onde o valor da força de corte no estado limite de utilização não pode ser superior ao valor da resistência ao corte. Por fim, a categoria C, alude a ligações resistente ao escorregamento no estado limite último, sendo que neste caso, o valor do cálculo da resistência ao esmagamento não pode ser superior ao valor do cálculo da resistência ao esmagamento. [27]

Por sua vez, as ligações tracionadas encontram-se divididas em duas categorias, categoria D e E. A categoria D é referente a ligações não pré-esforçadas e engloba as classes de parafuso 4.6 a 10.9. A categoria E é para ligações pré-esforçadas e devem ser aplicadas para classes 8.8 e 10.9 com aperto controlado. [27]

Neste projeto os parafusos são enquadrados nas categorias A e E, sendo que para se encontrarem validados as seguintes condições devem ocorrer. As primeiras duas equações são referentes a categoria a e as restantes a categoria E. [27]

$$F_{V.Ed} \leq F_{V.Rd} \quad (47)$$

$$F_{V.Ed} \leq F_{b.Rd} \quad (48)$$

$$F_{t.Ed} \leq F_{t.Rd} \quad (49)$$

$$F_{t.Ed} \leq B_{p.Rd} \quad (50)$$

O cálculo da resistência ao corte por plano de corte pode ser obtido pela seguinte equação.

$$F_{V.Rd} = \frac{\alpha_V \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} \quad (51)$$

Caso o plano de corte atravessa a parte roscada do parafuso a área A corresponde à área da secção resistente do parafuso A_s . O valor de α_V é dependente da classe do parafuso, sendo que para as classes 4.6, 5.6 e 8.8, têm-se que $\alpha_V = 0,6$, e para as classes 4.8, 5.8, 6.8 e 10.9 este valor é $\alpha_V = 0,5$. [27]

A resistência ao esmagamento é dada da seguinte forma. [27]

$$F_{b.Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (52)$$

O valor de α_b é dado pelo menor valor entre $\alpha_d, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1,0$. Sendo que α_d é dado pelas seguintes equações.

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0}, \text{ parafusos exteriores} \quad (53)$$

O valor de k_1 é o menor dos seguintes valores

$$2,8 \frac{e_2}{d_0}; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5$$

As distâncias e_1 , e_2 e p_2 são observadas na seguinte figura.

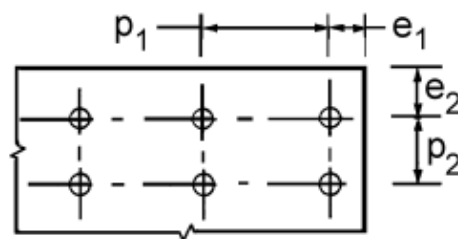


Figura 70 – Distância para os eixos dos furos. [27]

A resistência à tração é calculada da seguinte forma.

$$F_{t.Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (54)$$

Onde k_2 assume um valor de 0,63 para parafusos com cabeça de embeber e para outros casos de 0,9.

A resistência ao punçamento é obtida através da seguinte equação. [27]

$$B_{p.Rd} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot f_b \cdot t_p}{\gamma_{M2}} \quad (55)$$

Caso um parafuso se encontre a tração e ao corte, além de ser necessário verificar-se as condições impostas nas equações (47), (48), (49) e (50), é também preciso se validar a seguinte verificação.

$$\frac{F_{V.Ed}}{F_{V.Rd}} + \frac{F_{t.Ed}}{1,4 \cdot F_{t.Rd}} < 1 \quad (56)$$

A variável γ_{M2} aparece ao longo das variadas equações, sendo uma constante com o valor de 1,25. Os valores nominais da tensão de cedência e tensão à rotura de um parafuso tendo em conta a classe apresentam-se na Tabela 17.

Tabela 17 – Valores nominais da tensão de cedência e da tensão de rotura à tração [27]

Classe Parafuso	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
$f_{yb}(N/mm^2)$	240	320	300	400	480	640	900
$f_{ub}(N/mm^2)$	400	400	500	500	600	800	1000

Caso se realize as verificações sabe-se que o parafuso suporta as cargas aplicadas, contudo não garante que consegue comprimir peças/membros a ligar com uma força de aperto inicial. [33] Estes casos podem ser ilustrados pela Figura 69.

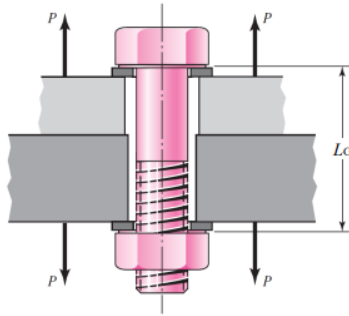


Figura 71 – Carregamento aplicado de forma a separar um conjunto unido por um parafuso. [33]

Para a separação dos componentes não ocorrer o valor de n_o tem de ser superior a 1. [33]

$$n_o = \frac{F_i}{P(1 - C)} \quad (57)$$

O valor da pré tensão aplicada no parafuso por aperto é determinada pela resistência do parafuso sendo obtido da seguinte forma, dependendo se a ligação é permanente ou não, por tal razão a equação (58) corresponde a uma ligação não permanente enquanto a equação (59) a uma ligação permanente. [33]

$$F_i = 0,75 \cdot F_p \quad (58)$$

$$F_i = 0,90 \cdot F_p \quad (59)$$

A força de prova é dada pela seguinte forma.

$$F_p = A_t \cdot S_p \quad (60)$$

Sendo a tensão de prova dada pela Tabela 18.

Tabela 18 - Propriedades de resistência de um parafuso de cabeça sextavada exterior. [33]

Classe métrica	Gama de dimensões	Tensão de prova (MPa)	Tensão de rotura (MPa)	Tensão de cedência (MPa)	Material	Designação do parafuso
4.6	M5-M36	225	400	240	Aço-Baixo teor de Carbono	4.6
4.8	M1,6-M16	310	420	340	Aço-Baixo teor de Carbono	4.8
5.8	M5-M24	380	520	420	Aço-Baixo teor de Carbono	5.8
8.8	M1,6-M36	600	830	660	Aço-Médio teor de Carbono TT	8.8
9.8	M1,6-M66	650	900	720	Aço-Médio teor de Carbono TT	9.8
10.9	M5-M36	830	1040	940	Aço-Liga de baixo teor de Carbono TT	10.9
12.9	M1,6-M36	970	1220	1100	Aço-Liga TT	12.9

A fração da carga exterior suportada pelo parafuso é calculada pela seguinte equação.

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (61)$$

O cálculo da rigidez das peças membros a ligar é complexo de se realizar, visto que a área de compressão não é uniforme e não se consegue obter com exatidão a área resistente, por tal motivo utiliza-se o método do cone de pressão, Figura 72. [33]

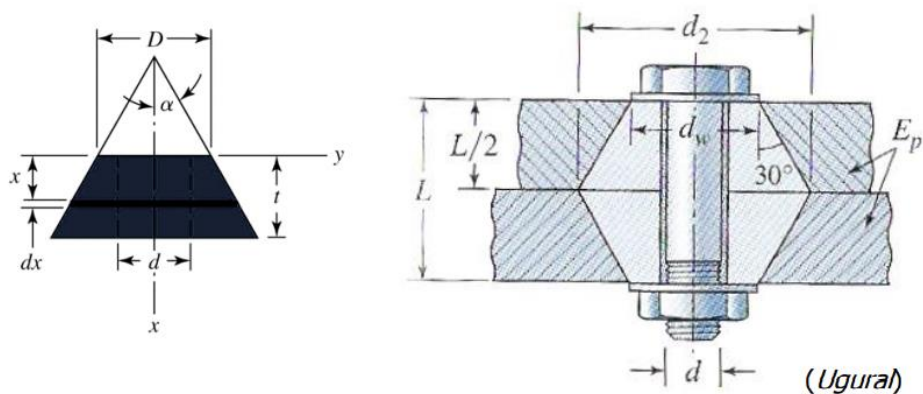


Figura 72 – Método cone de pressão. [33]

Este método assume que as tensões induzidas na ligação são uniformes na zona próxima ao furo do parafuso, sendo que para um $\alpha = 30^\circ$ a constante de rigidez pode ser obtida da seguinte forma. [33]

$$k = \frac{0.5774 \cdot \pi \cdot E \cdot d}{\ln\left(\frac{(1.1155t + D - d)(D + d)}{(1.1155t + D - d)(D - d)}\right)} \quad (62)$$

Esta equação pode ser resolvida membro a membro, sendo posteriormente se pode somar os vários resultados.

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (63)$$

Contudo, existem algumas simplificações, caso as ligações sejam do mesmo material, módulo de elasticidade igual, e agrupados de forma semelhantes, mesma espessura, assume-se que os membros funcionam como molas.

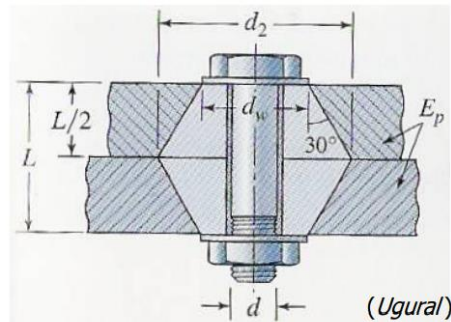


Figura 73 – Caso de simplificação do método do cone de pressão. [33]

Sendo assim, a constante de rigidez dos membros pode assumir a seguinte equação. [33]

$$k_m = \frac{\pi \cdot E \cdot d \cdot \tan \alpha}{2 \ln\left(\frac{(l \cdot \tan \alpha + d_w - d)(d_w + d)}{(l \cdot \tan \alpha + d_w - d)(d_w - d)}\right)} \quad (64)$$

Caso sejam utilizados parafusos normalizados de cabeça sextavada, o diâmetro da cabeça do parafuso, d_w , é maior em 50% que o diâmetro nominal, posto isto, considerando que $d_w = 1,5d$ e $\alpha = 30^\circ$, a equação (64) toma a seguinte forma.

$$k_m = \frac{0.5774 \cdot \pi \cdot E \cdot d}{2 \ln\left(5 \frac{0.5774 \cdot l + 0.5d}{0.5774 \cdot l + 2.5d}\right)} \quad (65)$$

O parafuso normalmente encontra-se dividido numa parte lisa e noutra roscada, sendo que as diferentes rigidezes têm de ser levadas em consideração.

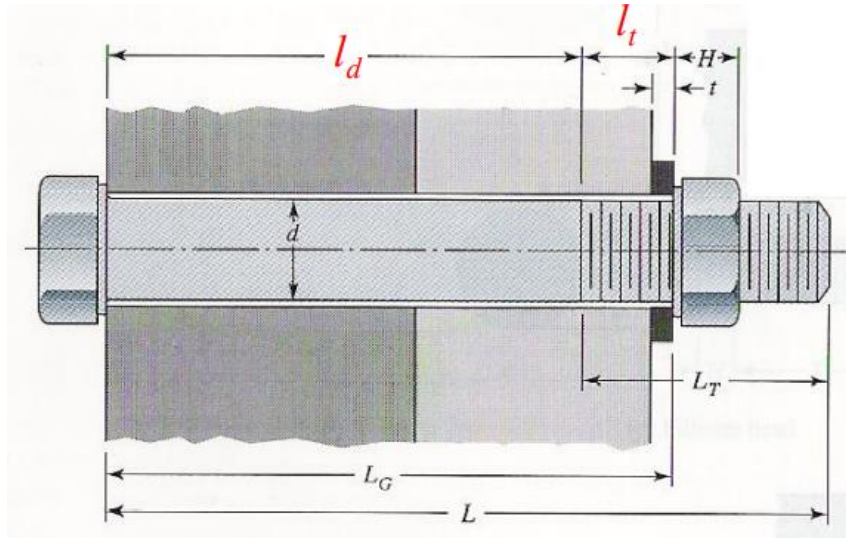


Figura 74 – Simbologia utilizada para a parte lisa e rosca do parafuso. [33]

Portanto a rigidez de um parafuso é equivalente à rigidez de duas molas em série. A rigidez da parte rosca é obtida da seguinte maneira.

$$k_t = \frac{A_t \cdot E}{l_t} \quad (66)$$

A área da resistente à tração é retirada da Tabela 19.

Por sua vez, a rigidez da parte lisa é dada pela seguinte equação. [33]

$$k_d = \frac{A_d \cdot E}{l_d} \quad (67)$$

A área da parte lisa do parafuso é retirada da seguinte forma.

$$k_d = \frac{A_d \cdot E}{l_d} \quad (68)$$

Da mesma forma que se realiza a soma de duas molas em série pode-se somar a rigidez das diferentes partes do parafuso, obtendo-se a seguinte equação.

$$k_b = \frac{A_d \cdot A_t \cdot E}{A_d \cdot l_d + A_t \cdot l_t} \quad (69)$$

Tabela 19 – Propriedades mecânicas de parafusos de rosca métrica. [33]

Diâmetro nominal <i>d</i> (mm)	Rosca de passo normal			Rosca de passo fino		
	Passo	Área resistente à tração	Área do núcleo	Passo	Área resistente à tração	Área do núcleo
	<i>p</i> (mm)	<i>A_t</i> (mm ²)	<i>A_r</i> (mm ²)	<i>p</i> (mm)	<i>A_t</i> (mm ²)	<i>A_r</i> (mm ²)
1,6	0,35	1,27	1,07			
2	0,40	2,07	1,79			
2,5	0,45	3,39	2,98			
3	0,5	5,03	4,47			
3,5	0,6	6,78	6,00			
4	0,7	8,78	7,75			
5	0,8	14,2	12,7			
6	1	20,1	17,9			
8	1,25	36,6	32,8	1	39,2	36,0
10	1,5	58,0	52,3	1,25	61,2	56,3
12	1,75	84,3	76,3	1,25	92,1	86,0
14	2	115	104	1,5	125	116
16	2	157	144	1,5	167	157
20	2,5	245	225	1,5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3,5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4,5	1120	1050	2	1260	1230
48	5	1470	1380	2	1670	1630
56	5,5	2030	1910	2	2300	2250
64	6	2680	2520	2	3030	2980
72	6	3460	3280	2	3860	3800
80	6	4340	4140	1,5	4850	4800
90	6	5590	5360	2	6100	6020
100	6	6990	6740	2	7560	7470
110				2	9180	9080

Estrutura da Mesa

A mesa é o suporte da ferramenta sendo que terá de suportar todo o seu peso, para os cálculos apenas se irá considerar a superfície da mesa, verificando o estado limite de compressão,

Para este estudo aplica-se o Euro código 3, parte 1:1, capítulo 6.4.2, onde um componente consegue suportar os esforços de compressão realizados caso a seguinte condição se verifique, a fração do esforço atuante com o esforço resistente seja menor ou igual a 1. [27]

$$\frac{N_{ED}}{N_{C,RD}} \leq 1 \quad (70)$$

Sendo que o esforço resistente é dado pela seguinte equação.

$$N_{C,RD} = \frac{A \times F_y}{\gamma_{M0}} \quad (71)$$

Nestes casos os furos de ligações não necessitam de ser considerados desde que estes se encontrem preenchidos por elementos de ligação, excetuando em casos de furos sobredimensionados ou ovalizados conforme a norma EN1090. [27]

Encontrando-se a tampa da mesa verificada à compressão, realiza-se uma validação da estrutura já existente, iniciando-se com uma validação das pernas à encurvadura. Como nesta validação a carga encontra-se centrada o processo este processo encontra-se descrito no ponto do parafuso de esferas.

Validadas as pernas à encurvadura verifica-se a estabilidade da estrutura, isto é, se a ferramenta em movimento consegue suportar o seu peso e não tombar. Para tal não acontecer a seguinte condição tem de ser verdadeira.

$$Carga\ estática \times altura \leq Peso\ Próprio \times distância\ à\ roda \quad (72)$$

5. PROJETO FERRAMENTA

Neste capítulo realiza-se a especificação da ferramenta, esta foi idealizada no capítulo anterior, sendo que neste efetua-se a definição, escolha de dimensões, componentes, entre outros, encontrando-se também o dimensionamento, os desenhos técnicos, a orçamentação e um estudo da deformação causada numa cama de agulhas.

5.1 Definição da ferramenta

Este subcapítulo serve para definir todas as variáveis que o pré projeto, capítulo 3.2 não esclareceu, como é o caso do comprimento e diâmetro do parafuso de esferas, diâmetro de varões, tipo de parafusos de ligação, entre outros. Esta definição, de forma a permitir uma melhor organização e perceção do conteúdo, encontra-se realizada em várias tabelas divididas pelos diversos subconjuntos.

Na ferramenta opta-se pelo uso de apenas uma classe de parafusos, das classes existentes e de modo a não encarecer o projeto, utilizar-se-á a classe 8.8 que possui uma boa ductilidade e boa resistência sendo a mais comum no mercado.

Força de ensaio

A definição da ferramenta inicia-se pelos componentes pertencentes à força de ensaio, este subsistema pode ser encontrado na Figura 48, estando as suas características propostas na Tabela 20.

Tabela 20 – Características propostas para os componentes existentes na força de ensaio.

Componente	Características propostas
Célula de carga	De forma a possibilitar diversos tipos de ensaios no futuro sugere-se uma célula do tipo compressão e tração. A célula a escolher deve possuir um alcance de força até 10 kN possuindo um erro associado de 0,5%.
Parafuso de esferas	<p>Para o parafuso de esferas propõem-se uma classe C5, uma vez que combina o preço um erro associado aceitável. Em relação à folga axial opta-se pelo tipo G1 (0-0,01) sendo esta satisfatória, folgas mais baixas implicariam um custo mais elevado. Para este parafuso sugere-se para a parte roscada um diâmetro de 25 mm com um avanço de 10 mm, possuindo um comprimento de 580 mm (comprimento necessário a executar o curso da ferramenta). Na parte lisa opta-se por um diâmetro de 20 mm com um comprimento de 105 mm, valor necessário a agrupar diversos componentes, como por exemplo, rolamentos, placa externa, entre outros. No fim de curso do parafuso aplica-se uma porca que evita a saída do casquilho do parafuso.</p> <p>Para o casquilho propõem-se do tipo flange quadrada, com o um diâmetro interno de 25 mm e um diâmetro externo de 47 mm.</p>
Placa interna-aplicação de força	<p>Para esta placa retangular opta-se pelas dimensões 646x646x56 mm, com um rasgo centrado de 446x546x30 mm. Neste rasgo encontram-se aplicados nos quatro cantos um furo M15 com 20 mm de profundidade. A placa deve possuir quatro furos passantes de 60 mm, que acomodam os casquilhos de esferas lineares, sendo que para a fixação destes são realizados dezoito furos M9 com 20 mm de profundidade no lado oposto ao rasgo.</p> <p>Para a aplicação desta placa nos patins, a superfície inferior possui oito furos M4 com um comprimento de 23 mm.</p> <p>De modo a fixar a célula de carga nesta placa é realizado um furo central de 10 mm de diâmetro com uma profundidade de 10 mm, para a entrada da peça adaptadora, e quatro furos M6.</p>

Componente	Características propostas (continuação)
Placa de suporte do impactador (a) Figura 49	Esta placa para o suporte do impactador será a primeira a ser introduzida no rasgo da placa interna, pelo que possui às dimensões deste, 446x546x10 mm. A placa encontra-se com vários furos M8 para fixação do punção. Existindo ainda nos cantos quatro furos de diâmetro 15.5 para a passagem dos parafusos M14.
Placa de suporte do impactador (b) Figura 49	Esta placa para o suporte do impactador será a última a ser introduzida no rasgo da placa interna, pelo que possui às dimensões deste, 446x546x20 mm. A placa encontra-se com vários furos com 20 mm de diâmetro para suporte do punção. Existindo ainda nos cantos quatro furos de diâmetro 15.5 para a passagem dos parafusos M14.
Peça adaptadora da célula de carga (a) Figura 45	Esta peça encontra-se dividida em duas secções, a secção que conecta na placa interna tratando-se de um cilindro com diâmetro de 20 mm e um comprimento de 5 mm, e a secção que permanece no exterior da placa sendo um cilindro com diâmetro de 30 mm e um comprimento de 15 mm. Nesta parte encontra-se aplicado um furo central M10x10, para fixação da célula de carga, e quatro furos passantes M5 para fixação à placa.
Peça adaptadora da célula de carga (b) Figura 46	Para a peça adaptadora da célula de carga (b) sugere-se que seja realizada a partir de um varão hexagonal de distância entre faces de 36 mm. Esta peça possuiria duas secções, a que efetua a ligação com a célula de carga manteria o perfil do varão com um furo centrado M10x17mm. A segunda secção teria uma forma cilíndrica com um diâmetro de 24 mm, sendo este todo roscado de forma a fixar-se ao tubo integrante.
Tubo integrante Figura 46 (À esquerda)	O tubo integrante deve possuir um comprimento de 530 mm, de forma que a ferramenta tenha o comprimento útil necessário. Este componente como já foi referido possui dois diâmetros, sugerindo o menor de diâmetro menor de 47 mm, entrada da peça adaptadora da célula de carga, e o de 57 mm, ligação à flange do parafuso de esferas. Esta peça tem um rasgo para aplicar uma chaveta, tendo este 14 mm de comprimento, 10 mm de largura e 2 mm de altura.

Componente	Características propostas
Suporte do tubo integrante Figura 47	<p>O suporte do tubo integrante trata-se de uma junção de quatro componentes, dois ligadores em L e duas chapas metálicas quadradas.</p> <p>A peça em L possui um comprimento de 500 mm, uma largura de 140 mm, uma espessura de 5 mm e 22 mm de altura. Na plataforma desta peça encontra-se a ligação à placa realizada por dois parafusos M10.</p> <p>As chapas metálicas são de 140x140x10 mm e liga-se às peças em L através de 6 parafusos M5, sendo aplicados 3 na face superior e 3 na inferior. Ambas as chapas possuem um furo centrado com 77 mm de diâmetro, sendo que uma ainda irá possuir um rasgo para à chaveta indicada no componente anterior.</p>
Rolamento Axial de esferas [34]	<p>Para os rolamentos axiais de esferas propõem-se do tipo de escora simples tendo um diâmetro de furo de 20 mm, um diâmetro externo de 40 mm e uma altura de 14 mm. Estes devem ter uma capacidade de carga dinâmica básica de 21,2kN e uma capacidade de carga estática básica de 37,5 kN.</p>
Anilha	<p>As anilhas devem possuir um diâmetro interno de 20 mm, de modo a entrarem no parafuso de esferas. As anilhas encontram-se aplicadas contra os rolamentos pelo que se propõem um diâmetro externo de 40 mm e uma espessura de 5 mm.</p>
Porca de fixação Figura 42	<p>A porca de fixação é uma peça composta por dois componentes, uma porca e uma arruela com chaveta. Ambas possuem um diâmetro interno de 20 mm, sendo que a porca tem um diâmetro externo de 32 mm. A chaveta por esta utilizada possui uma largura de 4 mm e uma altura de 2 mm.</p>
Volante [35]	<p>O volante a utilizar deve ter um diâmetro interno de 20 mm, diâmetro do parafuso de esferas, e propõem-se um diâmetro externo de 250 mm, para facilitar a aplicação de carga.</p>
Placa Externa – Origem de Força	<p>Para esta placa sugere-se uma dimensão de 696x696x56 mm, tendo na sua face de contacto com a mesa aplicados cinco furos M20x70 mm. Além destes, aplica-se um furo central com 32 mm de diâmetro para a entrada do parafuso de esferas e de um casquilho de esferas. Por fim é necessário aplicar quatro furos com 40 mm de diâmetro para a passagem dos varões.</p>

Fixação das Placas

Neste ponto aborda-se os componentes que permitem fixar à placa externa-obtenção de dados com a placa interna-suporte de provete.

Tabela 21 - Características propostas para os componentes existentes na fixação das placas

Componente	Características propostas
Placa Interna – Suporte de Objeto	<p>Para esta placa opta-se pelas dimensões de 646x646x56mm com um rasgo retangular centrado passante com 380x514mm, sendo os cantos deste rasgo arredondados com um raio de 10mm. De modo a aplicar os casquilhos, realizam-se quatro furos com diâmetro de 60 mm, sendo que para a fixação a placa possui sessêsseis furos M8 com 20 mm de profundidade.</p> <p>A junção desta placa aos patins da guia linear é efetuada por oito furos de M4, realizados na superfície inferior da placa.</p> <p>De forma a ocorrer à fixação de placas, esta placa possui nos tops dois furos com diâmetro de 9 mm, para se aplicar um parafuso M8, e nas laterais um furo de diâmetro de 13 mm, para acomodar um parafuso M12.</p> <p>Para se aplicar a placa adaptadora sugere-se aplicar junto ao rasgo 8 furos M12 lateralmente, 4 em cada lado, com 15 mm de profundidade que permite a ligação da placa adaptadora da cama de agulhas à placa interna.</p>
Placa Externa – Obtenção de dados	<p>Para esta placa sugere-se dimensões de 696x696x56 com um rasgo retangular passante centrado de 456 de comprimento e 536 mm de largura, encontrando-se os cantos deste arredondados com um raio de 10 mm. São aplicados quatro furos passantes de 40 mm para a aplicação dos varões, e na parte inferior da placa encontra-se aplicados 5 furos M20 para a ligação da placa com a mesa. Finalizando encontram-se em cada topo 3 furos, sendo o central um M12 e os das extremidades M8, em cada parte lateral aplicam-se também 3 furos, sendo o do furo central para um M12 e os restantes M8.</p>
Placa Batente (Lateral)	<p>Para as chapas batentes aplicadas lateralmente sugere-se um comprimento de 235 mm, uma largura de 74 mm e uma espessura de 14 mm.</p>

Figura 51	
Placa Batente (Topos) Figura 51	As chapas batentes utilizadas nos topos possuem um comprimento de 40 mm, uma largura de 246 mm e com uma espessura de 14 mm.
Placa adaptadora Figura 53	A placa adaptadora é a junção de quatro chapas metálicas retangulares, sendo laterais 442x110x15 mm e as de topo 20x574x15 mm. As chapas laterais têm de possuir o método de fixação da cama de agulhas e 4 furos laterais para a passagem de parafusos M12, de modo a fixar a placa adaptadora à placa interna-suporte de objeto. A junção da placa adaptadora ocorre pela utilização de 12 parafusos M10 sendo aplicados através das chapas de topo.

Movimentação

Na Tabela 22 apresenta-se os diversos componentes relacionados com a movimentação das placas na ferramenta, abordando-se as guias lineares, os casquilhos, entre outros.

Tabela 22 - Características propostas para os componentes existentes no sistema de movimentação.

Componente	Características propostas
Guias Lineares [22]	Para as guias lineares, duas no total, opta-se pelo tipo cargas pesadas e de esferas. Estas devem ter um comprimento de 1365 mm, uma largura de 15 mm e uma altura de 12,5 mm. Por sua vez para os patins, 2 em cada guia, sugere-se um comprimento de 57 mm, uma largura de 52 mm e uma altura de 20 mm. Estas guias possuem uma resistência básica estática de 14200 N e uma resistência básica dinâmica de 8600 N.
Placas de ligação Guia Linear-Mesa Figura 34	A fixação entra a guia linear à mesa é realizada por uma placa intercalar, esta deve possuir, devido às dimensões das guias e dos patins, 1365 mm de comprimento, 50 mm de largura e 3 mm de espessura. Esta fixação é realizada através de 23 parafusos M3X25, com o seu diâmetro definido pela própria guia.

Placas de ligação Guia Linear-Placa Figura 32	A ligação entre as guias lineares e as placas internas é realizada com o apoio de uma placa com as seguintes dimensões 52x41x2 mm. A fixação ocorre a partir de 4 parafusos M4x30, sendo este diâmetro definido pelos patins.
Varões Figura 35 [36]	Para os varões de guiamento propõem-se um comprimento de 1600 mm com 40 mm com encurtamento nas pontas para diâmetros de 36 e 30mm. O comprimento correspondente ao diâmetro de 30 mm é de 103 mm em cada ponta, e o comprimento da parte de 36 mm é 17 mm em cada ponta. Posto isto, as porcas que fixam estes varões são M30.
Anilhas Figura 37	Para à aplicação das anilhas nos varões, estas devem possuir um diâmetro interno de 36, diâmetro do varão na zona de aplicação da anilha. Sendo para o diâmetro externo propõem-se 46 mm e uma espessura de 2 mm.
Casquilhos - flange quadrada Figura 38	Para os casquilhos utilizados para a movimentação das placas nos varões opta-se pelo tipo flange quadrada. O seu diâmetro interno é de 40 mm, devido ao diâmetro dos varões, com um diâmetro externo de 80 mm e um comprimento de 40 mm. Estes devem possuir um padrão de precisão elevado com uma excentricidade de 20 μm .
Casquilho - Standard Figura 43 [37]	O casquilho aplicado na placa externa-origem da força, é do tipo <i>straight</i> e estilo standard, com um diâmetro interno de 20 mm, devido ao parafuso de esferas, e um externo de 32 mm, o seu comprimento é de 56 mm. Trata-se de um componente de precisão elevada com uma excentricidade perto 15 μm .

Obtenção de valores de deformação

Neste tópico aborda-se a os componentes que permitem um melhor aproveitamento da régua linear, promovendo uma adaptação desta régua à ferramenta como a idealização de futuras alterações, Tabela 23.

Tabela 23 - Características propostas para os componentes que permitem obter o valor da deformação.

Componente	Características propostas
Régua Linear [38]	Para a medição do deslocamento sugere-se, pela informação apresentada nos capítulos anteriores, uma régua linear de escala eletromagnética, AT717, com um curso de 600 mm. Esta régua encontra-se relacionada com o leitor de dados KA da série 174.
Cantoneira Figura 58	Este componente permite à régua linear alterar a sua posição tanto em altura como longitudinalmente, devido a isto propõem-se que esta possua um formato em L com 130 mm de altura 40 mm de largura, um comprimento de 70 mm e uma espessura de 10 mm. De forma a variar a posição deverá possuir dois rasgos, um horizontal com 40 mm de comprimento para um parafuso M8, e outro vertical com 50 mm de comprimento para o mesmo tipo de parafuso.
Peça ligante entre régua linear e placa interna. Figura 59	Esta peça realiza a ligação entre a régua linear e a placa interna-aplicação de força, por tal, é proposto que possua uma forma em L. Para este propõem-se que possua uma altura de 65 mm, uma largura de 45 mm, um comprimento de 80 mm e uma espessura de 5 mm. Na ligação à régua linear, parte horizontal, esta peça tem de possuir dois furos M5, de modo a realizar a fixação. A ligação à placa é realizada por um ou dois furos M5.

Mesa

Neste ponto aborda-se todos os componentes que pertencem à estrutura da mesa, como é o caso da tampa da mesa e a sua ligação à restante estrutura e os subsistemas anti vibratório e de locomoção da ferramenta, Tabela 24.

Tabela 24 - Características propostas para os componentes no sistema da mesa.

Componente	Características propostas
<p>Tampa da mesa Figura 28</p>	<p>Para o tampo da estrutura da mesa sugere-se uma espessura de 25 mm, uma largura de 750 mm e um comprimento de 1500 mm. Estas dimensões permitem posicionar e fixar toda a ferramenta na mesa com uma possível baixa deformação. A ligação desta superfície à estrutura da mesa é realizada por 12 parafusos M8x20.</p>
<p>Cantoneiras Figura 28</p>	<p>Este componente é utilizado para realizar a ligação entre a estrutura da mesa com a tampa, utilizando dois parafusos em cada cantoneira M8.</p>
<p>Roda Figura 56 [39]</p>	<p>Para a roda propõem-se a LH-POTH 125G-1, esta suporta 350 kg em movimentação a uma velocidade de 4 km/h e 800 kg parada. O diâmetro da roda é de 125mm, uma altura de 165 mm sendo realizada num termoplástico poliuretano. A sua chapa de montagem é de 100x85x6 mm com quatro furos de 9 mm.</p>
<p>Placa ligação mesa- roda Figura 56</p>	<p>A ligação entre as rodas e a mesa deve ser realizada através de placas retangulares, 140x125x10mm, dimensões superiores à chapa da roda. Esta placa possui os quatro furos que permite à ligação à roda, M8, e dois furos, M12, para a fixação à fixação à viga transversal da mesa.</p>
<p>Pé anti vibratório Figura 55 [40]</p>	<p>Para o pé anti vibratório propõem-se que consegue suportar um peso até 500 kg. Tendo em conta esta característica e através de um fornecedor opta-se por um pé com 85 mm de diâmetro e 30 mm de espessura com uma haste M12 de 100 mm de comprimento.</p>
<p>Adaptador pé anti vibratório Figura 55 [40]</p>	<p>Esta peça terá de ser introduzida nas vigas quadráticas que constituem a perna da mesa, por tal a parte superior da peça com 44x44x20 mm. A base desta peça terá 50x50x10 mm encontrando-se em contacto com a espessura da viga. De modo a fixar esta ligação aplicam-se dois parafusos M8.</p>

Ferramenta de avaliação de deformação

Juntando os vários subsistemas obtêm-se a ferramenta de avaliação de deformação, esta pode ser observada na seguinte figura, possuindo uma largura total de 745 mm, um comprimento de 1500 mm e uma altura de 1620 mm.

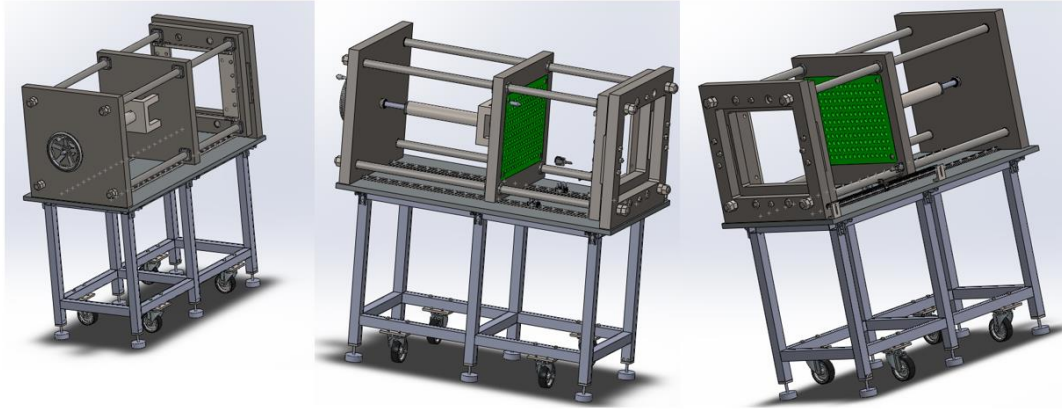


Figura 75 – Ferramenta de avaliação de deformação.

O sistema DIC que será aplicado é o 2D, pelo que se utilizará apenas uma câmara no ensaio, tendo de ser posicionada de modo a captar as imagens do ensaio visíveis pelos rasgos encontrados na placa externa-obtenção de dados e placa interna-suporte de ferramenta.

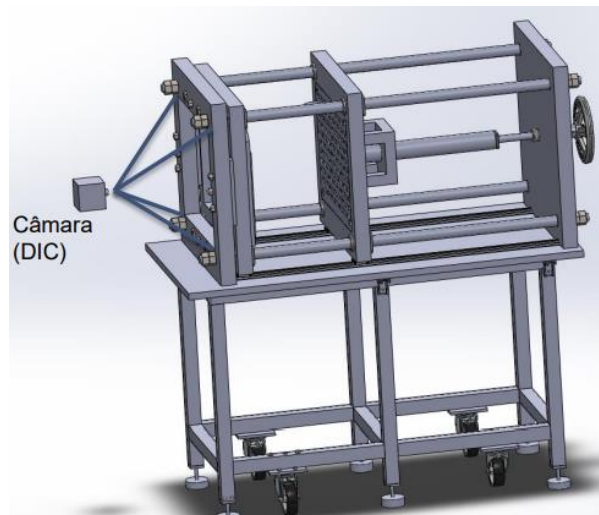


Figura 76 – Aplicação da câmara no ensaio.

5.2 Dimensionamento

O dimensionamento da ferramenta é necessário para verificar as decisões realizadas no subcapítulo anterior, tendo como suporte o capítulo 4. Neste dimensionamento considera-se a carga

máxima possível para o ensaio, 10 kN, e para efeitos da verificação de vários componentes considera-se que a ferramenta têm um peso de 1000 kg, valor que promove uma segurança aos cálculos.

5.2.1 Cálculo Analítico

A teoria e as equações utilizadas neste capítulo encontram-se anteriormente referidas, mais especificamente no subcapítulo 4.1.

Parafuso de Esferas

Para este componente inicialmente calcula-se a carga axial que este suporta, comparando o valor com a carga que se pretende aplicar, executando a equação (6).

$$P_1 = \frac{\eta_1 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{l_a^2} \times 0,5 = \eta_2 \frac{d_1^4}{l_a^2} \times 10^4 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_1 = \frac{0,25 \cdot \pi^2 \cdot 206 \times 10^3 \times 19174,8}{580} \times 0,5 = 1,3 \cdot \frac{25^4}{580^2} \times 10^4$$

$$\Leftrightarrow P_1 = 14486,1 = 15095,5 \text{ N}$$

A carga axial será dada pelo menor valor assumindo sendo 14486,1N. Este valor é superior ao valor aplicado de 10000 N, pelo que pode garantir que o parafuso de esferas suporta a carga aplicada.

De seguida a carga de compressão gerada por tensão permitida, através da equação (7), o valor da tensão é dado pelo catálogo, sendo de 147 MPa.

$$P_2 = \sigma \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = 116d_1^2 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_2 = 147 \frac{\pi}{4} 25^2 = 116 \cdot 25^2 \Leftrightarrow P_2 = 72158,5 = 71875 \text{ N}$$

Posteriormente calcula-se a vida do parafuso, equação (8), onde o fator de carga é de 1,2, Tabela 9.

$$L = \left(\frac{C_a}{f_w \cdot F_a} \right)^3 \times 10^6 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow L = \left(\frac{14486,1}{1,2 \times 10000} \right)^3 \times 10^6 = 5252,87 \text{ km}$$

O tempo de vida obtido encontra-se agradável ao projeto.

Sabe-se que se necessita de um movimento linear com um valor de força de 10kN para realizar o ensaio, sendo assim, através deste valor pode-se calcular a força rotativa necessária. Note-se que na seguinte equação é necessário entrar com os valores de força em kgf.

$$T_c = \frac{F_b \cdot l \cdot \eta_2}{2 \cdot \pi} = \frac{10 \cdot (10000 \times 0,0102) \times 0,976}{2 \cdot \pi} = 158,44 \text{kgf} \cdot \text{mm} = 15533,54 \text{Nmm}$$

O ângulo alfa e beta são dados pelas seguintes equações.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{l}{\pi \cdot D_m} = \tan^{-1} \frac{10}{\pi \times 25} = 7,256^\circ$$

$$\beta = \tan^{-1} 0,003 = 0,172^\circ$$

A eficiência mecânica η_2 pode ser obtida pela seguinte equação.

$$\eta_2 = \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha)} = \frac{\tan(7,256 - 0,172)}{\tan(7,256)} = 0,976$$

Verificado o parafuso quanto as tensões a aplicar é necessário verificá-lo à encurvadura segundo o euro código, visto que se considera que a força compressiva neste aplicada é centrada. O parafuso de esferas possui um comprimento 625 mm e um diâmetro de 25 mm.

Inicialmente aplica-se a equação (22),

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{19174,8}{490,87}} = 6,25 \text{ mm}$$

Com este valor pode-se proceder e aplicar a equação (21).

$$\lambda = \frac{Le}{i} = \frac{2 \times 625}{6,25} = 200$$

Com estas variáveis definidas pode-se calcular o N_{cr} pela equação número (20).

$$N_{cr} = \frac{E \cdot A \cdot \pi^2}{\lambda^2} = \frac{210000 \times 490,87 \times \pi^2}{200^2} = 25434,8 \text{ N}$$

Sendo assim, $\bar{\lambda}$ é pode ser calculado pela equação (19), onde f_y , a tensão de cedência do material retira-se pelo euro código, sendo que para um aço S355 é de 355 N/mm^2 .

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{490,87 \times 355}{25434,8}} = 2,62$$

O fator de imperfeição, pela Tabela 6 e Tabela 7, assume-se $\alpha_{imp} = 0,2$, então pode-se calcular a equação (18) de modo a obter χ .

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_{imp}(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,2(2,62 - 0,2) + 2,62^2] = 0,12$$

Com este valor consegue-se obter χ pela seguinte equação (17).

$$x = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,12 + \sqrt{0,12^2 - 0,6308^2}} = 4,52$$

Estando encontradas todas as variáveis pode-se calcular a força resistente, equação (16).

$$N_{b,Rd} = \frac{x \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{4,52 \times 490,87 \times 355}{1,2} = 17708,7 \text{ N}$$

Este valor é bastante superior à carga aplicada, 10000N, pelo que não ocorre problemas com a encurvadura no parafuso de esferas.

$$\frac{10000}{17708,7} = 0,56 \leq 1$$

Varões

Segue-se o cálculo do diâmetro dos varões, uma vez que a carga da ferramenta não se encontra diretamente aplicada nestes é necessário calcular a carga resultante neste componente. Neste dimensionamento utiliza-se o diâmetro do varão com 40 mm com um comprimento total de 1600 mm.

Como o impactador não possui uma posição fixa é necessário aplicar as equações (23), (24), (25) e (26) tendo em conta a posição deste. A posição é pré-definida, contudo é necessário calcular as distâncias em x_0 e em y_0 relativamente à origem para todos os possíveis pontos, Figura 63. A localização entre os centros dos varões é a seguinte $x = 0,526 \text{ mm}$ e $y = 0,526 \text{ mm}$.

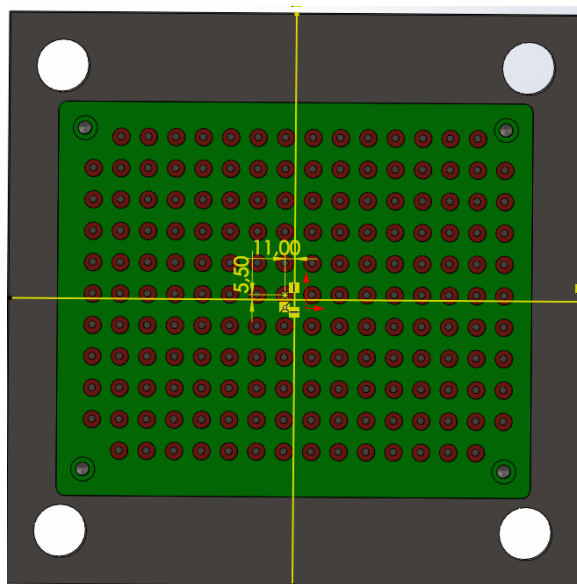


Figura 77 – Método de obtenção das distâncias do punção à origem.

As linhas amarelas, Figura 77, correspondem a um referencial cartesiano, existindo então quadrantes onde se considera sinais positivos e negativos. A aplicação das equações tendo em conta a

posição do punção ocorreu com apoio do software *Microsoft Excel*, os resultados completos podem ser observados no Anexo A.

Na Tabela 25 encontra-se a força crítica para cada varão tendo em conta o quadrante, onde a força crítica existente é de 6197,7 N ocorrendo em $x=0,206$ mm e $y=0,183$ mm.

Tabela 25 – Valores de força descentrada aplicada em cada varão tendo em conta o quadrante em N.

	P1	P2	P3	P4
Quadrante Superior Esquerdo	4135,0	6112,2	2343,2	4615,0
Quadrante Superior Direito	6197,7	4049,4	4700,6	2257,6
Quadrante Inferior Esquerdo	2110,3	2804,2	4030,4	4429,7
Quadrante Inferior Direito	2509,5	2024,7	4429,7	3944,9
Critico	6197,7	6112,7	4700,6	4615,0

Seguidamente utiliza-se a força crítica descentrada existente para calcular o momento crítico descentrado, aplicando-se as equações (27) e (28). As distâncias a e b, Figura 64, são relativas à placa, mais precisamente no local aonde carga se encontra aplicada. Este cálculo obtém os momentos aplicados em dois varões, estando superfície a azul, Figura 78, encastrada nos topos, sendo as distâncias a e b a distância de um dos topos ao ponto de aplicação da carga, $a=0,506$ mm e $b=0,183$ mm. A distância total, L, é o tamanho da placa 0,646 mm

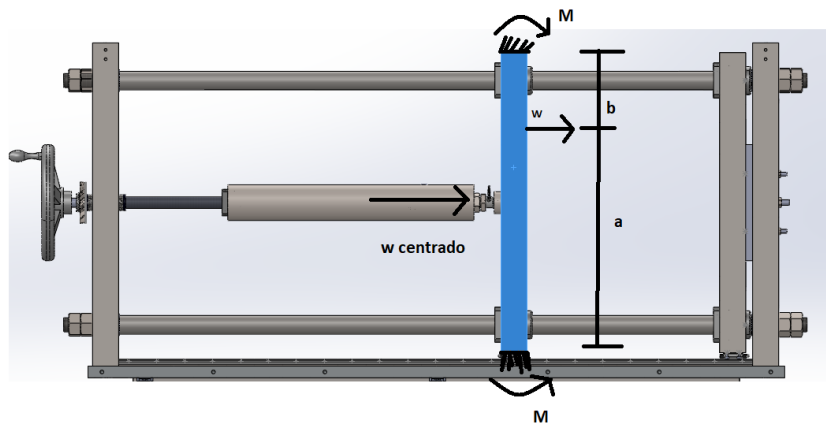


Figura 78 – Diagrama de corpo livre para a obtenção dos momentos.

$$M_{descentrado 1} = \frac{Wab^3}{L^2} = \frac{6197,720 \times 0,506 \times 0,183^3}{0,646^2} = 147,29 \text{ Nmm}$$

$$M_{descentrado\ 2} = \frac{Wba^3}{L^2} = \frac{6197,7 \times 0,183 \times 0,506^3}{0,646^2} = 532,35\ Nm$$

Apesar da aplicação de carga ser descentrada, o modo como a placa recebe o carregamento é centrado, criando assim um momento contrário ao momento realizado nos varões.

$$M_{centrado\ 1} = \frac{W_{centrado}ab^3}{L^2} = \frac{10000 \times 0,323 \times 0,323^3}{0,646^2} = 807,5\ Nmm$$

$$M_{centrado\ 2} = \frac{W_{centrado}ba^3}{L^2} = \frac{10000 \times 0,323 \times 0,323^3}{0,646^2} = 807,5\ Nmm$$

$$M_1 = M_{descentrado\ 1} - M_{centrado\ 1} = 807,5 - 147,29 = 660,21\ Nmm$$

$$M_2 = M_{descentrado\ 2} - M_{centrado\ 2} = 807,5 - 532,35 = 275,15\ Nmm$$

Utilizando o momento crítico, $M = 660,21\ N/mm$, procede-se para o cálculo da deformação no varão, aplicando a equação (29) e com apoio com o diagrama de corpo livre encontrado na Figura 79.

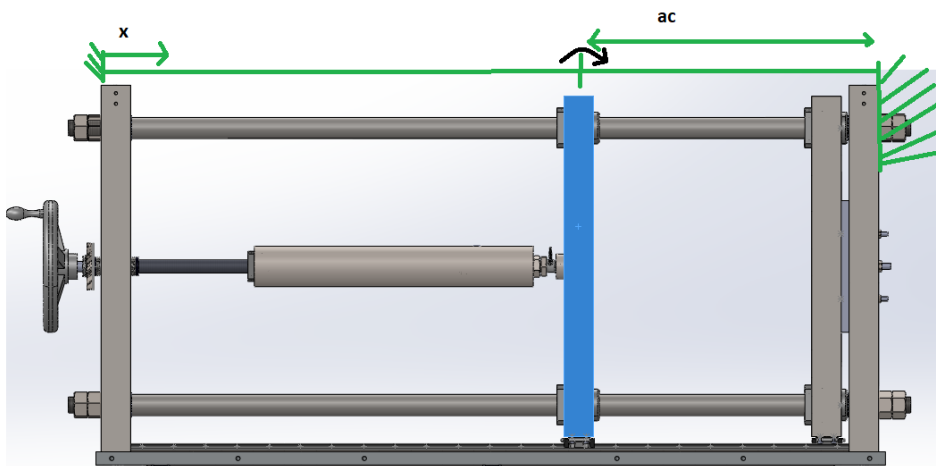


Figura 79 – Diagrama de corpo livre para o cálculo da deformação nos varões.

$$w = w_0 - \theta_0 - V_0 \frac{x^3}{3!EI} - M_0 \frac{x^2}{2EI} + F_w$$

Sendo as condições iniciais igual de w_0 e θ_0 a zero, sendo que pelas equações (30), (31), (32) e (33) calculam-se as restantes variáveis.

$$V_0 = -\frac{12EI}{L^3} \overline{F_w} - \frac{6EI}{L^2} \overline{F_\theta}$$

$$M_0 = \frac{6EI}{L^2} \overline{F_w} + \frac{2EI}{L} \overline{F_\theta}$$

$$F_w = \frac{c < x - a_c >^2}{2EI}$$

$$F_{\theta} = -\frac{c < x - a_c >}{2EI}$$

Como o ensaio pode ocorrer em vários pontos ao longo do comprimento do varão, significa que a deformação crítica pode ocorrer ao longo do curso de ensaio. Por tal modo, este cálculo da deformação é realizado com o apoio de uma folha de cálculo. No anexo A apresenta-se um excerto das várias iterações realizadas. Sendo assim, x pode variar de entre 0,028 mm e 0,513 mm, curso de ensaio, o valor de a será constante, com $a_c = 0,028$, uma vez que a distância do ponto de aplicação da carga à placa que aplica a força nunca se altera.

O valor de $\overline{F_w}$ e $\overline{F_{\theta}}$ é o último valor de F_w e F_{θ} , sendo então $\overline{F_w} = 0,0101$ e $\overline{F_{\theta}} = -0,0409$, portanto obtêm-se o seguinte.

$$\begin{aligned} V_0 &= -\frac{12EI}{L^3}\overline{F_w} - \frac{6EI}{L^2}\overline{F_{\theta}} = \\ &= -\frac{12 \cdot 2 \times 10^9 \times 3,97 \times 10^{-8}}{1,365^3} \cdot 0,0101 - \frac{6 \cdot 2 \times 10^9 \times 3,97 \times 10^{-8}}{1,365^2} \cdot -0,0409 = 669,57 \\ M_0 &= \frac{6EI}{L^2}\overline{F_w} + \frac{2EI}{L}\overline{F_{\theta}} = \\ &= \frac{6 \cdot 2 \times 10^9 \times 3,97 \times 10^{-8}}{1,365^2} \cdot 0,0101 + \frac{2 \cdot 2 \times 10^9 \times 3,97 \times 10^{-8}}{1,365} \cdot -0,0409 = 218,53 \end{aligned}$$

Sendo assim aplicando-se a equação (29) e considerado os vários valores de $\overline{F_w}$, obteve-se uma deformação máxima de -0,37 mm.

$$w = -0,37 \text{ mm}$$

Este resultado obtido não é o pretendido visto que se procura uma deformação na escala do décimo do milímetro, contudo este método possui várias simplificações, sendo necessário realizar um cálculo numérico para confirmar o resultado obtido.

Concluída a verificação ao diâmetro é imperativo verificar os varões à encurvadura, como a carga não é centrada tem-se de verificar a condição da equação (36).

A carga excêntrica crítica foi calculada anteriormente, $P = 6197,720 \text{ N}$, ocorrendo de forma descentrada em relação ao eixo do varão em $x = 0,469 \text{ mm}$ e $y = 0,080 \text{ mm}$. O material do varão trata-se de um aço, considerando-se a tensão de cedência de 520 MPa, possuindo um diâmetro igual a 40 mm.



Figura 80 – varão utilizado na ferramenta.

$$\frac{\frac{P}{\bar{A}}}{(\sigma_{adm})_{centrica}} + \frac{\frac{M_x \times h_1/2}{I_x}}{(\sigma_{adm})_{flexão}} + \frac{\frac{M_z \times h_2/2}{I_z}}{(\sigma_{adm})_{flexão}} \leq 1 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{6197,720}{1256,64} + \frac{(6197,720 \times 0,469) \times 7,5}{39760,78} + \frac{(6197,720 \times 0,080) \times 7,5}{39760,78} = 0,013 \leq 1$$

Pelo que se verifica que os varões se encontram validados à encurvadura.

Casquilhos.

Estando os varões dimensionados no seu diâmetro verifica-se se o tempo de vida para os casquilhos escolhidos, resolvendo a seguinte equação (38).

Os fatores encontram-se explicados e enunciados nas Tabela 8 e Tabela 9 e no Gráfico 7 e Gráfico 8, este género de casquilho possui uma carga dinâmica básica de 2160 N, valor fornecido pelo fabricante.

O fator de rigidez assume o valor de 1, por sua vez o fator de temperatura é igual a 1, visto que o uso do casquilho é a temperatura ambiente. O fator de contacto é de 1, e o fator de carga assume o valor de 1.2, o pior dos casos para uma velocidade enfraquecida. A carga aplicada é a carga crítica para o varão, $P = 6197,720 \text{ N}$.

$$L = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot f_C}{f_W} \cdot \frac{c_1}{P_c} \right)^3 \times 50 = \left(\frac{1 \times 1 \times 1}{1.2} \times \frac{2160}{6197,720} \right)^3 \times 50 = 1,24 \text{ km}$$

O resultado obtido é satisfatório uma vez indica que os casquilho aplicados na ferramenta terão uma vida longa.

Para o casquilho da placa externa existe apenas uma alteração da força aplicada, onde neste caso é de $P = 10000 \text{ N}$ e uma alteração da carga dinâmica básica, visto se tratar de outro tipo de casquilho, $C = 882 \text{ N}$.

$$L = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot f_C}{f_W} \cdot \frac{c_1}{P_c} \right)^3 \times 50 = \left(\frac{1 \times 1 \times 1}{1.2} \times \frac{882}{10000} \right)^3 \times 50 = 0,020 \text{ km}$$

Este resultado também é mais crítico que o anterior, contudo devido a zona onde este casquilho se localiza, dentro da placa externa, este valor para o tempo de vida não será prejudicial.

Tubo integrante

Na verificação do tubo integrante realiza-se uma verificação à encurvadura, tendo este tubo as seguintes dimensões, comprimento 530 mm, diâmetro exterior 67mm e diâmetro interior de 57 mm.

Inicialmente aplica-se a equação (22),

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{470999}{973,89}} = 21,991 \text{ mm}$$

Com este valor pode-se proceder e aplicar a equação (21).

$$\lambda = \frac{Le}{i} = \frac{2 \times 530}{21,991} = 48,2$$

Com estas variáveis definidas pode-se calcular o N_{cr} pela equação número (20).

$$N_{cr} = \frac{E \cdot A \cdot \pi^2}{\lambda^2} = \frac{210000 \times 973,89 \times \pi^2}{48,2^2} = 868816 \text{ N}$$

Sendo assim, X é pode ser calculado pela equação (19), onde f_y , a tensão de cedência do material retira-se pelo euro código, sendo que para um aço S355 é de 355 N/mm^2 .

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{973,89 \times 355}{868816}} = 0,6308$$

O fator de imperfeição, pela Tabela 6 e Tabela 7, assume-se $\alpha_{imp} = 0,2$, então pode-se calcular a equação (18) de modo a obter Y .

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_{imp}(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,2(0,6308 - 0,2) + 0,6308^2] = 0,8045$$

Com este valor consegue-se obter Y pela seguinte equação (17).

$$x = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,8045 + \sqrt{0,8045^2 - 0,6308^2}} = 0,767$$

Estando encontradas todas as variáveis pode-se calcular a força resistente, equação (16).

$$N_{b,Rd} = \frac{x \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,767 \times 973,89 \times 355}{1,2} = 220972 \text{ N}$$

Este valor é bastante superior à carga aplicada, 10000N, pelo que não haverá problemas em realização à encurvadura neste componente.

Como neste tubo se encontra uma chaveta esta é preciso ser dimensionada, no início cálculo da chaveta trata-se de conhecer a força aplicada pelo momento rotativo, sabe-se que este é $T =$

15533,33 *Nmm*, então pela aplicação da seguinte equação (44) retira-se o valor da força. A chaveta encontra-se aplicada no tubo integrante, tendo este um diâmetro de 67 mm.

$$F = \frac{2T}{d} = \frac{2 \times 15533,33}{67} = 463,68 \text{ N}$$

A chaveta aplicada no suporte do tubo integrante Para este diâmetro, segundo a Tabela 14 e Tabela 15, b=4 e h=4, visto que o diâmetro de trabalho se trata de 10 mm, sendo o comprimento compreendido entre 8 e 45. Existindo vários comprimentos possíveis de aplicar, resolve-se as equações (45) e (46), em iterativamente com valores de comprimento diferentes.

$$\sigma = \frac{4 \cdot T}{d \cdot l \cdot h}$$

$$\tau = \frac{2 \cdot T}{d \cdot l \cdot b}$$

Tabela 26 – Dimensionamento da chaveta.

d (mm)	b (mm)	h (mm)	T (N/mm ²)	Comprimento	Tensão Compressão (N/mm ²)	Tensão de Corte (N/mm ²)
10	4	4	15533,33	10	23,184	11,592
				12	19,320	9,660
				14	16,560	8,280
				16	14,490	7,245
				18	12,880	6,440
				20	11,592	5,796

Observando os dados obtido escolhe-se uma chaveta com dimensões de b=4mm, h=4mm e l = 14 mm, todos os comprimentos apresentados poderiam ser escolhidos, contudo opta-se pelo de 14 mm de modo a fortalecer a chaveta sem entrar em dimensões demasiado elevadas.

Guia Linear

O dimensionamento das guias lineares não envolve os seus parafusos, isto pois estes encontram-se sobre um carregamento de compressão.

As guias encontram-se sobre carga das placas, sendo este o único carregamento a que se encontram sujeitas, então as equações (40) e (41) se encontrarem validadas então a guia selecionada pode ser aplicada.

A carga estática básica resistente que a guia suporta é de 8600 N, sendo a carga aplicada dividida em dois, uma vez que se encontra a utilizar duas guias. O fator de segurança é retirado da Tabela 10, sendo para usos normais de 2.

$$P \leq \frac{C_o}{f_s} \Leftrightarrow \frac{10000}{2} \leq \frac{14200}{2} \Leftrightarrow 5000 \leq 7100$$

A condição encontra-se verificada, pelo que a guia pode ser utilizada.

O tempo de vida da guia linear é calculada pela equação (42), os fatores são retirados pelas Tabela 11 e Tabela 12, e pelos Gráfico 9 e Gráfico 10. Pelas indicações impostas todos os fatores assumem o valor de 1, sendo o fator de carga de 1,2.

$$L = \left(\frac{f_H + f_T + f_C}{f_W} \cdot \frac{C}{P_C} \right)^3 \times 50 = \left(\frac{1 + 1 + 1}{1,2} \cdot \frac{8600}{5000} \right)^3 \times 50 = 3975,35 \text{ km}$$

Rolamentos

Para um rolamento a sofrer cargas puramente axiais a carga aplicada não deve ser superior a 50% da carga estática básica, que segundo o fabricante é de 37.5 kN.

$$P < 0.5C_0(=)10 < 37,5 \times 0,5(=)10 < 18,75 \text{ kN}$$

A condição inicial verifica-se pelo que este rolamento de esferas pode ser aplicado na ferramenta. De seguida verifica-se se a pressão realizada por este na placa externa não ultrapassa a tensão de cedência desta.

$$\sigma_{aplicada} < \sigma_{cedencia} (=) \frac{10000}{\pi * (17,5^2 - 12,5^2)} < 310(=)21,22 < 310 \text{ MPa}$$

A tensão aplicada é muito inferior a tensão de cedência da placa pelo que não existe problema na aplicação do rolamento.

Anilhas

Na ferramenta são utilizadas anilhas em duas situações diversas, umas aplicadas nos varões e outras aplicadas em conjunto com os rolamentos axiais.

No primeiro caso as anilhas possuem um diâmetro interno de 36 mm, encontrando-se pressionadas pelo varão até aos 40 mm através de 6197,72 N, valor obtido no cálculo da força existente no varão, posto isto a tensão aqui aplicada é a seguinte.

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{6197,72}{\pi \times (20^2 - 18^2)} = 25,96 \text{ MPa}$$

A tensão aqui existente é inferior à tensão normal de um aço pelo que não será necessário realizar qualquer tipo de alteração.

As anilhas existentes junto dos rolamentos axiais possuem um diâmetro interno de 20 mm e um diâmetro externo de 35 mm, contudo este componente encontra-se em contacto com a parte roscada

do parafuso de esferas que possui um diâmetro de 25mm. Posto isto, analisa-se o pior dos casos, contacto da anilha com o parafuso de esferas. A pressão exercida na anilha é de 10kN.

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{10000}{\pi \times (12,5^2 - 10^2)} = 35,07 \text{ MPa}$$

Como no caso anterior a tensão encontrada é bastante inferior a tensão de cedência de um aço pelo que não existe necessidade de alterações.

Volante

Neste tópico calcula-se o diâmetro para o volante, conhecendo-se os vários valores fornecidos pelo fabricante para o diâmetro deste componente e conhecendo-se o momento necessário aplicar no parafuso, 15534Nmm. Posto isto pela aplicação da seguinte equação obtém-se os diferentes valores de força para cada diâmetro.

$$M = r \times F$$

$$\Leftrightarrow F = \frac{2 \times 15534}{D}$$

Tabela 27 -Dimensionamento do volante

To (Nmm)	Diâmetro volante (mm)	Força a aplicar (N)
15534	80	338,38
	100	310,67
	125	248,54
	140	221,90
	160	194,17
	200	155,34
	250	124,27

Observando a tabela dos resultados, opta-se pela escolha de um volante com 250 mm para o utilizador aplicar a menor força possível.

Fixação de Placas

Na fixação das placas não se realizará um dimensionamento dos parafusos, isto deve-se ao facto de estes apenas se encontrarem sobre cargas compressivas. Posto isto, verificar-se-á se estes

parafusos conseguem juntar o conjunto da placa externa-obtenção de dados e a placa interna-suporte de objeto. Nesta ligação são utilizados dois tipos de parafusos classe 8.8, dois M12, aplicados lateralmente, e quatro M8, aplicados na parte superior e inferior. Mais detalhes podem ser observados na Figura 51 e Figura 52.

A força de prova é calculada pela aplicação da equação (60). Pelas tabelas Tabela 18 e Tabela 19, retiram-se os valores de A_t e S_p .

$$F_{p,parafuso\ 8} = A_t \cdot S_p = 36,6 \times 600 = 21960\ N$$

$$F_{p,parafuso\ 12} = A_t \cdot S_p = 84,3 \times 600 = 50580\ N$$

Posto isto, pela aplicação da fórmula (58), uma vez que esta não se trata de ligações permanentes.

$$F_{i,parafuso\ 8} = 0,75 \cdot F_p = 0,75 \times 21960 = 16470\ N$$

$$F_{i,parafuso\ 12} = 0,75 \cdot F_p = 0,75 \times 50580 = 37935\ N$$

Segue-se o cálculo da fração da carga exterior suportada pelos parafusos, sendo que inicialmente se calcula pelas equações (65) e (69) a rigidez das peças e do parafuso de ligação. Tanto o parafuso M8 e M12 possuem um comprimento de 120 mm, onde a parte roscada é de 34 mm. A espessura dos membros a ligar é de 100 mm, e todos eles são realizados no mesmo material, com $E = 207\ GPa$.

$$k_{m,parafuso\ 8} = \frac{0,5774 \cdot \pi \cdot E \cdot d}{2 \ln\left(5 \frac{0,5774 \cdot l + 0,5d}{0,5774 \cdot l + 2,5d}\right)} = \frac{0,5774 \times \pi \times 8 \times 207000}{2 \ln\left(5 \frac{0,577 \times 100 + 0,5 \times 8}{0,5774 \times 100 + 2,5 \times 8}\right)} = 1089192,6$$

$$k_{m,parafuso\ 12} = \frac{0,5774 \cdot \pi \cdot E \cdot d}{2 \ln\left(5 \frac{0,5774 \cdot l + 0,5d}{0,5774 \cdot l + 2,5d}\right)} = \frac{0,5774 \times \pi \times 12}{2 \ln\left(5 \frac{0,577 \times 100 + 0,5 \times 12}{0,5774 \times 100 + 2,5 \times 12}\right)} = 1746632$$

$$k_{b,parafuso\ 8} = \frac{A_d \cdot A_t \cdot E}{A_d \cdot l_d + A_t \cdot l_t} = \frac{\pi \times \frac{8^2}{4} \times 36,6 \times 207000}{\pi \times \frac{8^2}{2} \times 86 + 353 \times 34} = 23327,74$$

$$k_{b,parafuso\ 12} = \frac{A_d \cdot A_t \cdot E}{A_d \cdot l_d + A_t \cdot l_t} = \frac{\pi \frac{12^2}{4} \times 84,3 \times 207000}{\pi \frac{12^2}{4} \times 86 + 353 \times 34} = 90828,71$$

A partir destes valores pode-se calcular a seguinte equação (61).

$$C_{parafuso\ 8} = \frac{k_b}{k_b + k_m} = \frac{23327,74}{23327,74 + 1089192,6} = 0,021$$

$$C_{parafuso\ 12} = \frac{k_b}{k_b + k_m} = \frac{90828,71}{90828,71 + 1746632} = 0,049$$

Pela equação (57) é possível verificar se os elementos permanecem ligados.

$$n_{o,parafuso\ 8} = \frac{F_i}{P(1-C)} = \frac{16470}{10000(1-0,021)} = 1,68$$

$$n_{o,parafuso\ 12} = \frac{F_i}{P(1-C)} = \frac{37935}{10000(1-0,049)} = 7,37$$

Como ambos os resultados foram superiores a 1, não ocorre o risco do conjunto se separar.

Parafusos Ligação Placa-Mesa

Os parafusos a efetuar a ligação entre as placas internas e a mesa, Figura 30, encontram-se ao corte, sendo necessário verificar então estes componentes. Trata-se de 5 parafusos aplicados, sendo estes M20 e com um comprimento de 70 mm de classe 8.8. Como na ligação ambas as placas externas são iguais, basta resolver o problema para uma.

Como se encontram ao corte, é necessário validar as condições impostas nas equações (47) e (48).

$$F_{V.Ed} \leq F_{V.Rd} \Leftrightarrow \frac{10000}{5} \leq 94080 \Leftrightarrow 2000 \leq 94080 \text{ N}$$

$$F_{V.Ed} \leq F_{b.Rd} \Leftrightarrow \frac{10000}{5} \leq 153708,8 \Leftrightarrow 2000 \leq 153708,8 \text{ N}$$

Pela equação (51).

$$F_{V.Rd} = \frac{\alpha_V \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \times 800 \times 245}{1,25} = 94080 \text{ N}$$

Onde $\gamma_{M2} = 1,25$, $f_{ub} = 800$ segundo a Tabela 17, $\alpha_V = 0,6$, e A é a área resistente do parafuso, segundo a Tabela 19, é de 245 mm^2

Pela equação (52).

$$F_{b.Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{470 \times 56 \times 2,5 \times 2,92}{1,25} = 153708,8 \text{ N}$$

Onde $\gamma_{M2} = 1,25$, $f_u = 470$ considera-se para este caso que o material da placa é um S355, t corresponde a espessura da placa, 56 mm.

Pela equação (53).

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{175}{3 \times 20} = 2,92$$

Onde $e_1 = 175 \text{ mm}$, $e_2 = 39,5 \text{ mm}$ e $p_1 = 94 \text{ mm}$ são retirados da posição dos furos sendo para este caso, aplicando a Figura 70 na seguinte imagem.

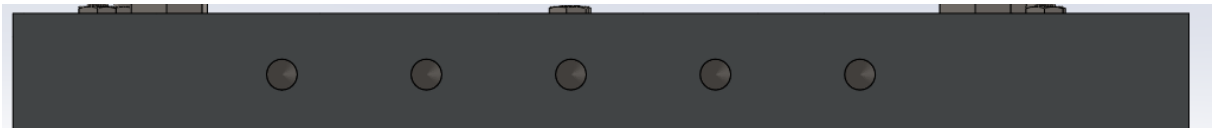


Figura 81 - Furos necessários para aplicação dos parafusos de ligação mesa-placa.

Sendo k_1 o menor dos seguintes valores, uma vez que não há segunda linha logo $p_2 = 0$.

$$2,8 \frac{e_2}{d_0} = 2,8; \frac{39,5}{20} = 5,53; 2,5$$

Como as condições foram validados estes parafusos podem realizar a ligação, apesar de segundo a condição se verificar que os parafusos são mais que capazes de suportar às cargas, não se optará por verificar um diâmetro inferior, isto deve-se ao facto de estes 5 parafusos serem os únicos fixadores das placas externas com à ferramenta.

Parafusos Ligação Patim-Placa

Os parafusos a efetuar a ligação entre os patins e as placas internas, Figura 32, encontram-se ao corte, sendo necessário apenas validar que suportam o esforço, uma vez que o seu diâmetro é definido pelos patins. Trata-se de 4 parafusos aplicados, sendo estes M4 e com um comprimento de 32 mm de classe 8.8. Como na ligação ambas as placas externas são iguais, basta resolver o problema para uma.

Como se encontram ao corte, é necessário validar as condições impostas nas equações (47) e (48).

$$F_{V.Ed} \leq F_{V.Rd} \Leftrightarrow \frac{10000}{4} \leq 3371,53 \Leftrightarrow 2500 \leq 3371,53 \text{ N}$$

$$F_{V.Ed} \leq F_{b.Rd} \Leftrightarrow \frac{10000}{4} \leq 153708,8 \Leftrightarrow 2500 \leq 534296 \text{ N}$$

Pela equação (51).

$$F_{V.Rd} = \frac{\alpha_V \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \times 800 \times 8,78}{1,25} = 3371,53 \text{ N}$$

Onde $\gamma_{M2} = 1,25$, $f_{ub} =$ segundo a Tabela 17, $\alpha_V = 0,6$, e A é a área resistente do parafuso, segundo a Tabela 19, é de $8,78 \text{ mm}^2$

Pela equação (52).

$$F_{b.Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{470 \times 56 \times 2,5 \times 10,15}{1,25} = 534296 \text{ N}$$

Onde $\gamma_{M2} = 1,25$, $f_u = 470$ considera-se para este caso que o material da placa é um S355 [22], t corresponde a espessura da placa, 56 mm.

Pela equação (53).

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{121,74}{3 \times 4} = 10,15$$

Onde $e_1 = 121,74 \text{ mm}$, $e_2 = 26,54 \text{ mm}$, $p_1 = 40 \text{ mm}$ e $p_2 = 26 \text{ mm}$ são retirados da posição dos furos sendo para este caso, aplicando a Figura 70 na seguinte figura.

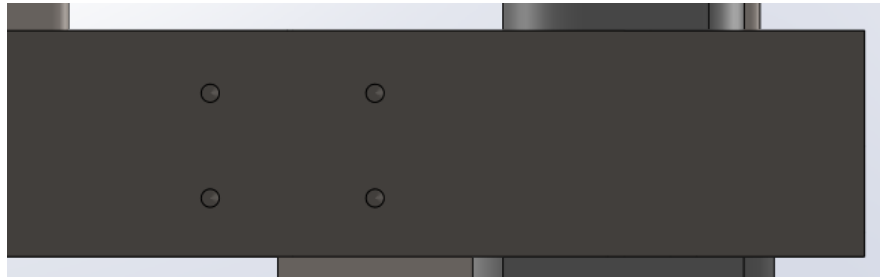


Figura 82 – Localização dos furos de ligação entre os patins e a placa interna.

Sendo k_1 o menor dos seguintes valores.

$$2,8 \frac{e_2}{d_0} = 2,8 \frac{26,54}{4} = 18,58; 1,4 \frac{p_2}{d_0} = 1,4 \frac{26}{4} = 9,1; 2,5$$

Como as condições foram validados estes parafusos podem realizar a ligação.

Mesa

Na mesa é necessário verificar se a tampa adicionada suporta o peso dos vários componentes, realizando uma verificação do estado limite de compressão, aplicando-se, portanto, 1000 kg (9880 N nesta superfície. Esta superfície, como referido anteriormente, possui 25 mm de espessura, 1500 mm de comprimento e 760 mm de largura, sendo necessário verificar a condição existente na equação (70)

$$\frac{N_{ED}}{N_{c,RD}} \leq 1$$

A força aplicada, N_{ED} , trata-se de 9880 N, sendo o esforço resultante é obtido pela equação (71)

$$N_{c,RD} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}}$$

A área é a área de superfície lateral, escolhendo-se o lado mais crítico para o projeto, f_y é a tensão de cedência do material S235, como a espessura da superfície é menor que 40 mm, segundo o euro código 3 parte 1:1, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$, a constante de segurança γ_{M0} assume um valor de 1.

$$N_{c,RD} = \frac{(765 \times 25) \times 235}{1} = 4494375 \text{ N}$$

$$\frac{N_{ED}}{N_{c,RD}} = \frac{9880}{4494375} = 0.0022 \leq 1$$

Pelo que se considera que a superfície da mesa suporta a carga de compressão criada pelo peso dos componentes.

De seguida é necessário verificar se as pernas da mesa são resistentes à encurvadura, como a carga é distribuída pelas seis pernas, aplica-se em cada uma carga centrada de 1634 N. Posto isto, procede-se ao cálculo da força resistente à encurvadura.

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{208492}{564}} = 19,228 \text{ mm}$$

Com este valor pode-se proceder e aplicar a equação(21).

$$\lambda = \frac{Le}{i} = \frac{2 \times 755}{19,228} = 78,537$$

Com estas variáveis definidas pode-se calcular o N_{cr} pela equação número (20).

$$N_{cr} = \frac{E \cdot A \cdot \pi^2}{\lambda^2} = \frac{210000 \times 564 \times \pi^2}{78,537^2} = 189520 \text{ N}$$

Sendo assim, X é pode ser calculado pela equação (19), onde f_y , a tensão de cedência do material retira-se pelo euro código, sendo que para um aço S355 é de 355 N/mm^2 .

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{564 \times 355}{189520}} = 1,028$$

O fator de imperfeição, pela Tabela 6 e Tabela 7, assume-se $\alpha_{imp} = 0,2$, então pode-se calcular a equação (18 de modo a obter Y .

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_{imp}(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,2(1,028 - 0,2) + 1,028^2] = 1,028$$

Com este valor consegue-se obter Y pela seguinte equação (17).

$$x = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,028 + \sqrt{1,028^2 - 1,028^2}} = 0,947$$

Estando encontradas todas as variáveis pode-se calcular a força resistente, equação (16).

$$N_{b,Rd} = \frac{x \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,947 \times 564 \times 355}{1,2} = 157933 \text{ N}$$

$$\frac{N_{ED}}{N_{b,RD}} = \frac{10000/6}{157933} = 0,011 \leq 1$$

Validando as pernas da mesa à encurvadura procede-se à validação da estabilidade total da ferramenta, de modo que ela em andamento permaneça de pé. Para tal a seguinte condição tem de ser verdadeira.

$$Carga \times altura \leq Peso \text{ Próprio} \times distância \text{ À roda}$$

A carga pode ser obtida através da multiplicação da massa com a aceleração. Para a aceleração considera-se que a ferramenta se movimenta a uma velocidade inicial, v_o , e que se imobiliza totalmente num segundo. Para a massa considera-se, como em casos anteriores, que a secção superior da ferramenta possui 1000 kg, contudo neste cálculo é necessário considerar a secção inferior, onde se estima que esta secção possua no máximo 100 kg. A altura trata-se da distância entre o centro de gravidade ao chão. Esta verificação é realizada para o caso longitudinal e transversal, já que a mesa pode-se mover em ambos os sentidos.

Iniciando para o caso transversal.

$$\begin{aligned} (m_1 \times a_1) \times altura &\leq (m_1 \times 9,8) \times distância \text{ à roda} \\ \Leftrightarrow (1100 \times \frac{0 - v_o}{1}) \times 0,940 &\leq (1100 \times 9,8) \times 0,380 \\ \Leftrightarrow v_o &= 3,96 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Iniciando para o caso longitudinal.

$$\begin{aligned} (m_1 \times a_1) \times altura &\leq (m_1 \times 9,8) \times distância \text{ à roda} \\ \Leftrightarrow (1100 \times \frac{0 - v_o}{1}) \times 0,940 &\leq (1100 \times 9,8) \times 0,390 \\ \Leftrightarrow v_o &= 4,1 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Pelos resultados obtidos para existir uma estabilidade da ferramenta na sua movimentação a sua velocidade não pode ser superior a $3,96 \text{ m/s}$, valor próximo à velocidade máxima para a roda definida pelo fabricante, 4 m/s .

Segue-se os vários parafusos que ligam a superfície da mesa à restante estrutura, Figura 83, estes têm de superar a carga aplicada na superfície da mesa, 9880 N, sendo esta dividida tendo em conta o número de parafusos.

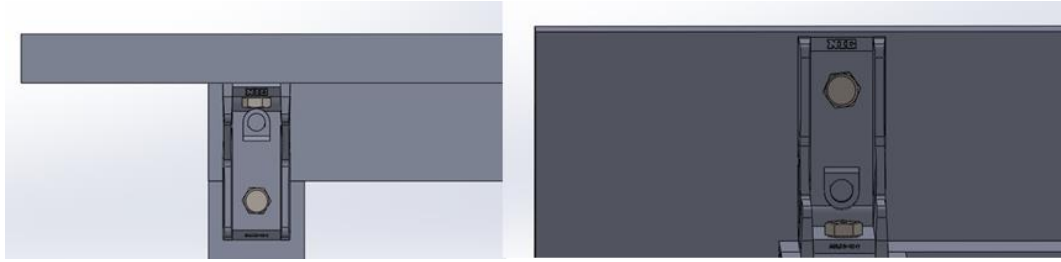


Figura 83 – Utilização de parafusos na mesa.

Na aplicação da força da mesa um dos parafusos encontra-se tracionado, parafuso aplicado verticalmente, enquanto o outro, aplicado horizontalmente, encontra-se ao corte.

No parafuso ao corte, aplicado na mesa da perna, é necessário se verificar as equações (47) e (48).

$\alpha_V = 0,8$, uma vez que se trata de um parafuso de classe 8.8

$f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$

$A = 36,6 \text{ mm}^2$

$$F_{V.Rd} = \frac{\alpha_V \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,8 \times 800 \times 36,6}{1,25} = 1843,2$$

$$F_{b.Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \times 0,83 \times 360 \times 8 \times 3}{1,25} = 14342,4 \text{ N}$$

O diâmetro é de 8 mm, a espessura t , corresponde a espessura da perna da mesa, 3 mm, f_u corresponde ao material da mesa, sendo um S235 tem se $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$

O valor de α_b é dado pelo menor valor entre $\alpha_d, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1,0$. Sendo que α_d é dado pela seguinte equação.

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0},$$

O valor de k_1 é o menor dos seguintes valores

$$2,8 \frac{e_2}{d_0}; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5$$

Os valores de e_1, e_2 e p_2 são obtidos através da dimensão da cantoneira, sendo $e_1 = 20 \text{ mm}$, $e_2 = 17,28 \text{ mm}$ e $p_2 = 40 \text{ mm}$. Sendo assim, têm-se:

$$\alpha_b = \left(\frac{20}{3 \times 8} = 0,83; \frac{800}{360} = 2,22; 1,0 \right) = 0,83$$

$$k_1 = \left(2,8 \frac{17,28}{8} = 6,048; 1,4 \frac{40}{8} - 1,7 = 5,3; 2,5 \right) = 2,5$$

Verificando as condições.

$$F_{V.Ed} = \frac{10000}{6} = 1666,67 \text{ N} \leq F_{V.Rd} = 1843,2$$

$$F_{V.Ed} = \frac{1000}{6} 1666,67 \text{ N} \leq F_{b.Rd} = 14342,4 \text{ N}$$

As condições verificam-se pelo que os parafusos M8 de classe 8.8, sujeitos ao corte, suportam os esforços aplicados na mesa.

Os parafusos tracionados, precisam de validar as equações (49) e (50).

$$F_{t.Ed} \leq F_{t.Rd}$$

$$F_{t.Ed} \leq B_{p.Rd}$$

Pela equação (54) calcula-se a resistência à tração. Como as cabeças não se encontram embebidas, $k_2 = 0,63$.

$$F_{t.Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,63 \times 800 \times 36,6}{1,25} = 14757,12 \text{ N}$$

A resistência ao punçoamento é dada pela equação (55), t_p trata-se da espessura da chapa sob a cabeça do parafuso ou a porca, tratando-se da espessura da cantoneira mais a da mesa.

$$B_{p.Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot f_u \cdot t_p \cdot d}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \times \pi \times 360 \times (25 + 7)}{1,25} = 17371,75 \text{ N}$$

Verificando as condições

$$F_{t.Ed} = 1666,67 \leq F_{t.Rd} = 14757,12$$

$$F_{t.Ed} = 1666,67 \leq B_{p.Rd} = 17371,75$$

5.2.2 Cálculo Numérico

Devido ao tamanho da ferramenta, o cálculo numérico será bastante complexo de se realizar com a ferramenta total, pelo que se opta na realização de dois cálculos, um na parte superior, envolvendo a superfície mesa, as placas e os restantes componentes que efetuam o ensaio, e outro na parte inferior, que inclui a mesa, e todos os componentes aplicados a esta.

Na realização do cálculo foi utilizado o aço estrutural da biblioteca para representar todos os componentes, excetuando o material das placas onde se aplicou o AISI 1045, sendo este necessário adicionar ao *software*, na seguinte tabela pode-se verificar as suas propriedades mecânicas.

Tabela 28 – Propriedades do aço estrutural utilizado, encontrado na galeria do Ansys.

Propriedade Mecânica	Valor
Densidade	7,85 kg/dm ³
Modulo de Elasticidade	200 × 10 ³ MPa
Coefficiente de Poisson	0,30
Tensão de cedência	250 MPa
Tensão de rotura	460 MPa

Tabela 29 – Propriedades do AISI 1045 adicionadas à biblioteca do Ansys. [41]

Propriedade Mecânica	Valor
Densidade	7,87 kg/dm ³
Modulo de Elasticidade	210 × 10 ³ MPa
Coefficiente de Poisson	0,30
Tensão de cedência	310 MPa
Tensão de rotura	565 MPa

Ambos os cálculos serão estáticos no domínio linear, onde se aplica o modelo matemático segundo a lei de Hooke.

Cálculo na secção superior

Para este cálculo apenas será considerada a secção superior da ferramenta, contudo na modelação desta parte não se considera o suporte do tubo integrante, as guias lineares nem os seus patins e adiciona-se dois tubos entre as placas internas, estes têm como função transmitir os esforços e aproximar o cálculo da realidade.

Em relação aos contactos entre os diversos componentes considera-se praticamente tudo “bonded” para facilitar o cálculo, porém na maior zona de interesse, os varões, aplica-se um contacto “frictionless” entre os varões e os casquilhos de esferas aplicados nas placas. Para os constrangimentos considera-se um apoio fixo na secção lateral da tampa da mesa do lado onde se aplica a placa externa-aplicação de força, e duas restrições de deslocamento aplicadas na parte inferior das placas internas impedindo um deslocamento na direcção y.

Em termos de carregamento aplica-se uma carga de 10kN, carga máxima aplicada numa cama de agulhas, em duas zonas, uma na célula de carga, com o seu sentido a ir para a placa interna, e a

outra na face do rolamento axial, rolamento situado no espaço interior da ferramenta, com o seu sentido a ir para a placa externa.

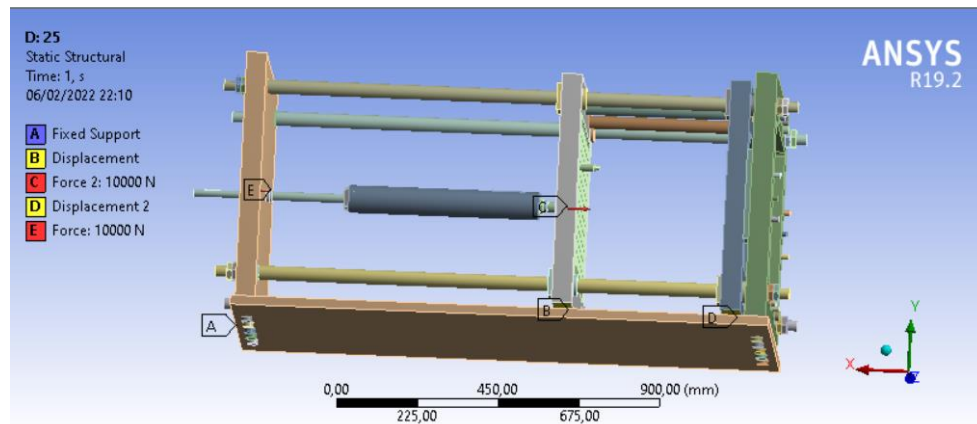


Figura 84 – Condições de fronteira e cargas definidas para o cálculo do numérico da parte superior.

Encontrando-se o modelo definido procede-se a geração da malha, nesta são utilizados dois tipos de elementos, quadrangulares e triangulares, onde os primeiros encontram-se aplicados na superfície da mesa e nos tubos adicionados para a realização do cálculo, e os triangulares encontram-se nos restantes componentes. Esta opção permite poupar elementos e tempo de computação, uma vez que os elementos quadrangulares são menos pesados para o cálculo, contudo apenas se podem aplicar em locais onde não existe uma necessidade de obter um resultado mais preciso. Para a definição do tamanho da malha realizou-se um estudo de convergência, onde por observação dos resultados obtidos, Tabela 30 e Gráfico 11, assume-se a partir de um tamanho de malha de 10 mm os resultados começam a convergir visto que o erro relativo, entre o novo calculo em relação ao anteriormente obtido, a partir destes valores são abaixo de 5% e a utilização de malhas ainda mais pequenas aumenta em demasia o tempo de cálculo.

Tabela 30 – Estudo da convergência da malha no cálculo numérico da secção superior.

Tamanho da malha (mm)	Deformação no eixo dos X (mm)	Erro relativo (%)
40	0,068049	—————
35	0,075711	11,26
25	0,060675	19,86
20	0,062282	2,66
17	0,064991	4,34
15	0,072132	10,99
13	0,057993	19,60
10	0,060577	4,46
8	0,062833	3,72

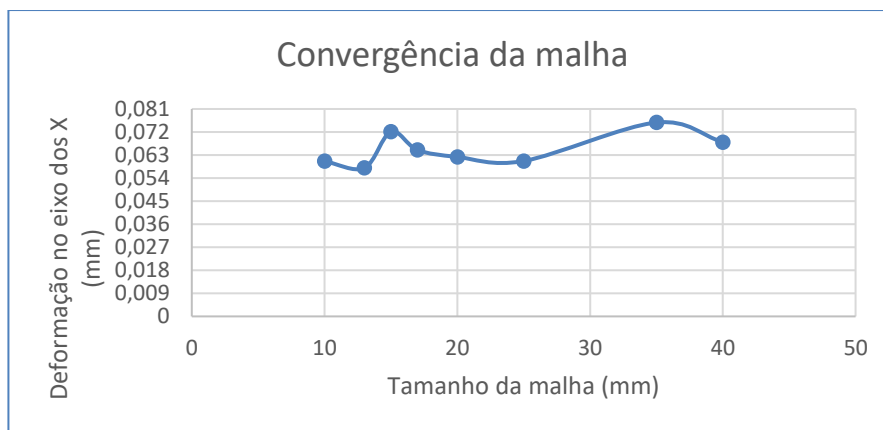


Gráfico 11 – Estudo da convergência de malha no cálculo numérico da secção superior.

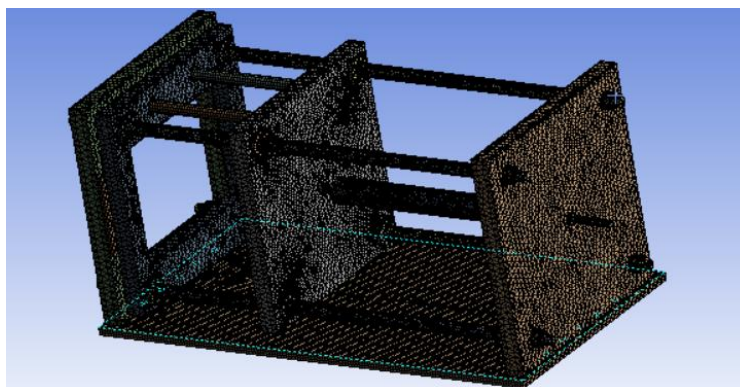


Figura 85 – Malha de 10 mm aplicada na ferramenta.

Realizando o cálculo obteve-se os seguintes resultados para a deformação total e tensão equivalente segundo Von-Mises.

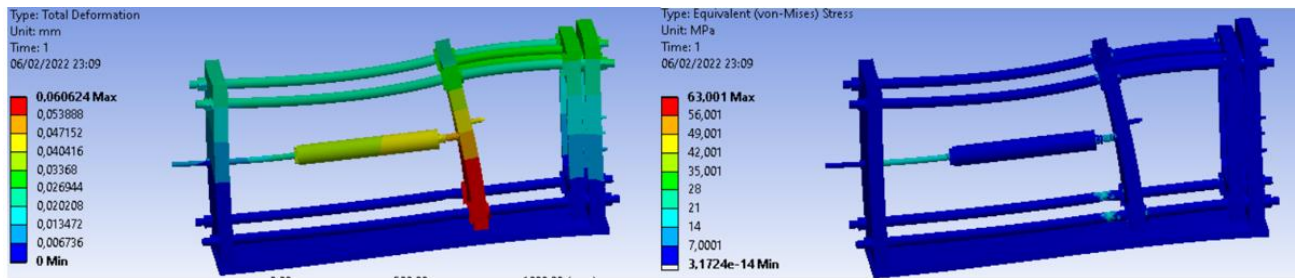


Figura 86 – À esquerda deformação total em mm; À direita tensão equivalente segundo von-Mises em MPa.

De seguida procede-se a uma análise de resultados mais detalhada, verificando a deformação segundo o eixo dos X, para tal considera-se a placa externa-criação da força com o centro do referencial.

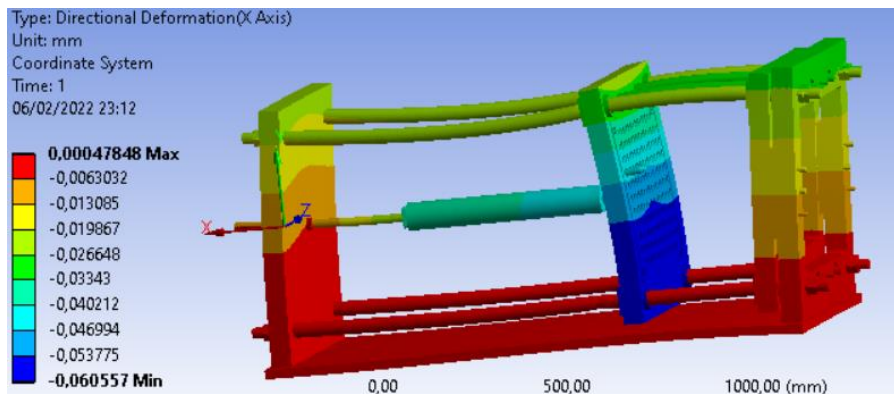


Figura 87 – Deformação direcional segundo o eixo do x para a secção superior em mm.

Por observação dos resultados observa-se que os dois varões inferiores se encontram tracionados enquanto os varões superiores comprimidos. O valor máximo obtido de deformação para estes, segundo a direção x, foi de 0,026 mm.

Em relação às placas, a parte inferior das placas externas e da placa interna-suporte de objeto encontra-se a ser tracionada estando a restante placa a ser comprimida, a tração existente na placa interna é explicada pelo facto de esta no ensaio encontrar-se fixa à placa externa. A placa interna-aplicação da força encontra-se toda ela a ser comprimida, possuindo esta o valor mais crítico de deformação de 0,061 mm.

Por análise da tensão equivalente aplicada na ferramenta verifica-se que o máximo atingindo foi de 28 MPa valor bastante inferior à tensão de cedência dos aços. Esta tensão máxima ocorre no parafuso de esferas e nos varões.

Os rolamentos axiais e as anilhas aplicadas, utilizadas nos varões e nos rolamentos axiais, cumprem com os requisitos possuindo baixos valores de deformação e de tensão.

Cálculo na secção inferior

Para o cálculo da secção inferior considera-se toda a estrutura da mesa e os componentes diretamente ligados a esta, como é o caso das rodas, sistema anti vibratório, guias lineares e placas externas. Como no caso anterior, todos os elementos foram considerados como aço estrutural excetuando as placas que se consideram o aço AISI 1045.

Neste caso aplicou-se uma carga de 1000 N, valor do peso da ferramenta definido para os cálculos analíticos, na mesa e considerou-se apoios fixos em todos os pés anti vibratórios.

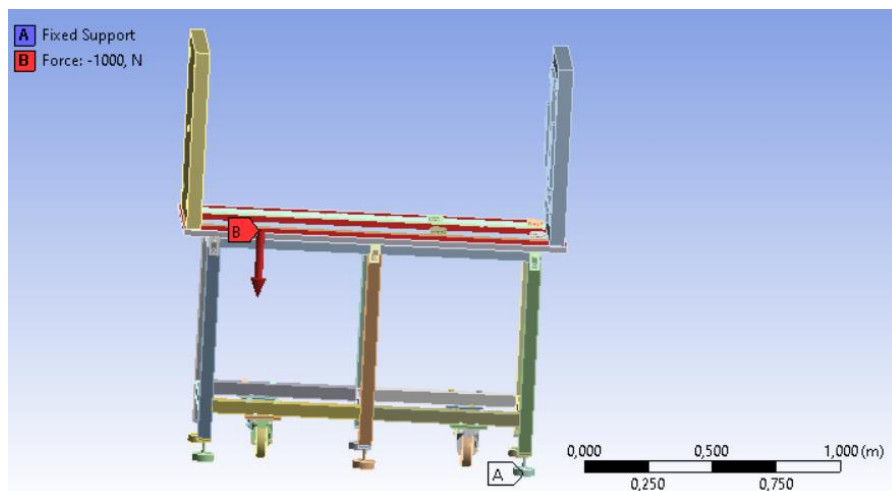


Figura 88 – Condições de fronteira no cálculo numérico da parte inferior.

Em termos de contactos considerou-se tudo bounded, como no caso anterior, excetuando na ligação entre a superfície da mesa com a estrutura, da ligação das cantoneiras com a mesa, das placas com mesa e com o adaptador do pé anti vibratório com a mesa, nestes casos considera-se um contacto do tipo “*frictional*” com um coeficiente de 0,2, valor utilizado para fricção de aço com aço.

Para este cálculo realizou-se um estudo de convergência da malha, Tabela 31, onde se verifica pelos resultados obtidos, tanto da deformação como do erro relativo, que os resultados convergem para uma malha de 35 mm.

Os elementos considerados para a malha foram triangulares e quadrangulares, estes últimos apenas foram aplicados na estrutura da mesa onde não existia qualquer tipo de furo.

Tabela 31 – Estudo de convergência da malha na superfície da mesa.

Tamanho da malha (mm)	Deformação segundo Y (mm)	Erro relativo (%)
60	0,0053	
55	0,0054	1,88
55	0,005	7,41
45	0,0052	4
40	0,00529	1,73
35	0,00528	0,19

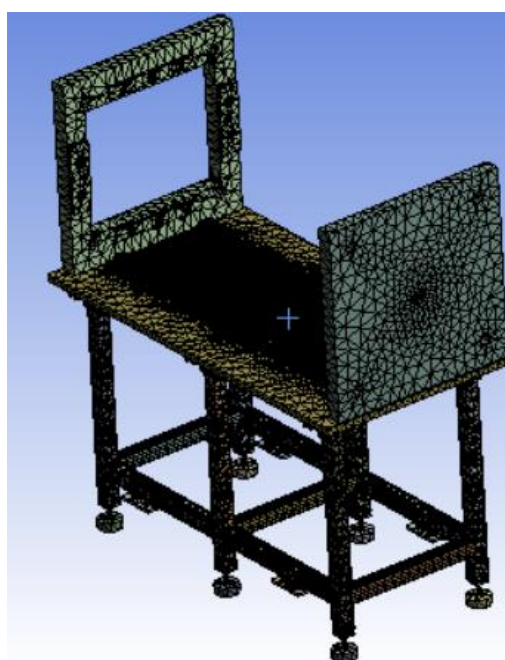


Figura 89 – Malha realizada para o cálculo da secção inferior.

Realizando o cálculo obteve-se os seguintes resultados, para o caso da deformação segundo y o referencial encontra-se no centro da superfície da mesa.

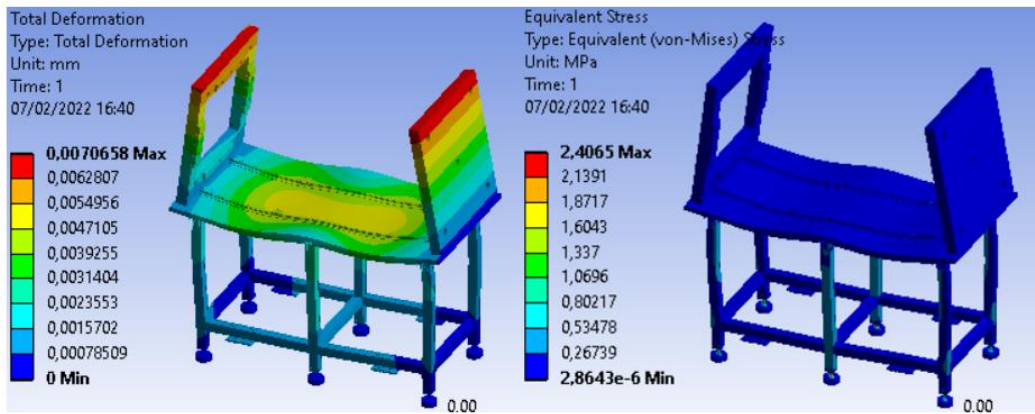


Figura 90 – À esquerda deformação total existente na secção inferior da ferramenta em mm. À direita tensão equivalente segundo von-Mises em MPa.

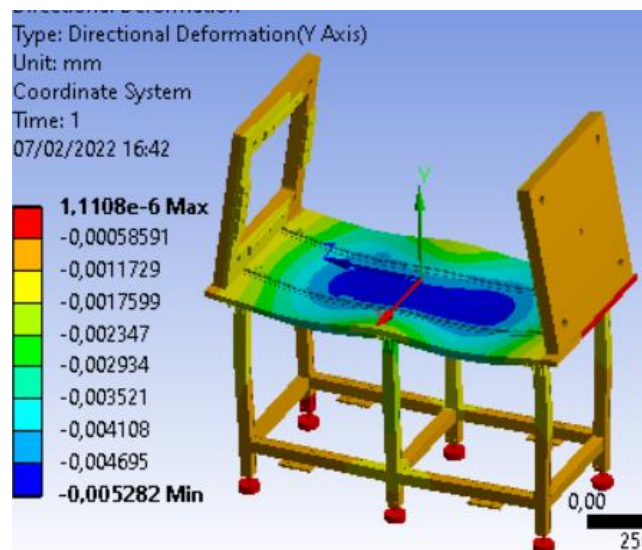


Figura 91 – Deformação segundo o eixo do Y em mm.

Por análise dos resultados verifica-se que a zona de maior tensão é nas pernas da estrutura com um valor máximo de 0,80 MPa, este valor é bastante inferior as tensões de cedência dos aços. A superfície da mesa encontra-se sobre a maior deformação atingindo 0,005 mm segundo o eixo dos y, este valor encontra-se na escala pretendida pelo que não acarreta quais queres problemas. Os resultados também mostram que não é necessário qualquer reforço à estrutura.

Sobre a peça adaptadora do pé anti vibratório verifica-se, como o esperado, que o pior caso se encontra nas pernas da mesa mais solicitadas, pernas do meio, contudo os seus valores da deformação, 0,0024 mm, e da tensão equivalente, 0,80 MPa, são muito baixos não causando qualquer tipo de constrangimento ao projeto.

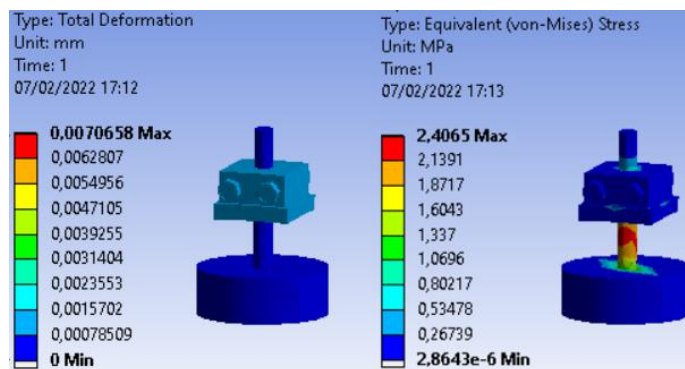


Figura 92 – À esquerda deformação total em mm para o pé anti vibratório; À direita tensão equivalente segundo von-Mises para o pé anti vibratório em MPa

5.2.3 Comparação de resultados

Encontrando-se realizados tanto os cálculos analíticos como os cálculos numéricos realizam-se uma comparação entre as duas vertentes.

Iniciando-se pelo parafuso de esferas, segundo os cálculos teóricos este irá suportar a carga de ensaio aplicada, 10kN, sem correr o risco de encurvadura, por sua vez, com resultado numérico da secção superior verifica-se que a tensão máxima aplicada neste componente é de 28 MPa, com uma deformação total associada de 0,033 mm. Estes resultados são positivos visto que validam a utilização deste componente com estas características no projeto.

Passando para os varões, existe uma diferença considerável nos resultados obtidos pelos dois métodos, enquanto no método teórico obteve-se uma deformação máxima de 0,37 mm no cálculo numérico obteve-se uma deformação de 0,026 mm. Esta diferença pode ser explicada pelas considerações tomadas no cálculo teórico, onde algumas simplificações, como o caso da consideração de encastramento do varão ou da placa, aplicadas podem ter comprometido o resultado final. Como os valores obtidos se encontram abaixo da escala do milímetro considera-se o valor do cálculo numérico correto, uma vez que nos resultados obtidos encontram-se os varões inferiores a ser tracionados enquanto os superiores a ser comprimidos. Visto que segundo o procedimento analítico este componente não sofre encurvadura pode-se aplicar estes varões na ferramenta.

O tubo integrante encontra-se, segundo valores numéricos, a sofrer uma tensão máxima de 7 MPa com uma deformação máxima associada de 0,033 mm. Estes valores são demasiado baixos em comparação com a tensão de cedência do material, e visto que o procedimento analítico valida este componente à encurvadura não existe necessidade de alteração deste componente.

O resultado numérico da parte superior da ferramenta permitiu confirmar as dimensões das placas, visto que o cálculo analítico é bastante dificultado de aplicar neste caso, devido às formas bastante complexas das placas. A deformação máxima ocorre, como o previsto, na placa interna-aplicação de força. Esta placa possui uma deformação máxima de 0.006 mm, um valor abaixo da escala do decimo de milímetro que não causa transtorno ao projeto. Em relação à carga, o máximo obtido nestas foi de 7 MPa valor inferior a tensão de cedência de um aço.

Os vários parafusos utilizados para fixar as placas convergem em ambos os métodos, onde existe uma validação para o seu uso através dos cálculos analíticos e uma confirmação desta validação com os resultados numéricos, onde a tensão máxima equivalente aplicada em qualquer parafuso é bastante inferior à sua tensão de cedência.

Por fim, analisa-se os cálculos referentes à mesa e à sua estrutura, começando com a tampa da mesa. Esta encontra-se validada à compressão segundo cálculos analíticos, tal confirma-se pelo cálculo analítico onde, segundo este, a superfície da mesa encontra-se com uma tensão máxima de 0,2 MPa. A deformação obtida nesta superfície foi no máximo 0,005 mm, este valor é bastante satisfatório, visto que elevadas deformações aqui presentes são prejudiciais ao bom funcionamento da ferramenta. A obtenção de um valor abaixo da escala do decimo de milímetro adiciona confiança para caso a ferramenta seja adaptada para outras funções ou caso seja adicionado mais componentes que implicam mais peso.

A restante estrutura encontra-se validada por ambos os cálculos à encurvadura e à compressão, sendo que ainda se comprovou que a estrutura consegue suportar todo o peso próprio e não tombar em caso de movimentação. Contudo é necessário, posteriormente, realizar um cálculo que valida a estrutura em relação à flexão, visto que a mesa pode embater em algo objeto ou pessoa, ou o contrário.

5.3 Desenhos Técnicos

Neste capítulo apresentam-se os desenhos técnicos das peças necessárias produzir, devido a sua dimensão estes encontram-se no Anexo B.

As dimensões dos vários componentes possuem uma tolerância linear e angular geral da classe fina, segundo a ISSO 2768-1, tolerâncias dimensionais gerais, sendo rugosidade das superfícies indicadas com um desvio médio aritmético de 1,6 μm . [42]

O desenho de conjunto segue uma estrutura BOM, *bill of materials*, que se trata de uma lista de materiais hierárquica onde no topo encontra-se o produto final encontrando-se ramificado nos vários subconjuntos. Desta forma é possível encontrar mais detalhes e especificidades de vários componentes e da montagem destes.

5.4 Orçamentação

Neste subcapítulo encontra-se um orçamento previsto para o custo da ferramenta, este reúne vários preços indicados para os diferentes componentes como uma pequena descrição de cada um. Para peças que são encomendadas de origem, ou seja, que são realizadas de raiz pelo projeto, não existindo *off the shelf*, como é o caso das várias peças adaptadoras, o seu preço é estimado considerando que os trabalhos de maquinagem, prevendo um custo de vinte euros por kilo. O preço final da maquiagem é obtido pela multiplicação dos trabalhos de maquinagem pelo número de unidades. O preço final do componente é a soma da sua compra com o preço da maquinagem. O preço de parafusos de ligação e porcas não se encontra na tabela.

O preço total obtido, tendo em conta algumas considerações na peça a maquinar, foi de 18187,40 euros, valor que se encontra dentro do orçamento.

Tabela 32 – Orçamentação do Projeto

Componente	Observações	Mat.	Preço (euros)	Uni.	Peso (kg)	Preço Final de maquinagem (20 euros/kg)	Preço total (euros)
Célula de carga	Célula da interface; Medições até 10kN, Não-Linearidade +/- 0.5%; Pequena e selada;	Aço inoxidável	710	1	*****	*****	710
Transformador da célula	_____	_____	420	1	*****	*****	420
Adaptador da Célula de carga	Peça adaptadora (a)- efetua a ligação da célula de carga com a placa interna.	Aço	_____	1	0,11	2,20	2,20
	Peça adaptadora (b)- efetua a ligação da célula de carga com o tubo integrante.	Aço	_____	1	0,171	3,42	3,42
Placas Internas	Placa interna de aplicação de força. Dimensão 646*646*56 mm; Acabamento superficial standard; Fabricante: Meus Burger	AISI 1045	1689,54	1	*****	*****	1614,72
	Placa interna de suporte de objeto Dimensão 646*646*56 mm; Acabamento superficial standard; Fabricante: Meus Burger	AISI 1045	1112,73	1	*****	*****	1541,64

Componente (continuação)	Observações	Mat.	Preço (euros)	Uni.	Peso (kg)	Preço de maquinagem (20 euros/kg)	Preço total (euros)
Placas Externas	Placa externa origem da força Dimensão 696*696*56 mm; Acabamento superficial standard; Fabricante: Meus Burger	AISI 1045	1689,54	1	*****	*****	1689,54
	Placa externa obtenção de dados Dimensão 696*696*56 mm; Acabamento superficial standard; Fabricante: Meus Burger	AISI 1045	1112,73	1	*****	*****	1112,73
Placa adaptadora da cama de agulhas	Peça que permite aplicar a cama de agulhas na ferramenta. Constitui-se em 4 placas, linha superior para placas laterais, linha inferior para placas superior/inferior	Aço	*****	2	5,47	109,33	218,65
		Aço	*****	2	1,27	25,43	50,80
Volante	Volante com diâmetro exterior de 200 mm, possui um punho com espessura de 59,5 mm; Tratamento de superfície aplicado - cromagem; Fornecedor: Misumi (AHLNKC250_20)	EN 1.0038 Equiv.	44	1	*****	*****	44,00
Varão	Varão THK h7; comprimento de 1605 mm, diâmetro de 40mm; Fornecedor Misumi (SF40(H7))	EN 1.3505 Equiv.	190,07	4	14,75 kg	1940	2700,23

Componente (continuação)	Observações	Mat.	Preço (euros)	Uni.	Peso (kg)	Preço de maquinagem (20 euros/kg)	Preço total (euros)
Superfície da mesa	Placa que irá ser colocada sobre a superfície da mesa de modo a aumentar a superfície. Comprimento de 1500 mm, largura de 765 mm e espessura de 25 mm.	S355	*****	1	223,69 kg	4473,86	4473,86
Guia linear	Dois patins, comprimento de 1365 mm ;Forecedor Misumi	Aço ao carbono	238	2	*****	*****	476,00
Chapa de ligação Guia liner-mesa	Chapa de ligação da guia linear à mesa; comprimento de 1365 mm, largura de 50 mm e espessura de 3 mm.	Aço	*****	2	1,57	31,33	62,86
Chapa de ligação dos Patins à Guia Linear	Chapa de ligação dos patins da guia às placas; comprimento de 55 mm , largura de 45mm e espessura de 3mm.	Aço	*****	4	0,04	0,74	2,97
Cantoneira Ligação Mesa	Cantoneiras para efetuar a junção da estrutura da mesa à tampa da mesma.. Fornecedor Misumi (ABLRD-40-8-CNH).	Aço	10,26	6	*****	*****	61,65

Componente (continuação)	Observações	Mat.	Preço (euros)	Uni.	Peso (kg)	Preço de maquinagem (20 euros/kg)	Preço total (euros)
Casquilhos	Casquilhos aplicados aos varões de guiamento; Fornecedor Misumi		35,21	8	*****	*****	281,68
	Casquilhos aplicados à placa externa; Fornecedor Misumi (LMU-MX20)	EN 1.3505 Equiv.	7,84	1	*****	*****	7,84
Roda niveladora	Suporte até 350 kg em movimento e 800 kg parada, diâmetro de 125 mm. Fornecedor BLICKLE/roda Algés (LH-POTH 125G-1)	poliureta no termoplá stico	72,83	4	*****	*****	291,32
Chapa de ligação Mesa- Roda	Chapa de ligação da mesa às rodas. Comprimento de 140mm, largura de 125mm e espessura de 10mm.	Aço	*****	4	1,34	26,80	107,22
Apoios Anti Vibratórios	Pé anti vibratório S1, suporta até 500 kg de carga, com uma haste M12 e um pé com 85 mm de diâmetro. Fornecedor Lesol	***** ****	11,60	6	*****	*****	69,60

Componente (continuação)	Observações	Mat.	Preço (euros)	Uni.	Peso (kg)	Preço de maquinagem (20 euros/kg)	Preço total (euros)
Adaptador Pé Anti vibratório	Peça que permite adaptar os apoios anti vibratórios na mesa	Aço	*****	6	0,43	8,61	51,62
Régua Linear	Fornecedor Mitutuyo/EA campos	***** ****	348	1	*****	*****	348
Leitor de dados	Fornecedor Mitutuyo/EA campos	***** ****	586	1	*****	*****	586
Parafuso de esferas	Parafuso transmite a força ao sistema, transformando a força rotativa em linear. Preço estimado tendo em conta os vários preços encontrados no fornecedor Misumi.	***** ****	700	1	*****	*****	700
Adaptação da régua linear	Peça em L que permite fixar o cursor na placa interna	Aço	*****	1	0,1	2	2
	Cantoneira em L para apoiar a guia linear à mesa	Aço	*****	2	0,37	7,35	14,708
Tubo integrante	Tubo que realiza ligação do parafuso de esferas à placa interna.	Aço	*****	1	4,20	83,80	83,80

Componente (continuação)	Observações	Mat.	Preço (euros)	Uni.	Peso (kg)	Preço de maquinagem (20 euros/kg)	Preço total (euros)
Suporte tupo integrante	Peça que permitirá fornecer suporte ao tubo integrante, da mesma forma que possui uma chaveta para impedir rotação da placa.	Aço	*****	1	17,14	342,86	342,86
Porca de fixação	Porca de fixação com um rasgo de chaveta KM4 com Arruela de fixação de MB4; Rosca de 20 mm; Diâmetro externo de 32 mm; Ranhura da chaveta- b=4 mm h=2mm; Fornecedor SK	Aço	19,59	1	*****	*****	19,59
Rolamentos Axiais	Rolamento axial da SKF, diâmetro interno de 20 mm, diâmetro externo de 40 mm; Capacidade estática básica de 37.5 kN; Capacidade estática dinâmica de 21,2 kN	Aço	44,97	2	*****	*****	89,94
Preço Total							18187,40

5.5 Estudo de deformação da cama de agulhas

Este subcapítulo serve para obter um resultado teórico da deformação realizada numa cama de agulhas, com este resultado poderá se realizar uma comparação com futuros resultados obtidos através do ensaio da ferramenta. Este cálculo teórico trata-se de um procedimento numérico realizado em Ansys sendo aplicado na cama de agulhas presente na Figura 26.

De forma a realizar o cálculo realiza-se um desenho cad do modelo, onde na zona de aplicação das agulhas encontra-se um rebaixo de 0,0001 mm, de modo a ser possível uma aplicação da força na zona correta sem grandes desvios da realidade. Uma separação do local da aplicação das agulhas em diversos corpos não seria aceitável uma vez que iria criar contactos inexistentes. Na seguinte figura observa-se a modelação da cama de agulhas.



Figura 93 – Modelação da cama de agulhas em estudo.

Por observação da utilização da cama de agulhas verifica-se que esta é fixada através de quatro furos localizados lateralmente, pelo que significa que a deformação da cama irá ocorrer na zona das agulhas centrais. Esta informação é importante uma vez que a deformação central afeta o curso das agulhas centrais provocando uma diminuição da força que estas exercem.

Posto isto, primeiramente é necessário realizar um cálculo onde se considera apenas as agulhas laterais obtendo a deformação que estas criam na zona central. Posteriormente, finaliza-se o estudo realizando um cálculo considerando as agulhas todas, utilizando uma carga para as agulhas centrais dependentes do novo curso.

Para o cálculo em Ansys é necessário definir o material da cama de agulhas, sendo este o papel fenólico, constituído por várias folhas de papel de celulose agrupadas por resinas de fenol-formaldeído.

Através do fabricante obteve-se apenas algumas propriedades, pelo que se teve de definir este material como isotrópico. Na Tabela 33 encontram-se as propriedades mecânicas do material que são adicionadas no software.

Tabela 33 – Propriedades mecânicas do papel fenólico PFCP206. [43]

Propriedades	Valor
Densidade	1,35 g/cm^3
Modulo de <i>Young</i>	9000 MPa
Tensão de rotura	120 MPa
Tensão de rotura à compressão	250 Mpa

Como referido anteriormente a placa encontra-se fixada pelos quatro tubos, sendo aí aplicado um suporte fixo, como observado na Figura 94.

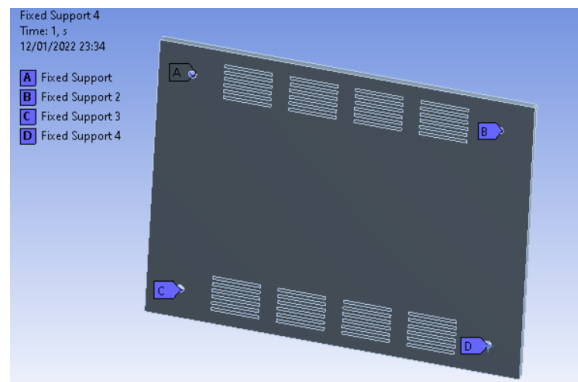


Figura 94 – Condições de fronteira aplicados na cama de agulhas.

A força encontra-se aplicado nas zonas laterais sendo quem em cada retângulo se encontra aplicados 200N em cada um, uma vez que existem 50 agulhas que exercem 4N de carga, Figura 95.

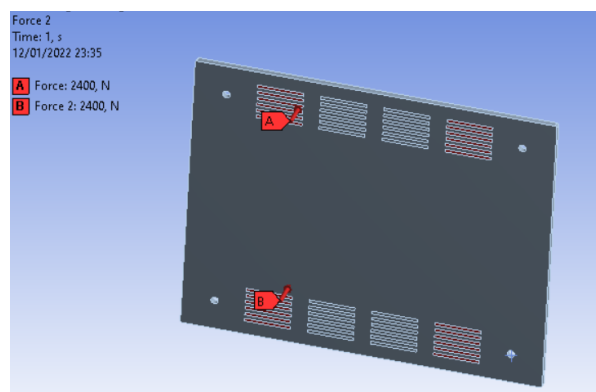


Figura 95 – Aplicação da carga na cama de agulhas.

A malha é composta por elementos triangulares e nas zonas de aplicação das agulhas é realizado um refinamento do tipo 1, Figura 96. O tamanho da restante malha, sem considerar as zonas de refinamento, é de 0,5 mm, valor obtido após convergência de malha, Tabela 34.

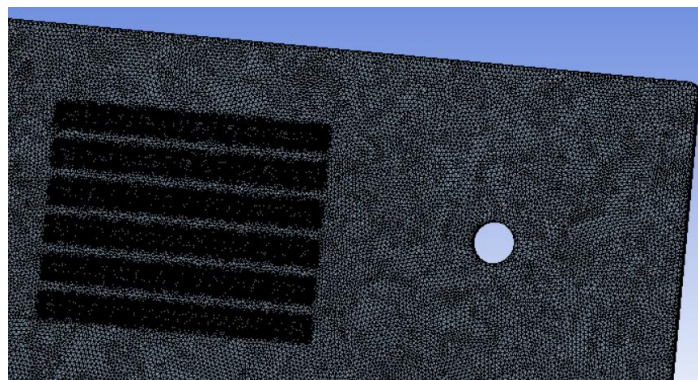


Figura 96 -Exemplificação da malha aplicada na cama de agulhas.

Tabela 34 – Convergência de malha do primeiro cálculo para a cama de agulhas.

Tamanho de elemento (mm)	Deformação máxima (mm)	Erro relativo (%)
9,5	4.020	—
9,0	4.025	0,15176
(...)	(...)	(...)
0,5	4.171	0,00974
0,4	4.107	0,0073
0,3	4.171	0,0073
0,2	4.171	0

Efetuando-se o cálculo obteve-se uma deformação máxima nos topos da cama de agulhas de 4,107 mm.

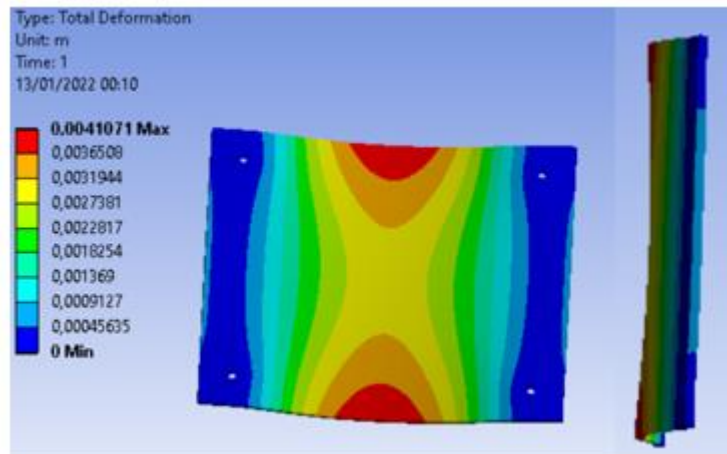


Figura 97 – Resultados da deformação total obtidos no primeiro cálculo para a cama de agulhas.

Com os resultados da deformação causados pelas agulhas laterais procede-se ao cálculo da força e curso que as agulhas centrais possuem. Em relação ao curso, normalmente uma agulha possuiria cerca de 4,3 mm, com a deformação obtida o curso passa para 0,193 mm ($4,3 - 4,107 = 0,193\text{mm}$). Por análise do Gráfico 3, pode-se retirar a equação da reta correspondente as agulhas de 4N, através dos pontos (4,3;4) e (0;1,269).

$$y = 0,635x + 1,269$$

Para o curso de 0,193 mm tem-se uma força por agulha na zona central de 1,392 N. Com estes valores repete-se o procedimento do cálculo anterior, mantendo-se o material, a geometria e os constrangimentos. A aplicação da força é similar, Figura 98, mantendo a força aplicada nas agulhas laterais e adicionando a carga das agulhas centrais, 69.6 N em cada retângulo.

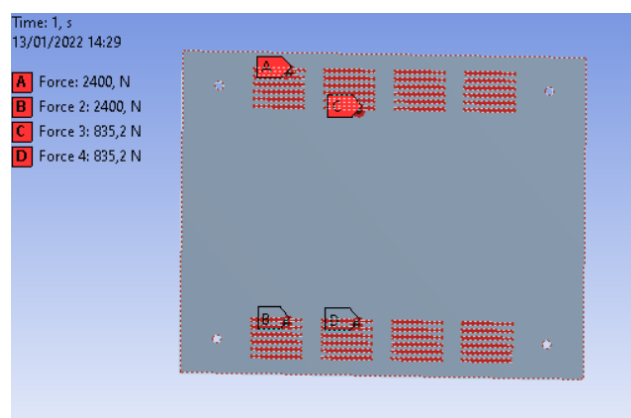


Figura 98 – Aplicação da carga no segundo cálculo realizado na cama de agulhas.

A malha é composta por elementos triangulares sendo aplicado um refinamento de nível 2 na zona de aplicação da carga. O tamanho da malha é de 0,85 mm, após ser atingida uma convergência de malha, Tabela 35.

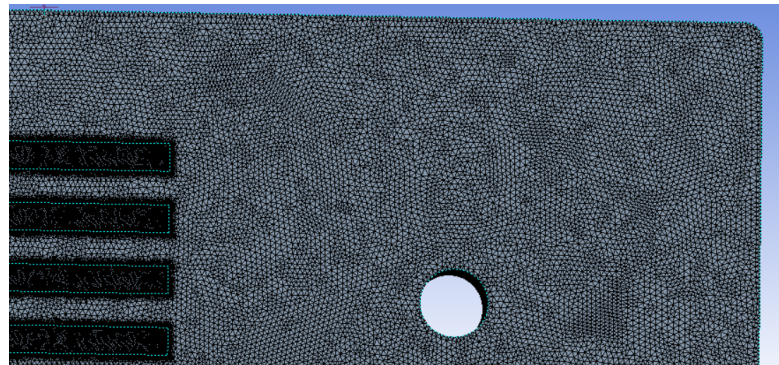


Figura 99 – Excerto da malha utilizada no segundo cálculo numérico da cama de agulhas.

Tabela 35 - Convergência de malha do segundo cálculo para a cama de agulhas.

Tamanho de elemento (mm)	Deformação máxima (mm)	Erro relativo (%)
9,5	7.607	-----
9,0	7.621	0,12621
(...)	(...)	(...)
0,95	7.742	0,00258
0,9	7.742	0,00387
0,85	7.742	0,00517

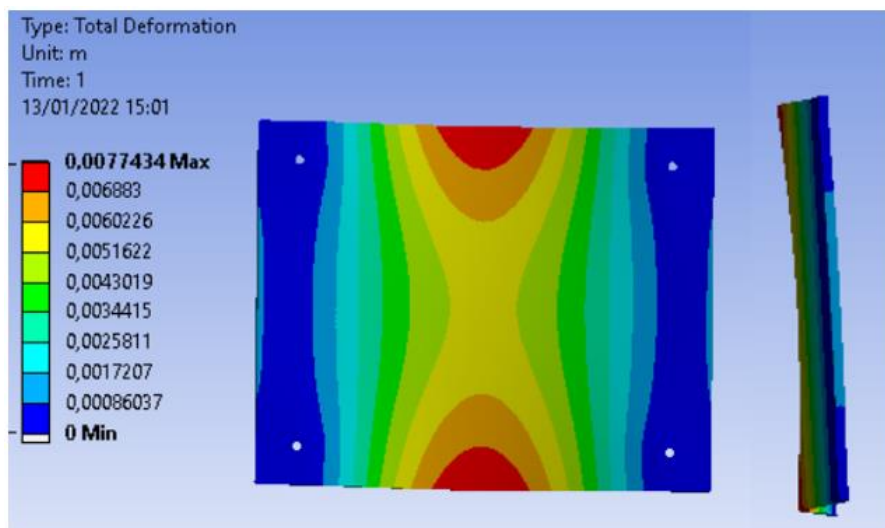


Figura 100 – Deformação total ocorrida na cama de agulhas após aplicação de carga.

Por observação do resultado verifica-se que a deformação máxima ocorre nos topos centrais da cama de agulhas, o que já era esperado tendo em conta a fixação desta. O valor máximo obtido foi de 7,74 mm valor a ser confirmado após realização de um ensaio experimental.

6. CONCLUSÕES

Por fim, dá-se encontra-se as principais conclusões a retirar de todo o trabalho realizado. Além dessas considerações finais, encontra-se também várias sugestões de possíveis trabalhos futuros que representam sugestões de melhoria/continuidade do projeto.

6.1 Conclusão

O objetivo da dissertação foi cumprido parcialmente com a conclusão do projeto de execução da ferramenta. A sua construção vai iniciar-se dentro de possível, iniciando-se pela produção dos diversos componentes.

Ao longo do projeto foi possível verificar-se as características propostas inicialmente para a ferramenta, tal foi possível devido a boa correlação entre os resultados numéricos e analíticos. Apesar deste fator deve-se ainda realizar uma última verificação à mesa, confirmando a sua resistência à flexão, caso tal não se comprove deve-se se optar pela adição de suportes na mesa, de forma a aumentar a sua rigidez.

A ponte de ligação entre o projeto e a sua construção trata-se dos desenhos técnicos, estando estes realizados e presentes nesta dissertação, o desenho de conjunto encontra-se segundo uma estrutura BOM.

Encontra-se também apresentado um orçamento que permite uma previsão do custo da obtenção dos diversos componentes da ferramenta, sendo este de 18 187,40 euros.

Além do projeto da ferramenta foi concretizado um estudo a uma cama de agulhas, fornecida pela empresa Controlar, este estudo é uma mais-valia para o futuro, uma vez que permite possuir uma base de comparação com futuros resultados experimentais obtidos pela ferramenta.

6.2 Trabalhos Futuros

Com perspetivas de trabalhos futuros, é fundamental terminar os pequenos detalhes necessários à finalização do projeto, que é o caso de uma maior análise dos desenhos técnicos. Posteriormente é

essencial retomar em contacto com fornecedores e produtores de forma a possibilitar a construção da ferramenta.

Construída a ferramenta deve-se testar o *digital image correlation* e realizar vários ensaios à cama de agulhas e comparar os resultados obtidos experimentalmente com os resultados teóricos e se for necessário rever a constituição da ferramenta.

Um processo importante para o futuro passa pela automatização da ferramenta, apesar deste projeto possuir em conta uma possível automatização não entra nos detalhes necessário, pelo que para o futuro será necessário realizar um projeto com este fim.

Por fim, uma adaptação da ferramenta para ensaios de tração será interessante, podendo ser capaz de realizar ensaios a provetes de origem não metálica, visto envolverem carregamentos mais baixos. Estando ainda previsto a possibilidade de ensaios dinâmicos utilizando placas móveis e excitadores.

BIBLIOGRAFIA

Shamkhalichenar, H., J. Bueche, C., & Choi, J. (2020). *Printed Circuit Board (PCB) Technology for Electrochemical Sensors and Sensing Platforms*. MDPI.

GerRad, Inc. (1984). *Introduction to In-circuit testing*. Massachusetts.

Olney, B. (2021). *Multilayer PCB Stackup Planning*. Austrália.

Biswas, S., Schoeberl, A., Hao, Y., Reiprich, J., Stauden, T., Pezoldt, J., & O. Jacobs, H. (2019). Integrated multilayer stretchable printed circuit boards paving the way for deformable active matrix. In *Nature Communications*.

D. Gaiero, U. (2014). *ICT Vs FCT Test : case studies*. SPEA.

Sick-Sensor Intellegent. (2015). Guia "Máquinas seguras": Máquina segura em seis passos.

S.E.M (u.d). Digital Image Correlation.

Gao, Y., Chang n, T., Su, Y., Xu, X., Zhang, Y., & Zhang, Q. (2015). High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- [1] Advanced Circuits. (2004). How to Build a Printed Circuit Board.
- [2] Multilayer PCB [Ultimate Guide] on Design and Manufacturing Process. (2021). Retrieved 23 December 2021, from <https://www.circuitstoday.com/multilayer-pcb>
- [3] In Circuit Testing (ICT) of PCB's
- [4] Tomasy, A. (2016). Automated Testbench for PCB (Master). CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE.
- [5] Houdek C; Caltronics Design & Assembly, Inc. (2021). Inspection and testing methods for PCBs: An overview. Caltronics Design & Assembly, Inc.
- [6] FeinMetall. (2021). Contact probes for pcb testing. FeinMetall.
- [7] Ingun, Test Probes Catalog [2010/2011], www.ingun.com
- [8] Atwell, C., 2019. Test Nixie Tube Driver PCBs on a Bed of Nails. [online] Hackster.io. Available at: <<https://www.hackster.io/news/test-nixie-tube-driver-pcbs-on-a-bed-of-nails-c4721f9164f1>> [Accessed 7 February 2022].
- [9] GerRad, Inc. (1984). Introduction to In-circuit testing. Massachusetts.
- [10] DIRECTIVA 2006/42/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 17 de Maio de 2006 relativa às máquinas e que altera a Directiva 95/16/CE (reformulação). (2006). Jornal Oficial Da União Europeia, (L 157/24).
- [11] Circuit Check Inc., "Design Guide : Introduction to Automated Test Fixtures," Maple Grove, MN
- [12] Lord, J. (2010). Digital Image Correlation. Materials Today.
- [13] Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software. Presentation

- [14] Pratical guide for DIC. Retrieved 23 December 2021, from <https://digitalimagecorrelation.org>
- [15] Zhao, J., Sang, Y., & Duan, F. (2019). The state of the art of two-dimensional digital image correlation computational methodn.
- [16] Schmidt, S. O que é uma célula de carga | Como ela trabalha?. Retrieved 23 December 2021, from <https://www.hbm.com/pt/6768/como-uma-celula-de-carga-trabalha/>
- [17] Mitutoyo. (2021). LINEAR SCALE DRO SYSTEMS.
- [18] What is a Linear Potentiometer? | Variohm. (2020). Retrieved 23 December 2021, from <https://www.variohm.com/news-media/technical-blog-archive/what-is-a-linear-potentiometer->
- [19] Ultimate Guide: What Is Linear Potentiometer - Industrial Manufacturing Blog | linqip. (2021). Retrieved 23 December 2021, from <https://www.linqip.com/blog/ultimate-guide-what-is-linear-potentiometer/>
- [20] Lavaa, A. (2020). What is Potentiometer? Diagram, Symbols, Characteristics | Linqip. Retrieved 23 December 2021, from <https://www.linqip.com/blog/what-is-potentiometer/>
- [21] Cambridge Integrated Circuits Ltd. (2015). 500mm Type 2.12 Linear Sensor, technical sheet.
- [22] Linear Guides/Heavy Load. (2021). Retrieved 23 December 2021, from <https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/110300048850/?PNSearch=SX2WL24-%5b161-1479%2f1%5d&HissuCode=SX2WL24-%5b161-1479%2f1%5d&searchFlow=suggest2products&Keyword=SX2WL24-%5b161-1479%2f1%5d>
- [23] SKF (2015). Rolamentos de Esferas.

- [24] Standard LM Shaft by THK. (2021). Retrieved 23 December 2021, from <https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/221000087842/?CategorySpec=00000146755%3a%3aa%0900000004018%3a%3af>
- [25] Parafuso de Esferas, Catálogo geral. *THK*.
- [26] Ballscrew: technical information. *HIWIN*.
- [27] Euro código 3, parte 1:1 (2010).
- [28] Meireles, J. *Encurvadura, capítulo 3. Mecânica dos Materiais II*. Presentation, Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, Guimarães.
- [29] D. Pilkey, W. (2004). FORMULAS FOR STRESS, STRAIN, AND STRUCTURAL MATRICES. Technology & Engineering.
- [30] THK. *Linear Busching*.
- [31] Misumi. *Structure and Precision of Linear Guides & Linear Guide Preload and Allowable Load*.
- [32] SKF (2015). Rolamentos de Esferas.
- [33] Gomes, J., & Dourado, N. (2017). *Elementos de Apoio às aulas teórico-práticas da unidade curricular: Órgãos de máquina I*. Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, Guimarães
- [34] Skf.com. 2022. SKF. [online] Available at: <<https://www.skf.com/pt/products/rolling-bearings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/productid-51204>> [Accessed 7 February 2022].

- [35] Us.misumi-ec.com. n.d. Five Spoked Handwheels (MISUMI) | MISUMI | MISUMI. [online] Available at: <<https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/110300515230/?HissuCode=AHLNKC250-20&searchFlow=results2similartrn>> [Accessed 7 February 2022].
- [36] Standard LM Shaft by THK. (2021). Retrieved 23 December 2021, from <https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/221000087842/?CategorySpec=00000146755%3a%3aa%0900000004018%3a%3af>
- [37] Bushing With Lubrication Unit MX. (2021). Retrieved 23 December 2021, from [Flanged Linear Bushings/Single Type by MISUMI | MISUMI online shop - Select, configure, order \(misumi-ec.com\)](https://www.misumi-ec.com/Products/Bushings/Single%20Type%20by%20MISUMI%20-%20MISUMI%20online%20shop%20-%20Select,%20configure,%20order%20(misumi-ec.com))
- [38] Mitutoyo, Product: Linear Scale AT715. (2021). Retrieved 23 December 2021 [Mitutoyo, Product: Linear Scale AT715](https://www.mitutoyo.com/Products/Linear%20Scale/AT715)
- [39] Roda LH-POTH 125G-1-FI. (2021). Retrieved 23 December 2021, from <https://www.blickle.com/product/LH-POTH%20125G-1-FI-612176>
- [40] Lesol | Máquinas e Equipamentos -. (2021). Retrieved 23 December 2021, from <https://lesol-jgneto.com/>
- [41] AZoM.com. 2013. AISI 1045 Carbon Steel (UNS G10450). [online] Available at: <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9153>> [Accessed 7 February 2022].
- [42] Morais, S. (2016). *Desenho Técnico Básico -3* (26th ed.). Porto Editora.
- [43] Attwater & Sons.2013. *B4B Product Data Sheet*. Attwater & Sons Ltd.

ANEXO A – APOIO AO CÁLCULO DOS VARÕES

Inicialmente apresentam-se os resultados das forças aplicadas nos varões tendo em conta o quadrante definido pelo referencial cartesiano aplicado na placa, para tal são aplicadas as seguintes equações.

$$P1 = \frac{1}{4}w + \frac{x_0}{2X}w + \frac{y_0}{2Y}$$

$$P2 = \frac{1}{4}W - \frac{x_0}{2X}w + \frac{y_0}{2Y}$$

$$P3 = \frac{1}{4}W + \frac{x_0}{2X}w - \frac{y_0}{2Y}$$

$$P4 = \frac{1}{4}W - \frac{x_0}{2X}w - \frac{y_0}{2Y}$$

Iniciando pelo quadrante superior esquerdo, onde se têm um valor de X negativo e um de Y positivo

Tabela 36 – Resultados de força obtidas com posicionamento do punção do quadrante superior esquerdo.

X0	Yo	P1	P2	P3	P4
-0,011	0,0055	2447,719	2656,844	2343,156	2552,281
-0,011	0,041	2785,171	2994,297	2005,703	2214,829
-0,011	0,0765	3122,624	3331,749	1668,251	1877,376
-0,011	0,112	3460,076	3669,202	1330,798	1539,924
-0,011	0,1475	3797,529	4006,654	993,346	1202,471
-0,011	0,183	4134,981	4344,106	655,8935	865,019
-0,042	0,0055	2153,042	2951,521	2048,479	2846,958
-0,042	0,041	2490,494	3288,973	1711,027	2509,506
-0,042	0,0765	2827,947	3626,426	1373,574	2172,053
-0,042	0,112	3165,399	3963,878	1036,122	1834,601
-0,042	0,1475	3502,852	4301,331	698,6692	1497,148
-0,042	0,183	3840,304	4638,783	361,2167	1159,696
-0,073	0,0055	1858,365	3246,198	1753,802	3141,635
-0,073	0,041	2195,817	3583,65	1416,35	2804,183
-0,073	0,0765	2533,27	3921,103	1078,897	2466,73
-0,073	0,112	2870,722	4258,555	741,4449	2129,278
-0,073	0,1475	3208,175	4596,008	403,9924	1791,825
-0,073	0,183	3545,627	4933,46	66,53992	1454,373
-0,104	0,0055	1563,688	3540,875	1459,125	3436,312

-0,104	0,041	1901,141	3878,327	1121,673	3098,859
-0,104	0,0765	2238,593	4215,779	784,2205	2761,407
-0,104	0,112	2576,046	4553,232	446,7681	2423,954
-0,104	0,1475	2913,498	4890,684	109,3156	2086,502
-0,104	0,183	3250,951	5228,137	-228,137	1749,049
-0,135	0,0055	1269,011	3835,551	1164,449	3730,989
-0,135	0,041	1606,464	4173,004	826,9962	3393,536
-0,135	0,0765	1943,916	4510,456	489,5437	3056,084
-0,135	0,112	2281,369	4847,909	152,0913	2718,631
-0,135	0,1475	2618,821	5185,361	-185,361	2381,179
-0,135	0,183	2956,274	5522,814	-522,814	2043,726
-0,166	0,0055	974,3346	4130,228	869,7719	4025,665
-0,166	0,041	1311,787	4467,681	532,3194	3688,213
-0,166	0,0765	1649,24	4805,133	194,8669	3350,76
-0,166	0,112	1986,692	5142,586	-142,586	3013,308
-0,166	0,1475	2324,144	5480,038	-480,038	2675,856
-0,166	0,183	2661,597	5817,49	-817,49	2338,403
-0,197	0,0055	679,6578	4424,905	575,0951	4320,342
-0,197	0,041	1017,11	4762,357	237,6426	3982,89
-0,197	0,0765	1354,563	5099,81	-99,8099	3645,437
-0,197	0,112	1692,015	5437,262	-437,262	3307,985
-0,197	0,1475	2029,468	5774,715	-774,715	2970,532
-0,197	0,183	2366,92	6112,167	-1112,17	2633,08
-0,228	0,0055	384,981	4719,582	280,4183	4615,019
-0,228	0,041	722,4335	5057,034	-57,0342	4277,567
-0,228	0,0765	1059,886	5394,487	-394,487	3940,114
-0,228	0,112	1397,338	5731,939	-731,939	3602,662
-0,228	0,1475	1734,791	6069,392	-1069,39	3265,209

Passando para o quadrante superior direito, onde se têm um valor de X positivo e um de Y positivo.

Tabela 37- Resultados de força obtidas com posicionamento do punção do quadrante superior direito.

X0	Yo	P1	P2	P3	P4
0,02	0,0055	2742,395	2362,167	2637,8327	2257,605
0,02	0,041	3079,848	2699,62	2300,380228	1920,152
0,02	0,0765	3417,3	3037,072	1962,927757	1582,7
0,02	0,112	3754,753	3374,525	1625,475285	1245,247
0,02	0,1475	4092,205	3711,977	1288,022814	907,7947
0,02	0,183	4429,658	4049,43	950,5703422	570,3422
0,051	0,0055	3037,072	2067,49	2932,509506	1962,928
0,051	0,041	3374,525	2404,943	2595,057034	1625,475
0,051	0,0765	3711,977	2742,395	2257,604563	1288,023
0,051	0,112	4049,43	3079,848	1920,152091	950,5703
0,051	0,1475	4386,882	3417,3	1582,69962	613,1179

0,051	0,183	4724,335	3754,753	1245,247148	275,6654
0,082	0,0055	3331,749	1772,814	3227,186312	1668,251
0,082	0,041	3669,202	2110,266	2889,73384	1330,798
0,082	0,0765	4006,654	2447,719	2552,281369	993,346
0,082	0,112	4344,106	2785,171	2214,828897	655,8935
0,082	0,1475	4681,559	3122,624	1877,376426	318,4411
0,082	0,183	5019,011	3460,076	1539,923954	-19,0114
0,113	0,0055	3626,426	1478,137	3521,863118	1373,574
0,113	0,041	3963,878	1815,589	3184,410646	1036,122
0,113	0,0765	4301,331	2153,042	2846,958175	698,6692
0,113	0,112	4638,783	2490,494	2509,505703	361,2167
0,113	0,1475	4976,236	2827,947	2172,053232	23,76426
0,113	0,183	5313,688	3165,399	1834,60076	-313,688
0,144	0,0055	3921,103	1183,46	3816,539924	1078,897
0,144	0,041	4258,555	1520,913	3479,087452	741,4449
0,144	0,0765	4596,008	1858,365	3141,634981	403,9924
0,144	0,112	4933,46	2195,817	2804,18251	66,53992
0,144	0,1475	5270,913	2533,27	2466,730038	-270,913
0,144	0,183	5608,365	2870,722	2129,277567	-608,365
0,175	0,0055	4215,779	888,7833	4111,21673	784,2205
0,175	0,041	4553,232	1226,236	3773,764259	446,7681
0,175	0,0765	4890,684	1563,688	3436,311787	109,3156
0,175	0,112	5228,137	1901,141	3098,859316	-228,137
0,175	0,1475	5565,589	2238,593	2761,406844	-565,589
0,175	0,183	5903,042	2576,046	2423,954373	-903,042
0,206	0,0055	4510,456	594,1065	4405,893536	489,5437
0,206	0,041	4847,909	931,5589	4068,441065	152,0913
0,206	0,0765	5185,361	1269,011	3730,988593	-185,361
0,206	0,112	5522,814	1606,464	3393,536122	-522,814
0,206	0,1475	5860,266	1943,916	3056,08365	-860,266
0,206	0,183	6197,719	2281,369	2718,631179	-1197,72
0,237	0,0055	4805,133	299,4297	4700,570342	194,8669
0,237	0,041	5142,586	636,8821	4363,117871	-142,586
0,237	0,0765	5480,038	974,3346	4025,665399	-480,038
0,237	0,112	5817,49	1311,787	3688,212928	-817,49
0,237	0,1475	6154,943	1649,24	3350,760456	-1154,94

Seguindo-se o quadrante inferior esquerdo, onde se têm um valor de X negativo e um de Y positivo.

Tabela 38 - Resultados de força obtidas com posicionamento do punção do quadrante inferior esquerdo.

X0	Yo	P1	P2	P3	P4
-0,011	-0,03	2110,266	2319,391635	2680,608	2889,734
-0,011	-0,0655	1772,814	1981,939163	3018,061	3227,186

-0,011	-0,101	1435,361	1644,486692	3355,513	3564,639
-0,011	-0,1365	1097,909	1307,034221	3692,966	3902,091
-0,011	-0,172	760,4563	969,581749	4030,418	4239,544
-0,031	-0,03	1920,152	2509,505703	2490,494	3079,848
-0,031	-0,0655	1582,7	2172,053232	2827,947	3417,3
-0,031	-0,101	1245,247	1834,60076	3165,399	3754,753
-0,031	-0,1365	907,7947	1497,148289	3502,852	4092,205
-0,031	-0,172	570,3422	1159,695817	3840,304	4429,658
-0,031	-0,03	1920,152	2509,505703	2490,494	3079,848
-0,031	-0,0655	1582,7	2172,053232	2827,947	3417,3
-0,031	-0,101	1245,247	1834,60076	3165,399	3754,753
-0,031	-0,1365	907,7947	1497,148289	3502,852	4092,205
-0,031	-0,172	570,3422	1159,695817	3840,304	4429,658
-0,031	-0,03	1920,152	2509,505703	2490,494	3079,848
-0,031	-0,0655	1582,7	2172,053232	2827,947	3417,3
-0,031	-0,101	1245,247	1834,60076	3165,399	3754,753
-0,031	-0,1365	907,7947	1497,148289	3502,852	4092,205
-0,031	-0,172	570,3422	1159,695817	3840,304	4429,658
-0,031	-0,03	1920,152	2509,505703	2490,494	3079,848
-0,031	-0,0655	1582,7	2172,053232	2827,947	3417,3
-0,031	-0,101	1245,247	1834,60076	3165,399	3754,753
-0,031	-0,1365	907,7947	1497,148289	3502,852	4092,205
-0,031	-0,172	570,3422	1159,695817	3840,304	4429,658
-0,031	-0,03	1920,152	2509,505703	2490,494	3079,848
-0,031	-0,0655	1582,7	2172,053232	2827,947	3417,3
-0,031	-0,101	1245,247	1834,60076	3165,399	3754,753
-0,031	-0,1365	907,7947	1497,148289	3502,852	4092,205
-0,031	-0,172	570,3422	1159,695817	3840,304	4429,658
-0,031	-0,03	1920,152	2509,505703	2490,494	3079,848
-0,031	-0,0655	1582,7	2172,053232	2827,947	3417,3
-0,031	-0,101	1245,247	1834,60076	3165,399	3754,753
-0,031	-0,1365	907,7947	1497,148289	3502,852	4092,205
-0,031	-0,172	570,3422	1159,695817	3840,304	4429,658
-0,062	-0,03	1625,475	2804,18251	2195,817	3374,525
-0,062	-0,0655	1288,023	2466,730038	2533,27	3711,977
-0,062	-0,101	950,5703	2129,277567	2870,722	4049,43
-0,062	-0,1365	613,1179	1791,825095	3208,175	4386,882

Por fim, apresenta-se a tabela representante do quadrante inferior direito, onde se tem x positivo e y negativo.

Tabela 39 - Resultados de força obtidas com posicionamento do punção do quadrante inferior direito.

X0	Yo	P1	P2	P3	P4
0,02	-0,03	2404,943	2024,715	2975,285	2595,057
0,02	-0,0655	2067,49	1687,262	3312,738	2932,51
0,02	-0,101	1730,038	1349,81	3650,19	3269,962
0,02	-0,1365	1392,586	1012,357	3987,643	3607,414
0,02	-0,172	1055,133	674,9049	4325,095	3944,867
0,031	-0,03	2509,506	1920,152	3079,848	2490,494
0,031	-0,0655	2172,053	1582,7	3417,3	2827,947
0,031	-0,101	1834,601	1245,247	3754,753	3165,399
0,031	-0,1365	1497,148	907,7947	4092,205	3502,852
0,031	-0,172	1159,696	570,3422	4429,658	3840,304
0,031	-0,03	2509,506	1920,152	3079,848	2490,494
0,031	-0,0655	2172,053	1582,7	3417,3	2827,947
0,031	-0,101	1834,601	1245,247	3754,753	3165,399
0,031	-0,1365	1497,148	907,7947	4092,205	3502,852
0,031	-0,172	1159,696	570,3422	4429,658	3840,304
0,031	-0,03	2509,506	1920,152	3079,848	2490,494
0,031	-0,0655	2172,053	1582,7	3417,3	2827,947
0,031	-0,101	1834,601	1245,247	3754,753	3165,399
0,031	-0,1365	1497,148	907,7947	4092,205	3502,852
0,031	-0,172	1159,696	570,3422	4429,658	3840,304
0,031	-0,03	2509,506	1920,152	3079,848	2490,494
0,031	-0,0655	2172,053	1582,7	3417,3	2827,947
0,031	-0,101	1834,601	1245,247	3754,753	3165,399
0,031	-0,1365	1497,148	907,7947	4092,205	3502,852
0,031	-0,172	1159,696	570,3422	4429,658	3840,304
0,031	-0,03	2509,506	1920,152	3079,848	2490,494
0,031	-0,0655	2172,053	1582,7	3417,3	2827,947
0,031	-0,101	1834,601	1245,247	3754,753	3165,399
0,031	-0,1365	1497,148	907,7947	4092,205	3502,852
0,031	-0,172	1159,696	570,3422	4429,658	3840,304
0,031	-0,03	2509,506	1920,152	3079,848	2490,494
0,031	-0,0655	2172,053	1582,7	3417,3	2827,947
0,031	-0,101	1834,601	1245,247	3754,753	3165,399
0,031	-0,1365	1497,148	907,7947	4092,205	3502,852

0,031	-0,172	1159,696	570,3422	4429,658	3840,304
0,031	-0,03	2509,506	1920,152	3079,848	2490,494
0,031	-0,0655	2172,053	1582,7	3417,3	2827,947
0,031	-0,101	1834,601	1245,247	3754,753	3165,399
0,031	-0,1365	1497,148	907,7947	4092,205	3502,852

Para o cálculo da deformação, aplicam-se as seguintes equações apoiadas pelo software *Excel*, pelas razões descritas anteriormente no capítulo 0 no ponto relativo aos varões. Onde $E = 2 \times 10^{11} Pa$ e $I = 3,97 \times 10^{-8} m^4$.

$$V_0 = -\frac{12EI}{L^3} \bar{F}_w - \frac{6EI}{L^2} \bar{F}_\theta$$

$$M_0 = \frac{6EI}{L^2} \bar{F}_w + \frac{2EI}{L} \bar{F}_\theta$$

$$F_w = \frac{c < x - a >^2}{2EI}$$

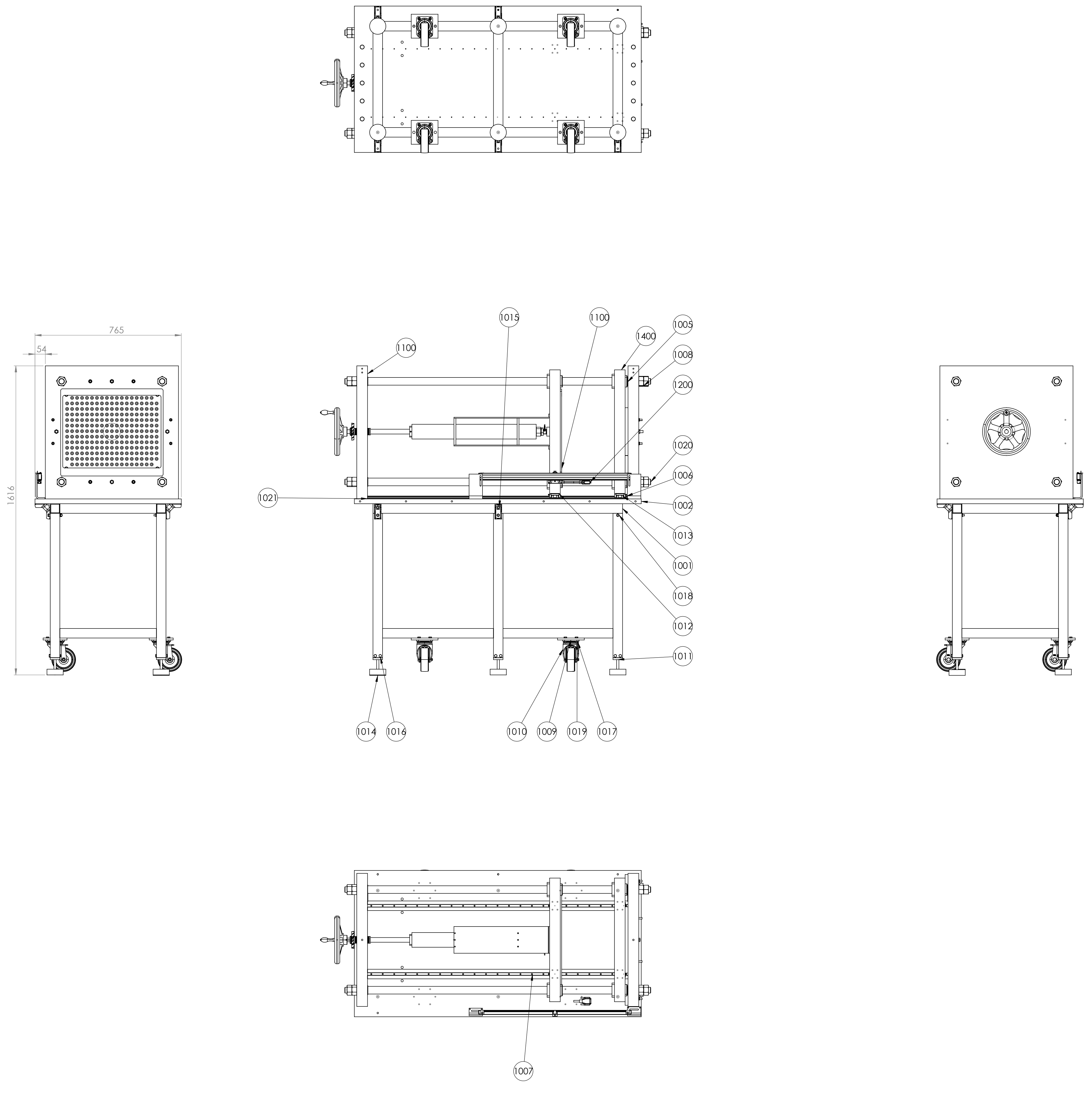
$$F_\theta = -\frac{c < x - a >}{2EI}$$

Tabela 40 – Resultados obtidos para a deformação do varão

x (m)	a (m)	c (Nm)	F_w	F_θ	\bar{F}_w	\bar{F}_θ	w_0	θ_0	L (m)	w (mm)
0,028			0	0						-0,009
0,029			4,2 $\times 10^{-8}$	-8 $\times 10^{-5}$						-0,01014
0,030			1,7 $\times 10^{-7}$	-0,0002						-0,01083
0,031	0,028	660,21	3,7 $\times 10^{-7}$	-0,0002	0,02348	-0,111	0	0	1,365	-0,01115
0,032			6,6 $\times 10^{-7}$	-0,0003						-0,01216
0,033			1 $\times 10^{-7}$	-0,0004						-0,01283
0,034			1,5 $\times 10^{-7}$	-0,0005						-0,01350
.....

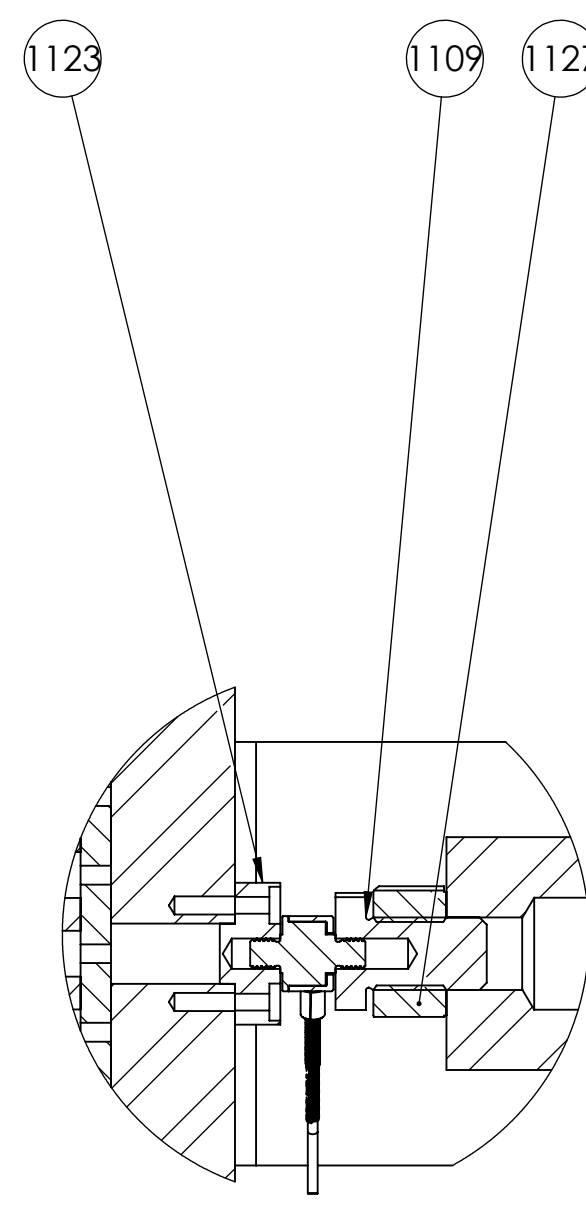
0,429	0,028	660,21	0,00668	-0,0333	0,02348	-0,111	0	0	1,365	-0,14116
.....
1,365	0,028	660,21	0,02348	-0,0351	0,02348	-0,111	0	0	1,365	4,4 $\times 10^{-12}$

ANEXO B - DESENHOS TÉCNICOS

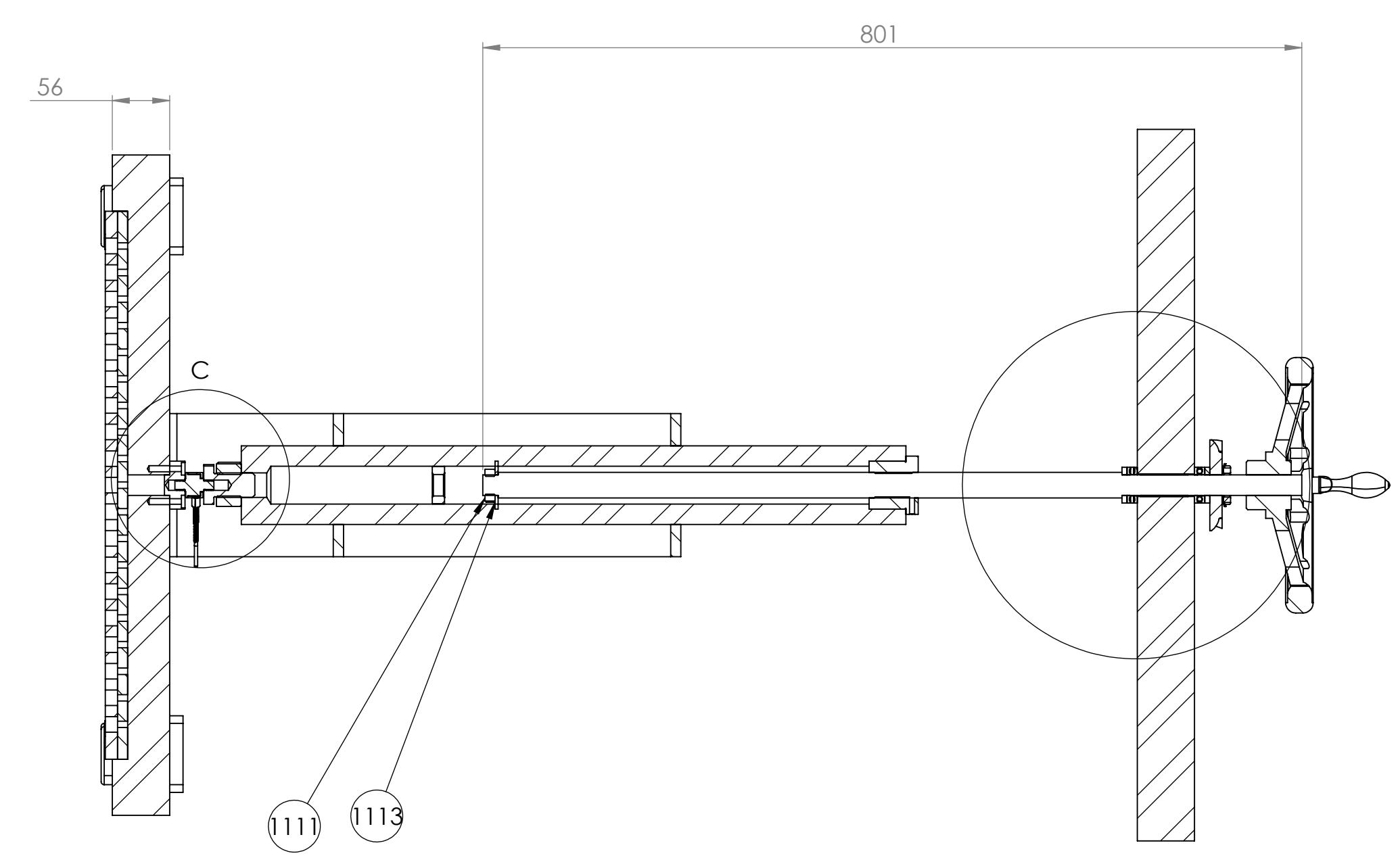


ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1001	Mesa		1
1002	Chapa_mesa		1
1005	Anilha 2 mm, fixacao de porca		8
1006	SK2WL24_1365		2
1007	parafuso para ligacao guia linear		46
1008	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M30 x 3.5 -W-N		16
1009	chapa_ligacao roda (desenho)		4
1010	LH-POJH_125G-1_251371-214		4
1011	Adaptador_montagem(idea3)	Efetua a ligacao entre os pés anti vibratórios e a mesa	6
1012	chapa ligacao guia placa desenho		4
1013	parafuso unbrako		16
1014	Apoio antivibratorio S1 Lesal		6
1015	ABLRD-40-8-CNHS(cantoneira)	Realiza a ligacao entre a Superficie da mesa e a estrutura da mesa	6
1016	B18.2.3.5M - Hex bolt M8 x 1.25 x 55 -22N		12
1017	B18.2.4.5M - Hex jam nut, M8 x 1.25 -D-N		34
1018	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M8 x 1.25 x 70 -22MN		6
1019	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M8 x 1.25 x 25 -25MN		16
1020	tubo guiamento		4
1021	ligacaomesa		2
1100	Sub conjunto 1100- Sistema transmissao		
1200	Sub conjunto 1200- Sistema obtencao deslocamento		1
1400	Sub conjunto 1400- Sistema fixacao de placas		

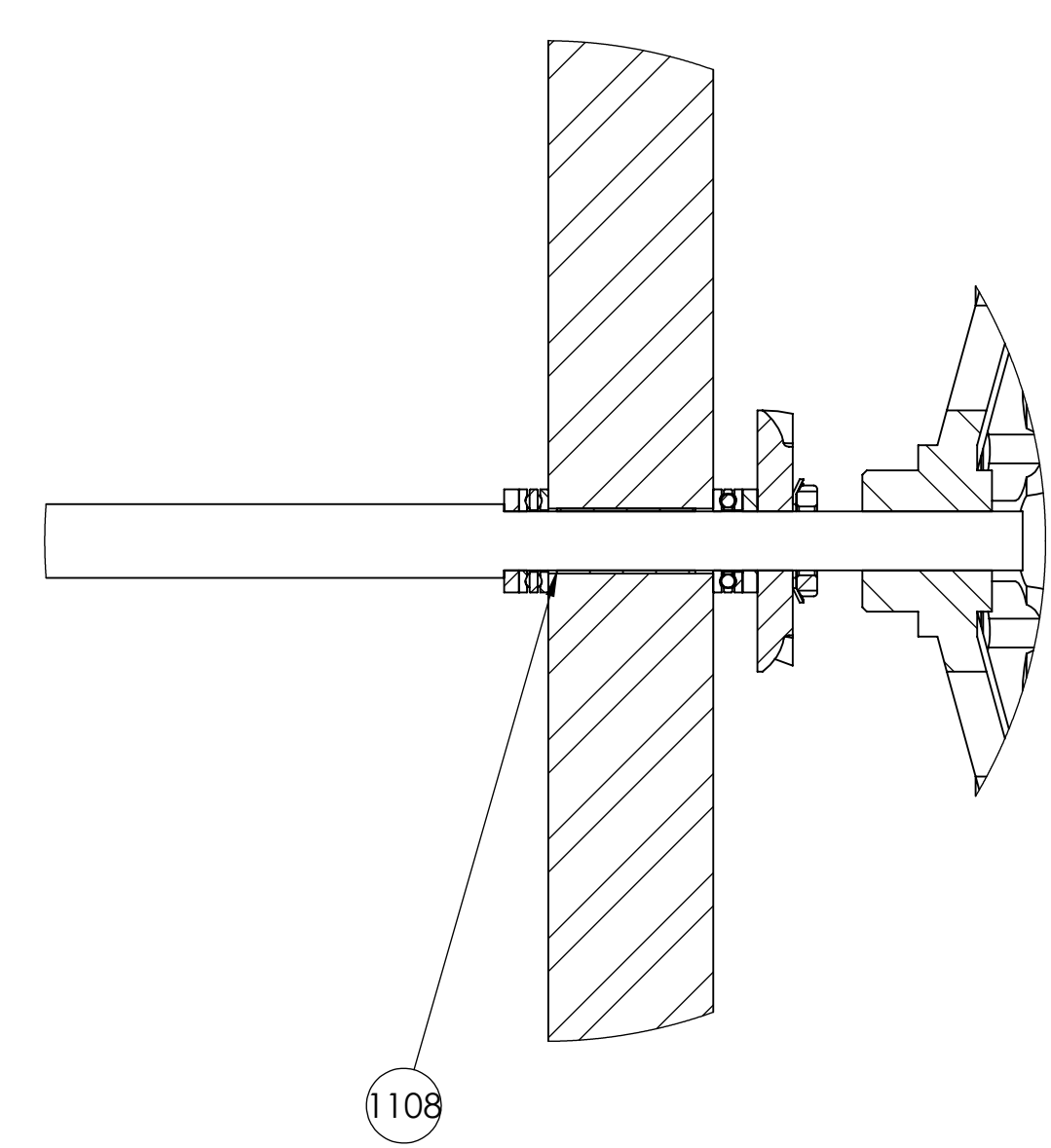
Designação		Nº Norma		Material		Nº Desenho		Produto semi acabado		Peso		Observações	
		Nº Desenho		Nº Ref		Nº Modelo		Nº Trabalho					
Desenho de conjunto da ferramenta 1000													
Tolerâncias Lineares Gerais (mm)													
de 0,5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000						
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5							
Tolerâncias Angulares Gerais (mm)													
até 10	1°												
de 10 a 50	0° 30'												
de 50 a 120	0° 20'												
de 120 a 400	0° 10'												
>400	0° 5'												
1:10													
Desenho de conjunto da ferramenta 1000													
Universidade do Minho													



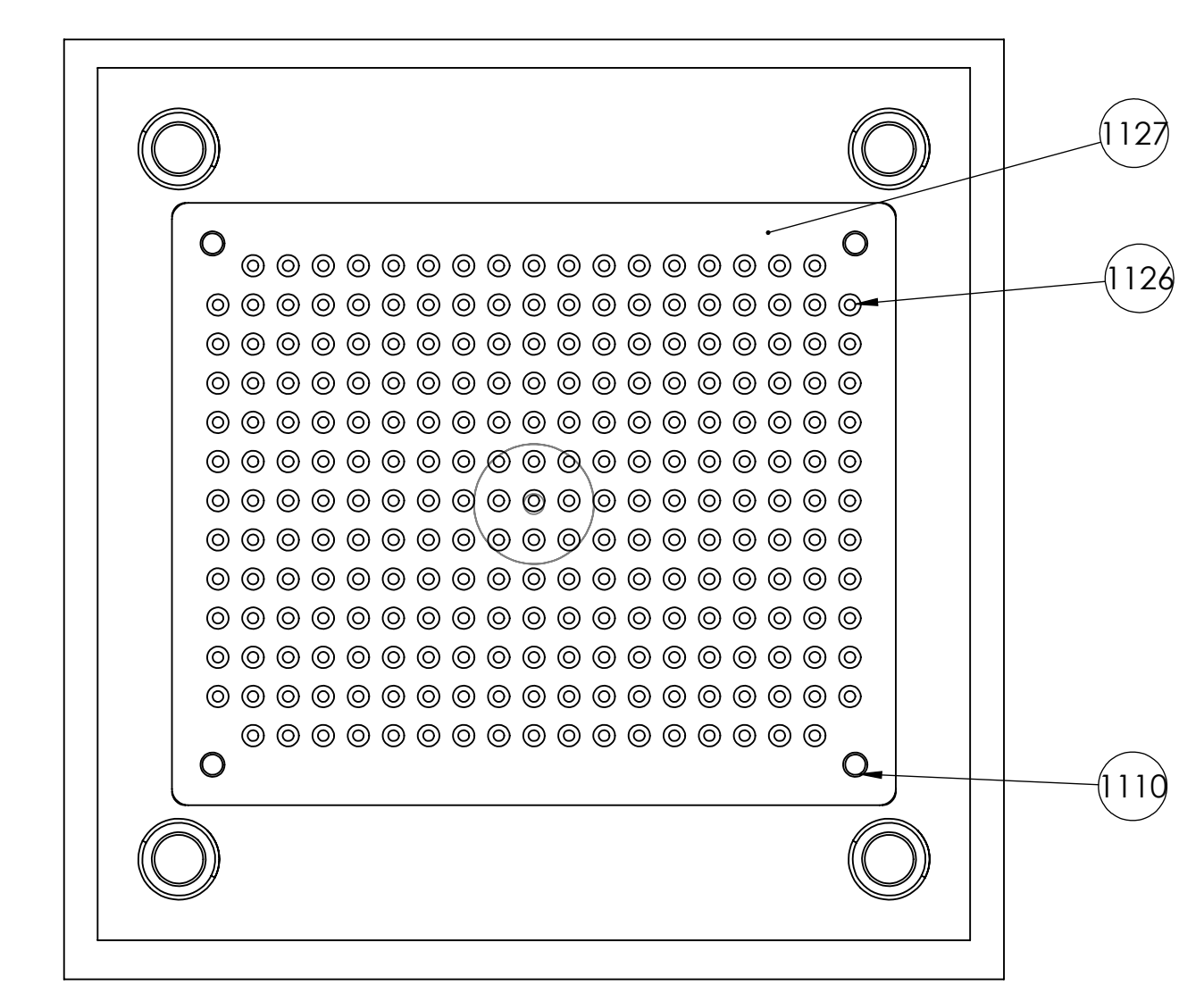
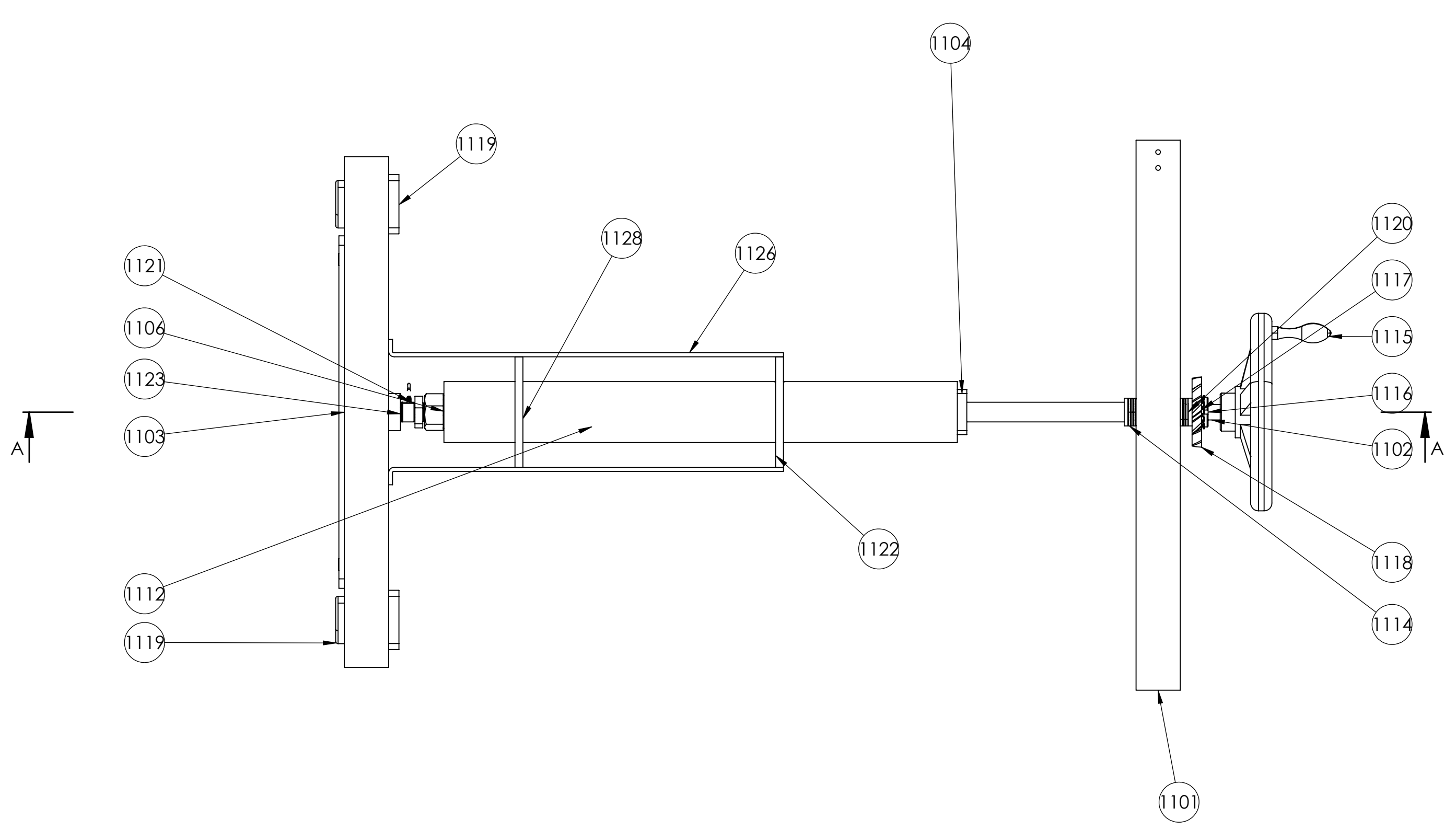
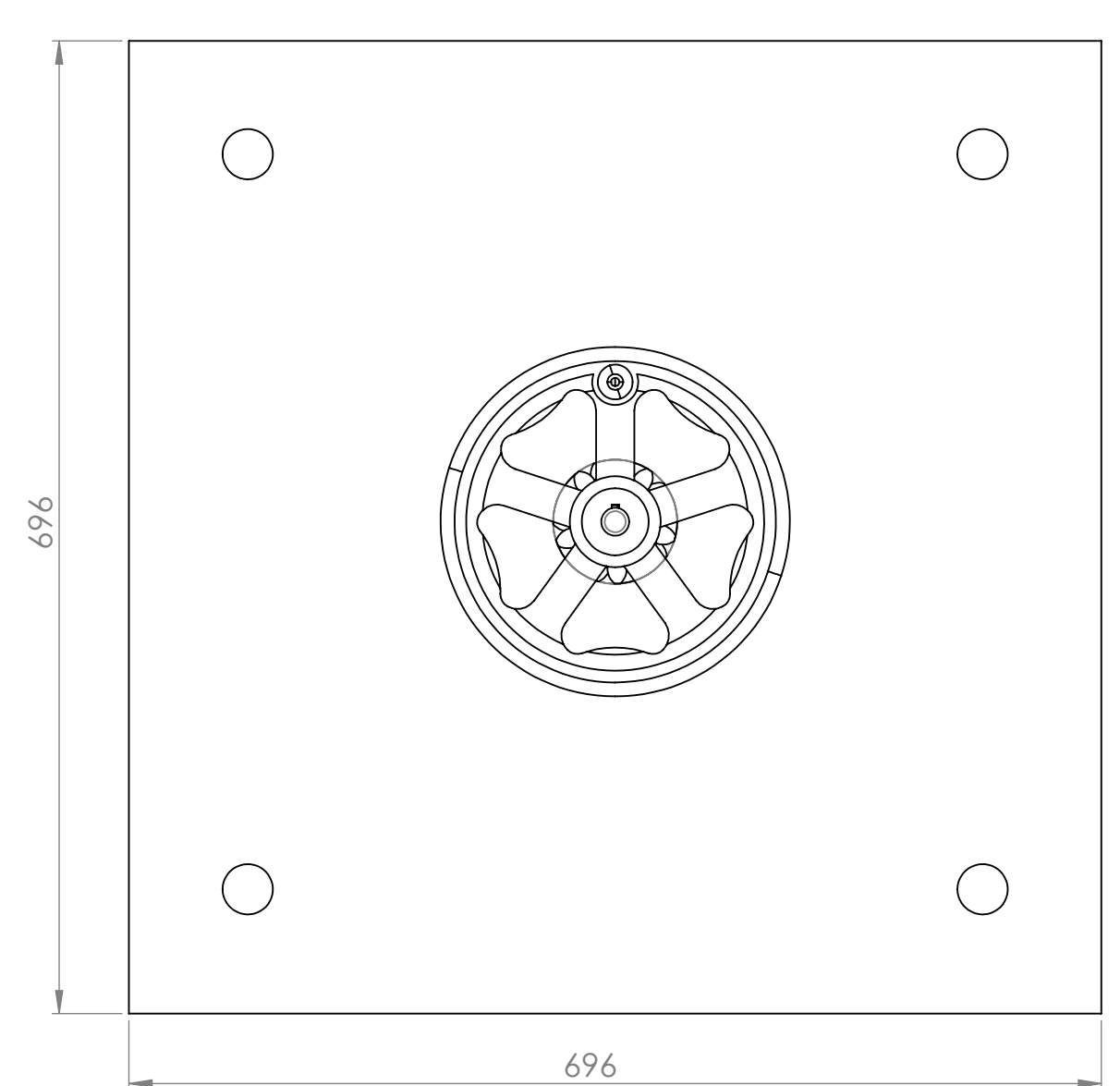
DETAIL C
SCALE 2:5



SECTION A-A

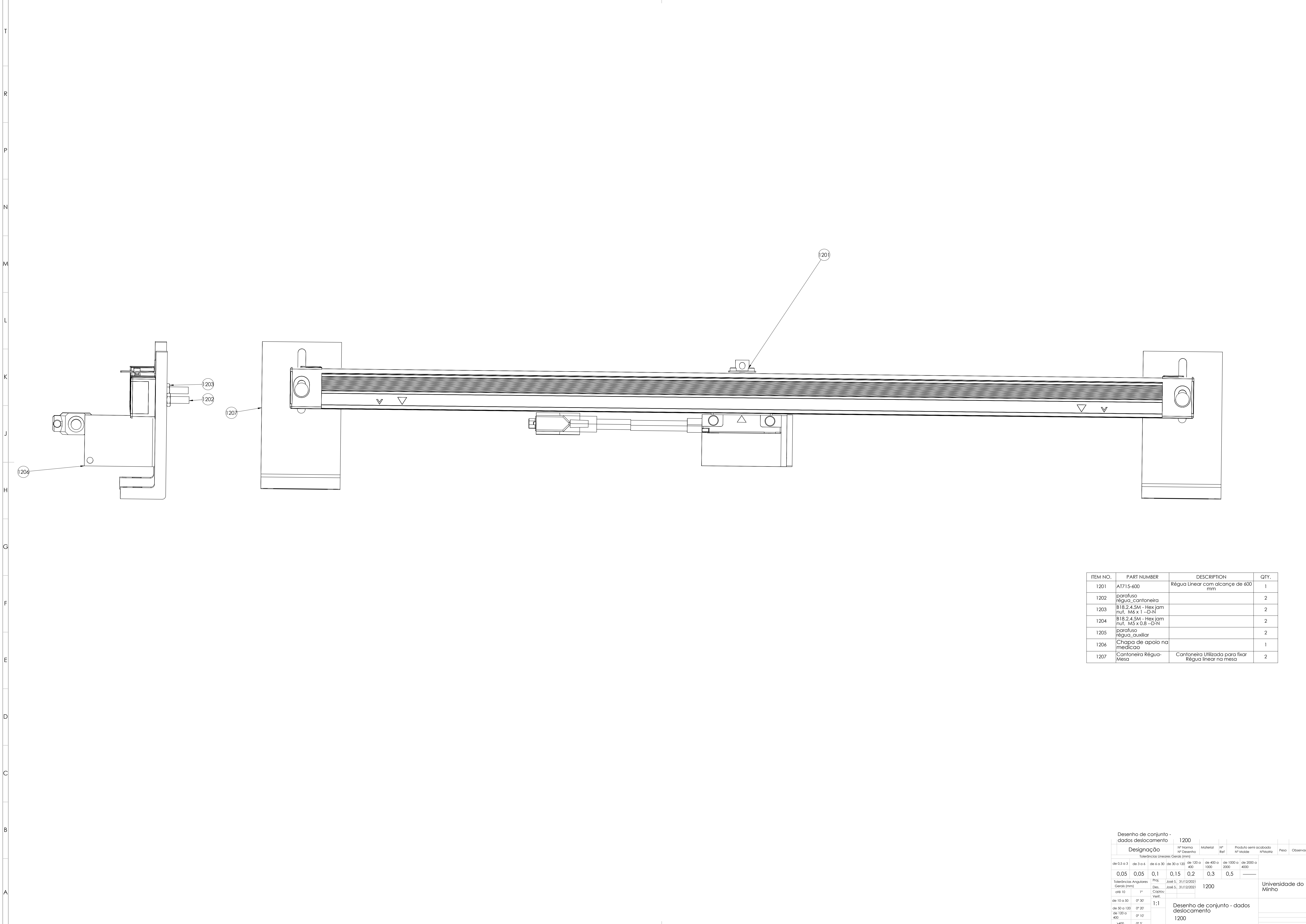


DETAIL D
SCALE 2:5



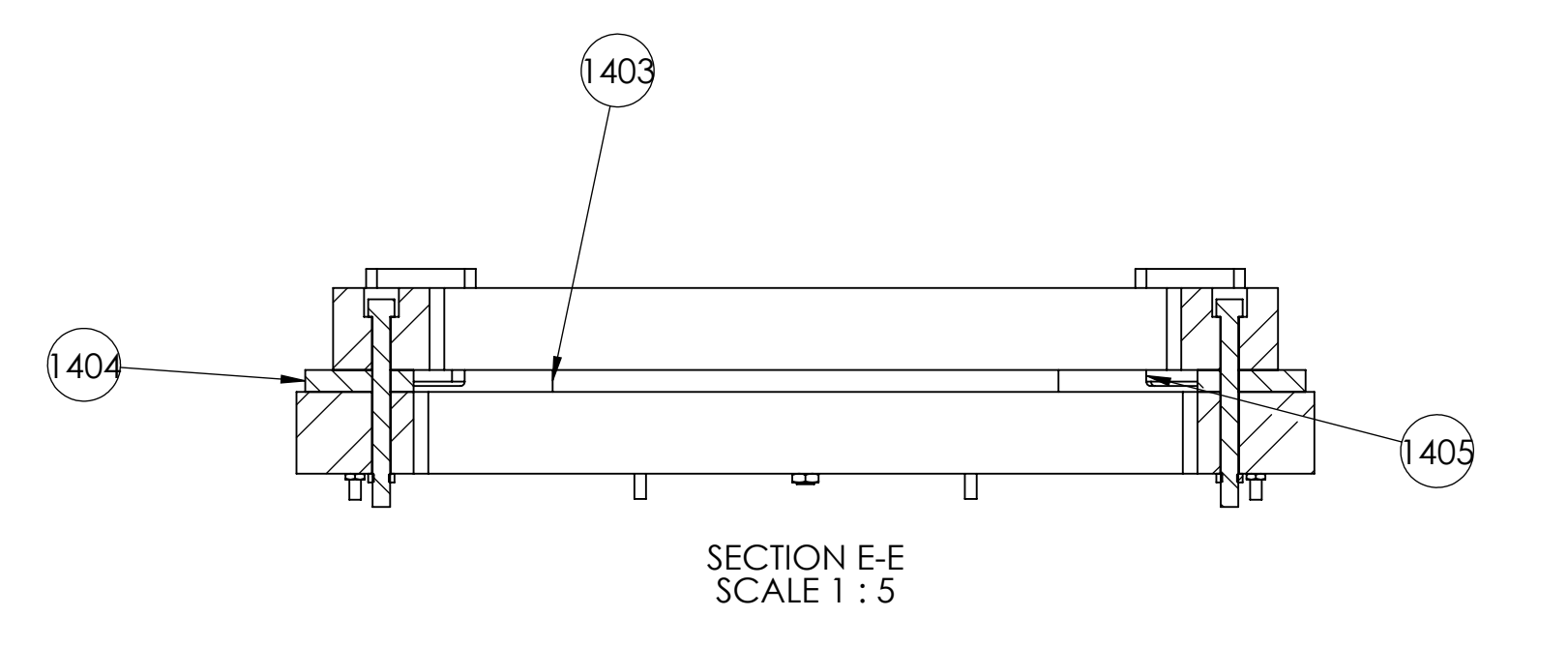
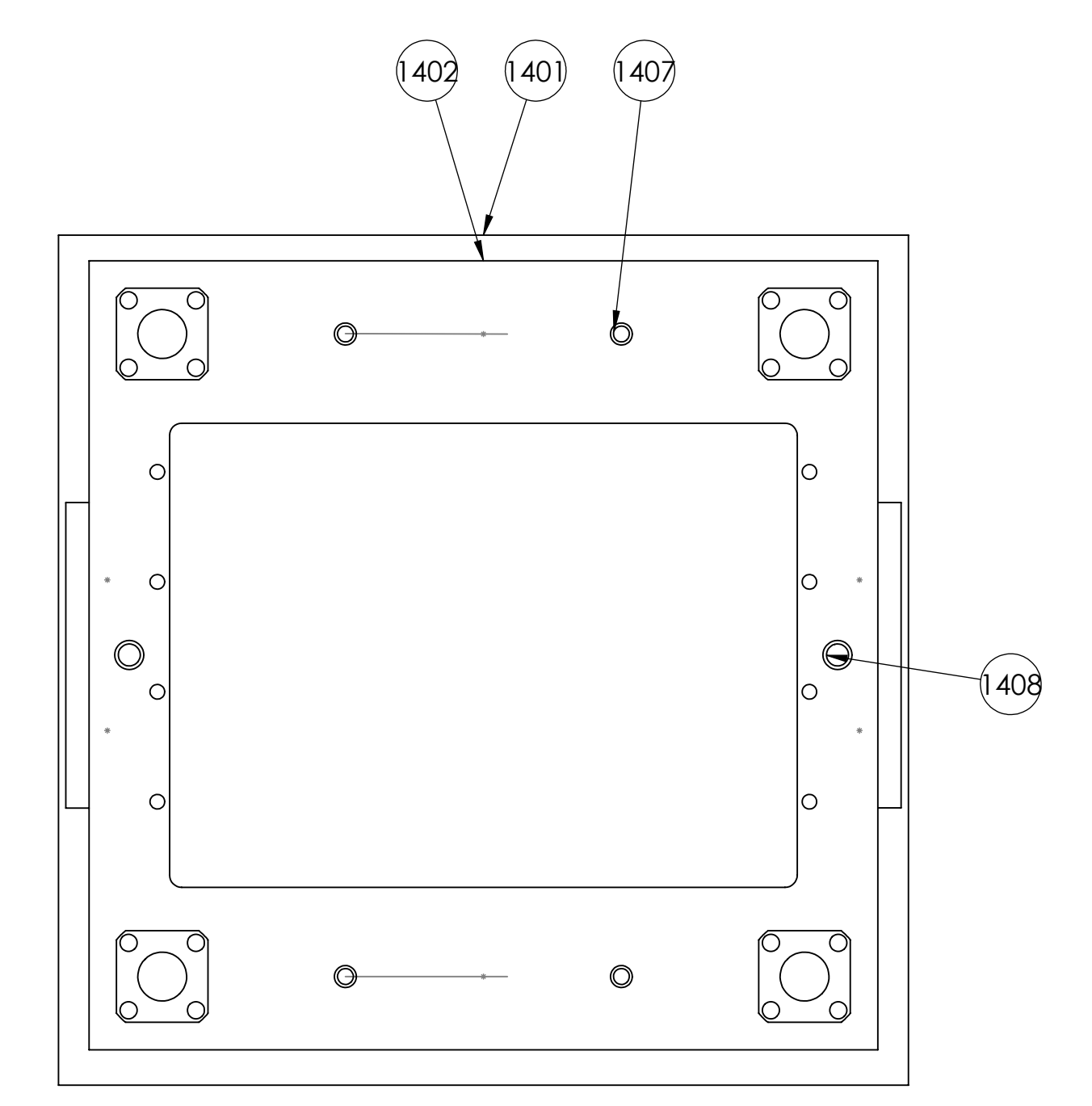
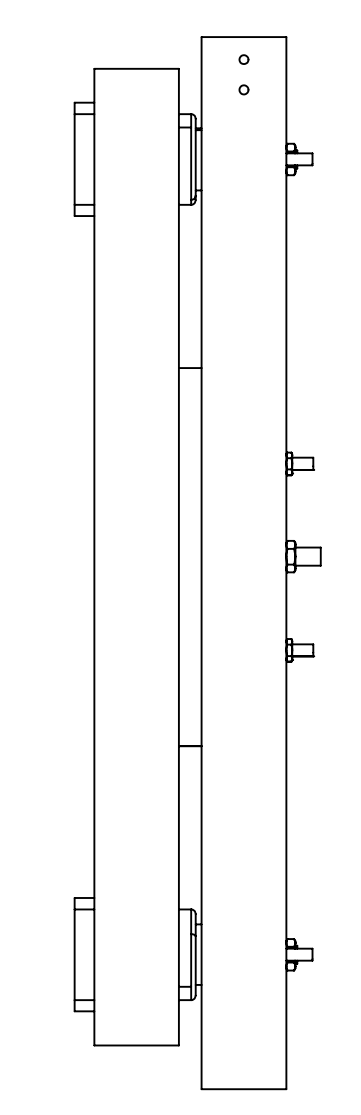
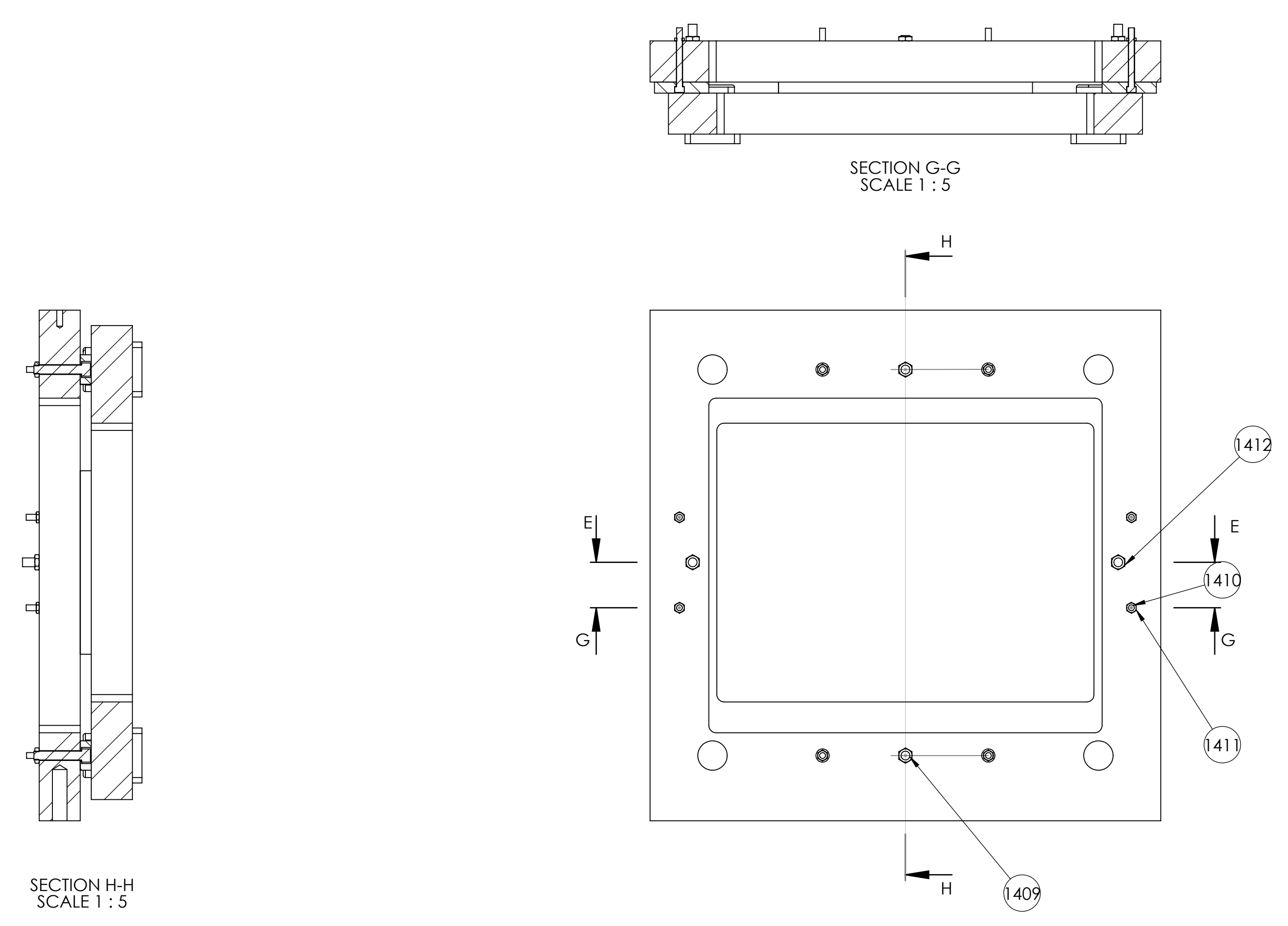
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1101	Placa externa - origem de força		1
1102	Fuso		1
1103	Placa interna - aplicação de força		1
1104	lead		1
1105	parafusos casquilhos		16
1106	Tudo Integrante		1
1107	parafuso_lead_fusoesf bris		4
1108	casquilhad20_ingus		1
1109	adaptador 2 celula carga		1
1110	M14x30		4
1111	B18.2.4.5M - Hex jam nut. M20 x 2.5 - D-N		1
1112	B18.2.4.5M - Hex jam nut. M24 x 3 - D-N		1
1113	Anilha 20_47_3 mm		1
1114	SKF_51104		2
1115	AHLNKC250_20		1
1116	SKF_KM_5		1
1117	SKF_MB_5		1
1118	Metric - LH Helical gear 5.5M 10T 45HA 20PA 12FW 10N75H50L20.0N		1
1119	LHF540 (casquilhos)		4
1120	anilha		2
1121	GWMC 10kN		1
1122	Início suporte tubo integrante		1
1123	Adaptador celula carga		1
1124	Suporte impactador 1		1
1125	Suporte impactador 2		1
1126	Ligador do suporte do tubo integrante		2
1127	B18.2.4.6M - Heavy hex nut. M24 x 3 - W-N		1
1128	Parte suporte tubo integrante		

Desenho conjunto		1100		Material		Nº Ref		Produto semi acabado		Peso		Observações	
Designação		Nº Norma		Nº Desenho		Nº Modelo		Nº Trabalho					
Tolerâncias Lineares Gerais (mm)													
de 0,5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000						
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5							
Tolerâncias Angulares Gerais (mm)													
até 10	1"												
de 10 a 50	0° 30'												
de 50 a 120	0° 20'												
de 120 a 400	0° 10'												
>400	0° 5'												
1:5		Desenho conjunto 1100											
												Universidade do Minho	



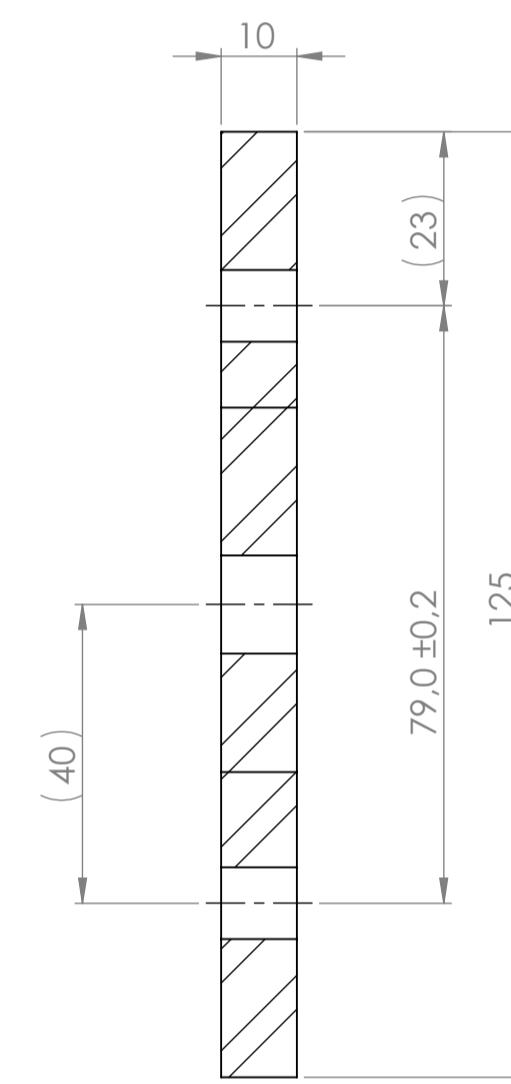
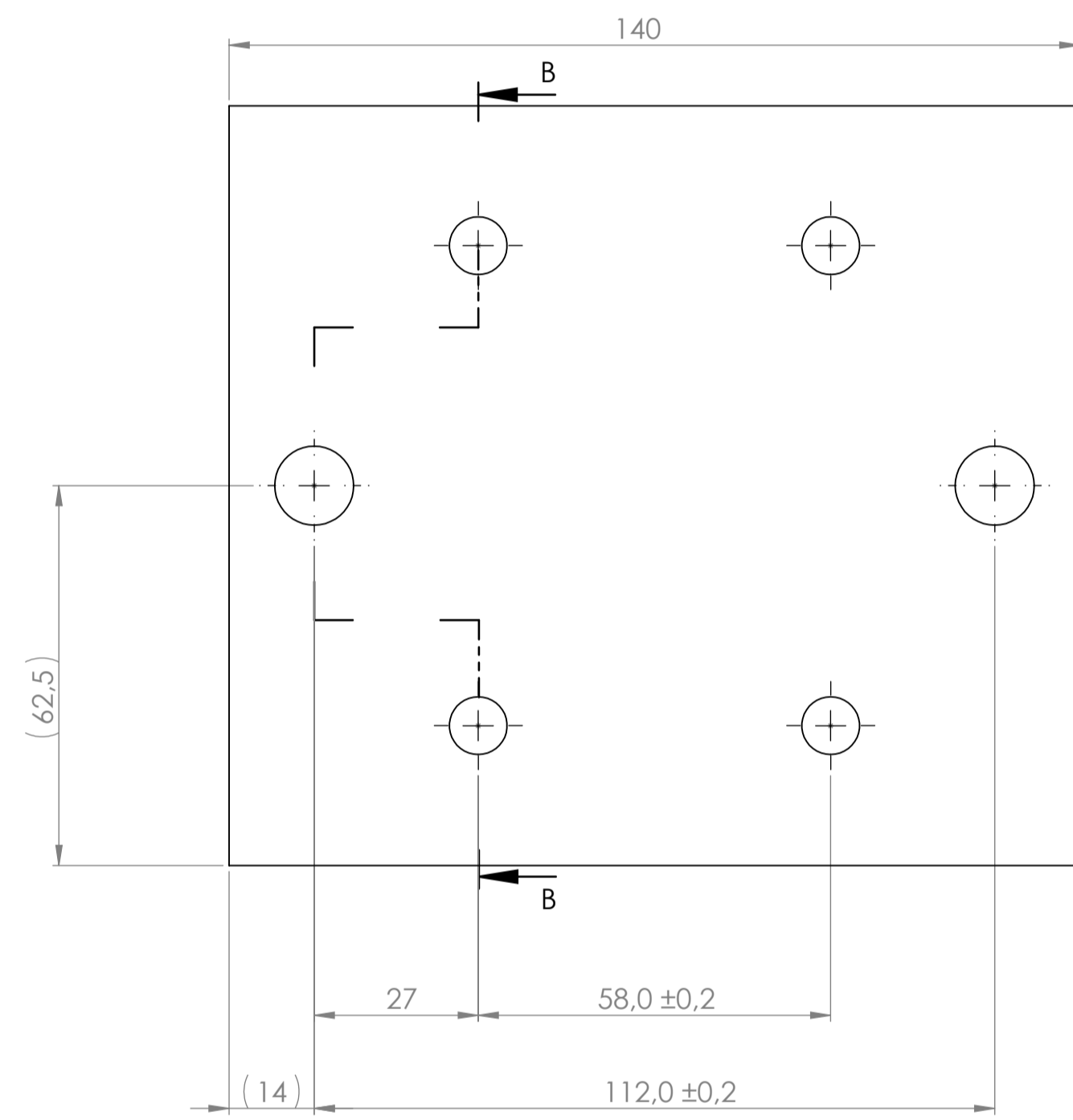
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1201	A1715-600	Réguia linear com alcance de 600 mm	1
1202	parafuso réguia_cantoneira		2
1203	B18.2.4.5M - Hex jam nut, M6 x 1 - D-N		2
1204	B18.2.4.5M - Hex jam nut, M5 x 0.8 - D-N		2
1205	parafuso réguia_auxiliar		2
1206	Chapa de apoio na medição		1
1207	Cantoneira Réguia-Mesa	Cantoneira Utilizada para fixar Réguia linear na mesa	2

Designação		Nº Norma	Nº Desenho	Material	Nº Ref	Produto semi acabado	Peso	Observações
Desenho de conjunto - dados deslocamento		1200						
Tolerâncias Lineares Gerais (mm)								
de 0,5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000	
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5		
Tolerâncias Angulares Gerais (mm)								
até 10	1°							
de 10 a 50	0° 30'							
de 50 a 120	0° 20'							
de 120 a 400	0° 10'							
>400	0° 5'							
Desenho de conjunto - dados deslocamento		1200						
1:1								
Desenho de conjunto - dados deslocamento		1200						
		Universidade do Minho						



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1401	Placa externa - obtencao de dados		1
1402	Placa interna suporte de objeto	P	1
1403	chapa batente_fixacao placas horizontal		2
1404	chapa batente_fixacao placas vertical		2
1405	LHFS40 (casquilhos)	Casquilhos utilizados para movimentação varão nas placas	4
1406	parafusos casquilhos		16
1407	M8x130		4
1408	m12x130		2
1409	M12x65		2
1410	M8x80		4
1411	B18.2.4.5M - Hex jam nut, M8 x 1.25 -D-N		8
1412	B18.2.4.5M - Hex jam nut, M12 x 1.75 -D-N		4

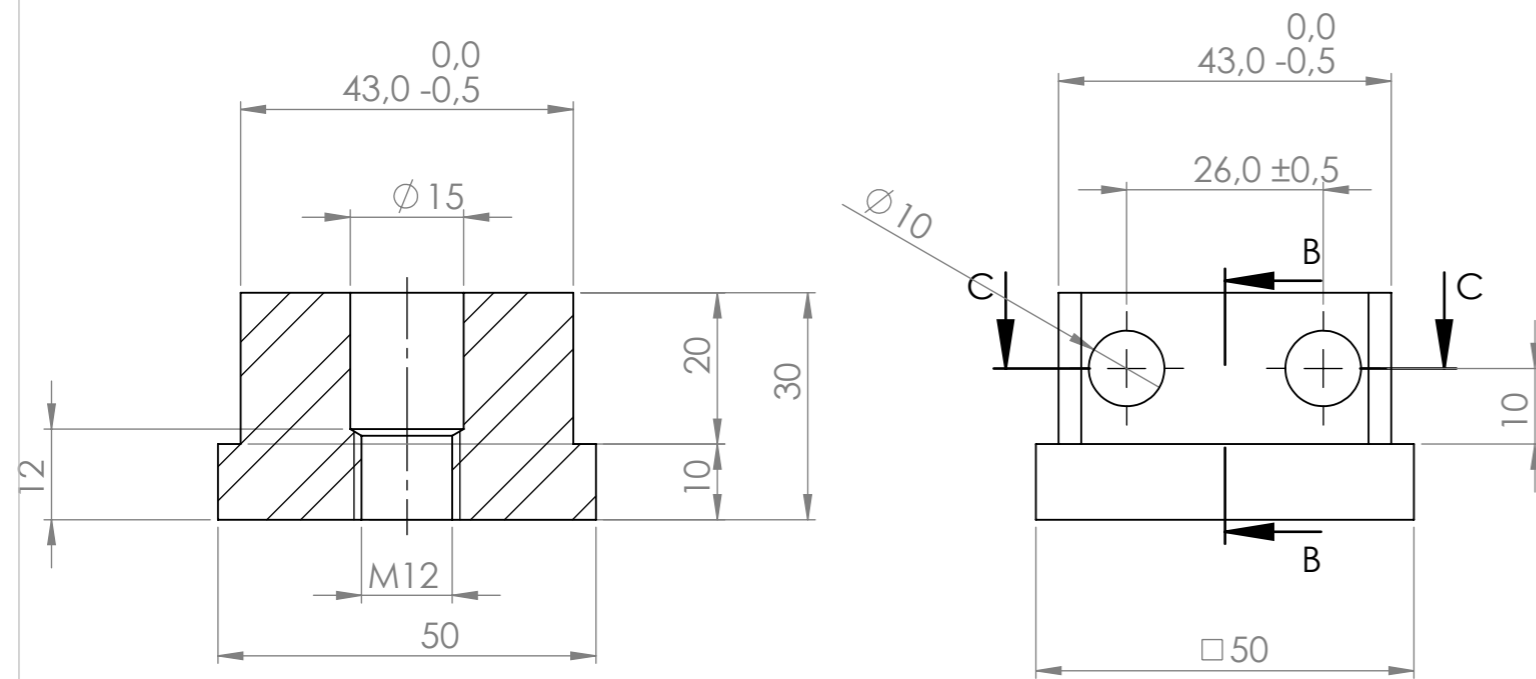
<small> TITULO: 1400 PROJETO: 1400 DATA: 14/03/2014 DESenhado por: A.D. Verificado por: A.D. APROvado por: A.D. Escala: 1:5 </small>		<small> MATERIAL: Aço DIMENsões: 1400 x 1400 x 100 Escala: 1:5 </small>	<small> REvisão: 01 Data: 14/03/2014 Desenhado por: A.D. Verificado por: A.D. APROvado por: A.D. </small>
<small> SHEET NO. 1400 SHEET OF 1 </small>			



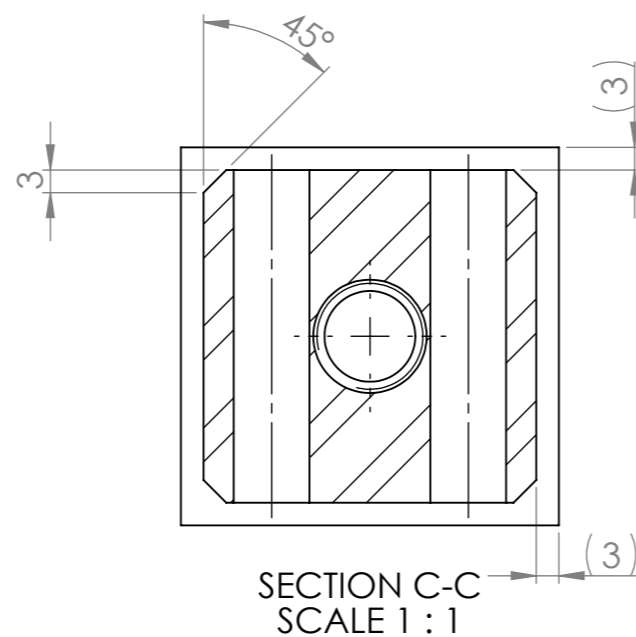
SECTION B-B

√ Ra 12.5

Chapa ligação roda-mesa		1009	SAE 1040						
Designação		Nº Norma Nº Desenho	Material	Nº Ref	Produto semi acabado Nº Molde	Nº Matriz	Peso	Observações	
Tolerância Gerais Lineares (mm)									
de 0.5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000		
0.05	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	—		
Tolerância Gerais Angulares (mm)		Proj.	José S. 20/12/21		1009		Universidade do Minho		
		Des.	José S. 15/01/22						
		Cópia							
		Verif.							
até 10	1°	1:1		Chapa ligação roda-mesa 1009					
de 10 a 50	0° 30'								
de 50 a 120	0° 20'								
de 120 a 400	0° 10'								
> 400	0° 5'								
		Ang. f[final]							
		Un: (f[un])							
								Substituído por:	
								Substituído por:	



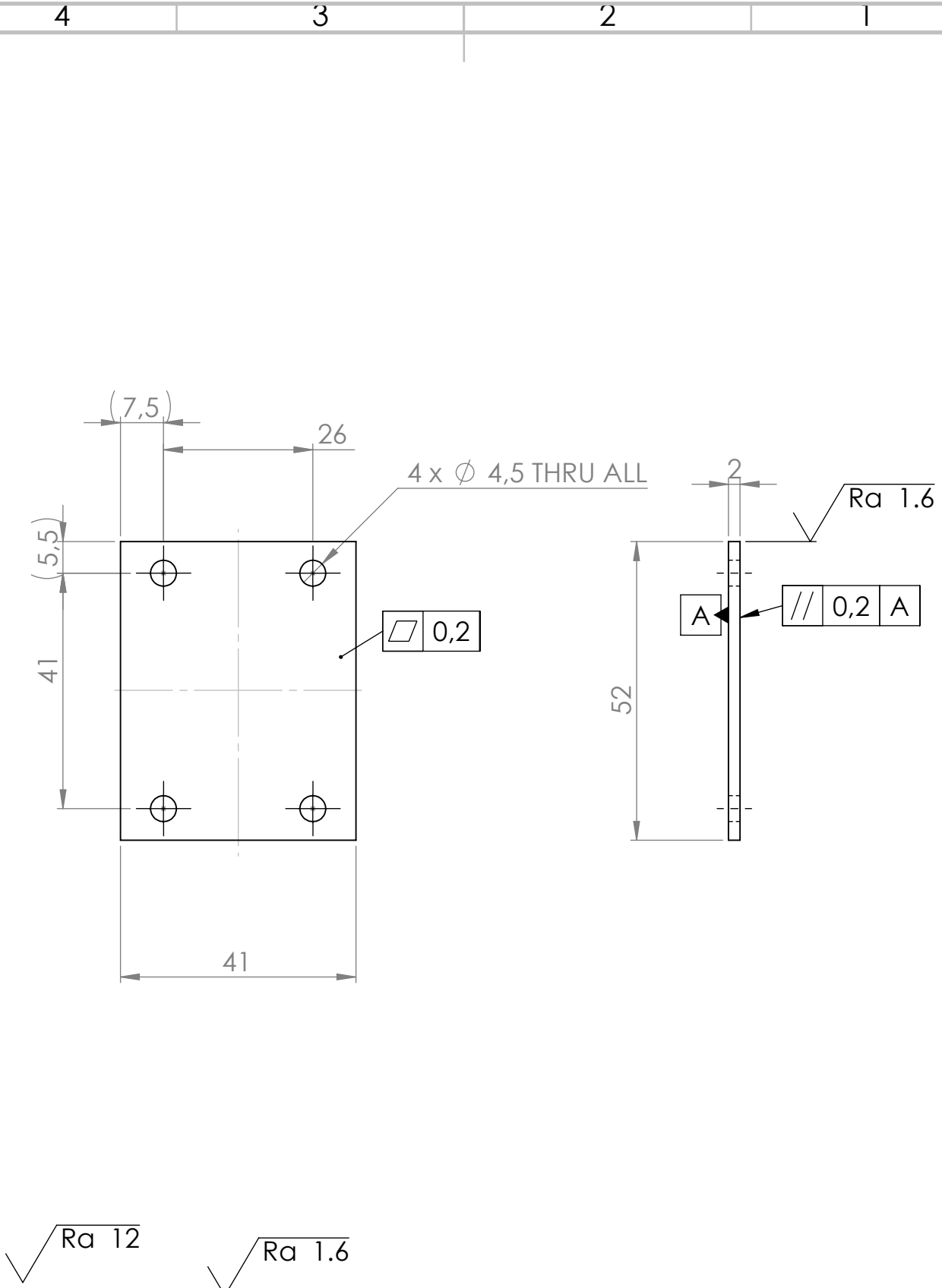
SECTION B-B
SCALE 1 : 1



SECTION C-C
SCALE 1 : 1

√ Ra 3.2

Nº	Designação	Nº Norma Nº Desenho	Material	Nº Ref	Produto Semi-Acabado Nº Molde	Nº Matriz	Peso	Observações	
	Adaptador do pé anti vibratório	1011	SAE 1040						
Tolerâncias Lineares Gerais									
de 0,5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000		
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	—		
Tolerancias Gerais Angulares		Proj. José Silva	1011				Universidade do Minho		
		Des. José Silva							
		Verif. José Meir.							
até 10	1º	1:1		Adaptador do pé anti vibratório 1011					
de 10 até 50	0º 30'								
de 50 até 120	0º 20'								
de 120 até 400	0º 10'								
acima de 400	0º 5'								
		Iso 2768 Ang:f (fina) Lin:f (fina)							
								Substituí:	
								Substituído por:	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES: ISO 2768
 LINEAR: f (fina)
 ANGULAR: f (fina)

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	José Silva		
CHKD			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

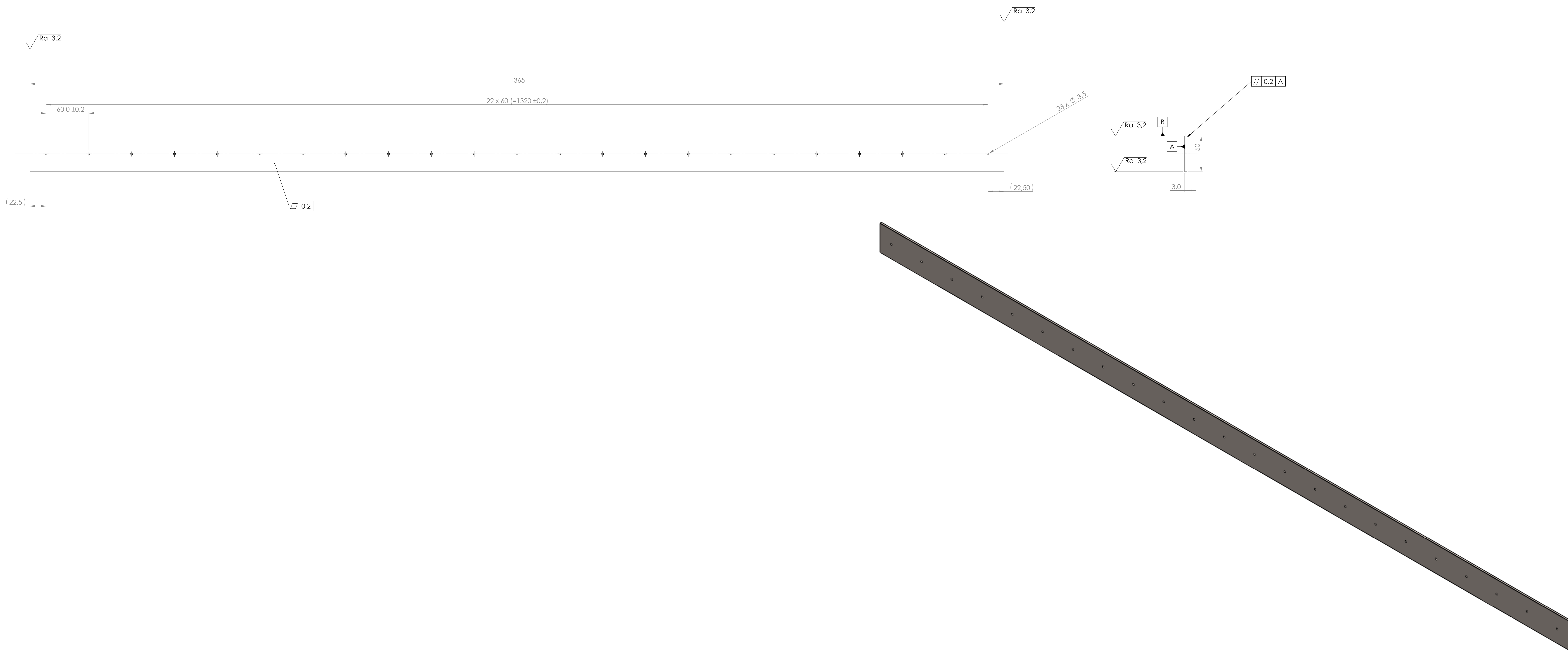
TITLE:
**Chapa ligacao
 guia placa**

DWG NO. **1012**

MATERIAL:
AISI 1215

SCALE: 1:1

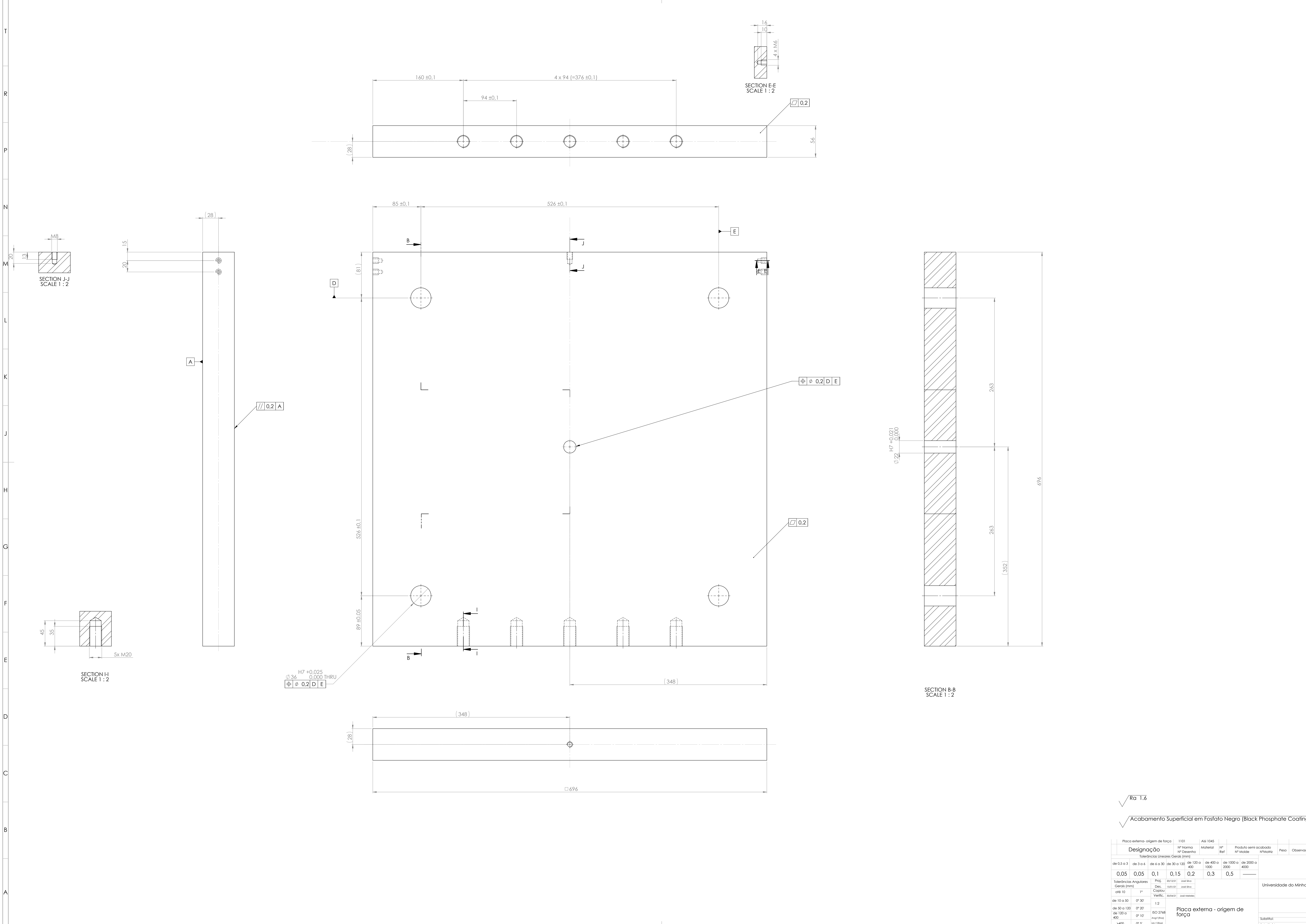
SHEET 1 OF 1



√Ra 1.6 √Ra 3.2

Designação		1021		SAE 1040		Produto semi-acabado		Peso		Observações	
Tolerâncias Lineares Gerais (mm)		Nº Norma		Material		Nº Ref		Nº Modelo		Nº Nota	
de 0,5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000				
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5					
Tolerâncias Angulares Gerais (mm)		Proj.		Des.		1021				Universidade do Minho	
até 10		1°		Cadastr. Verific.		30/04 José Meireles					
de 10 a 50		0° 30'		1:2							
de 50 a 120		0° 20'		ISO 2768							
de 120 a 400		0° 10'		M (mm)							
>400		0° 5'		T (mm)							

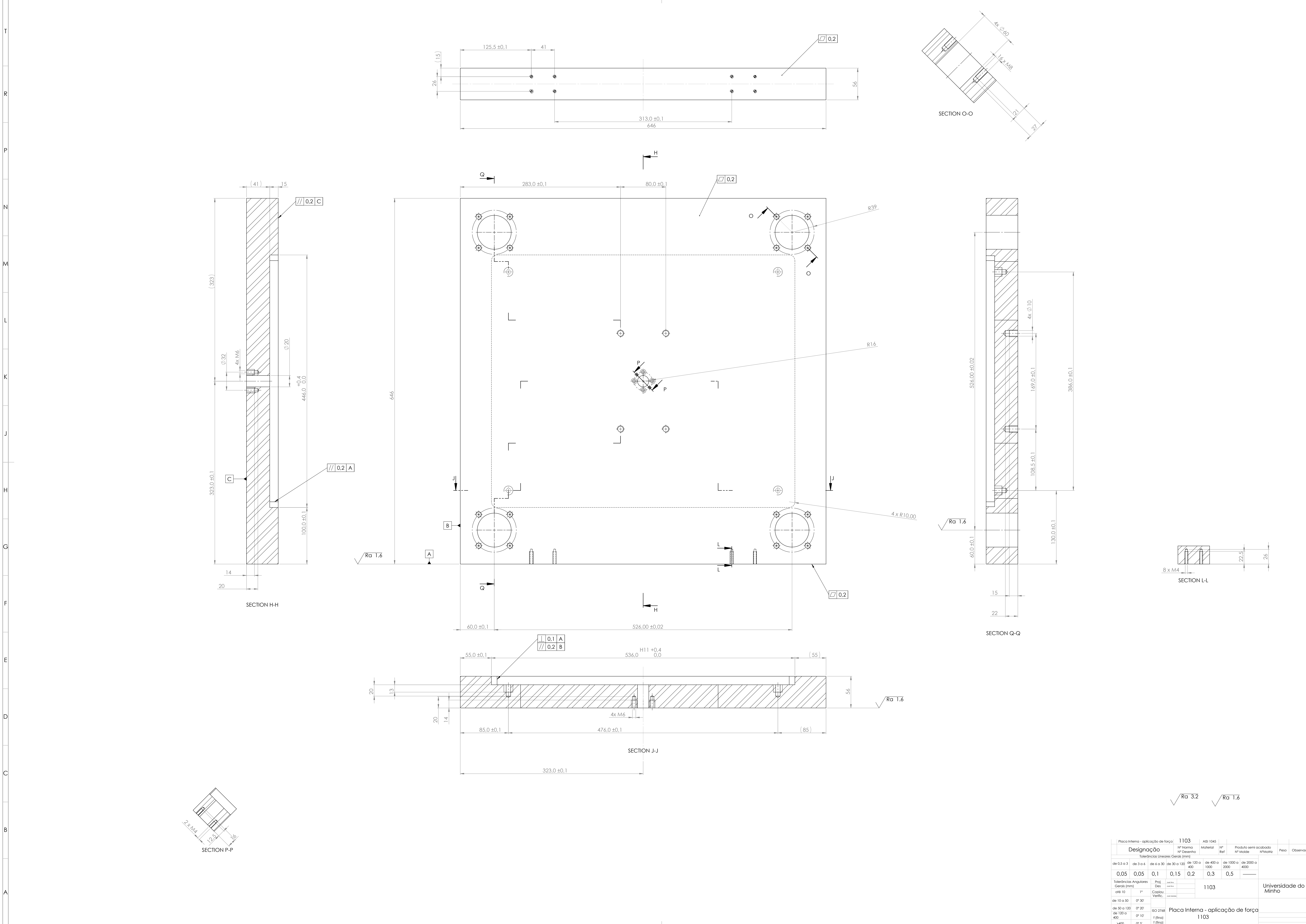
Chapa de ligação Mesa guia Linear 1021



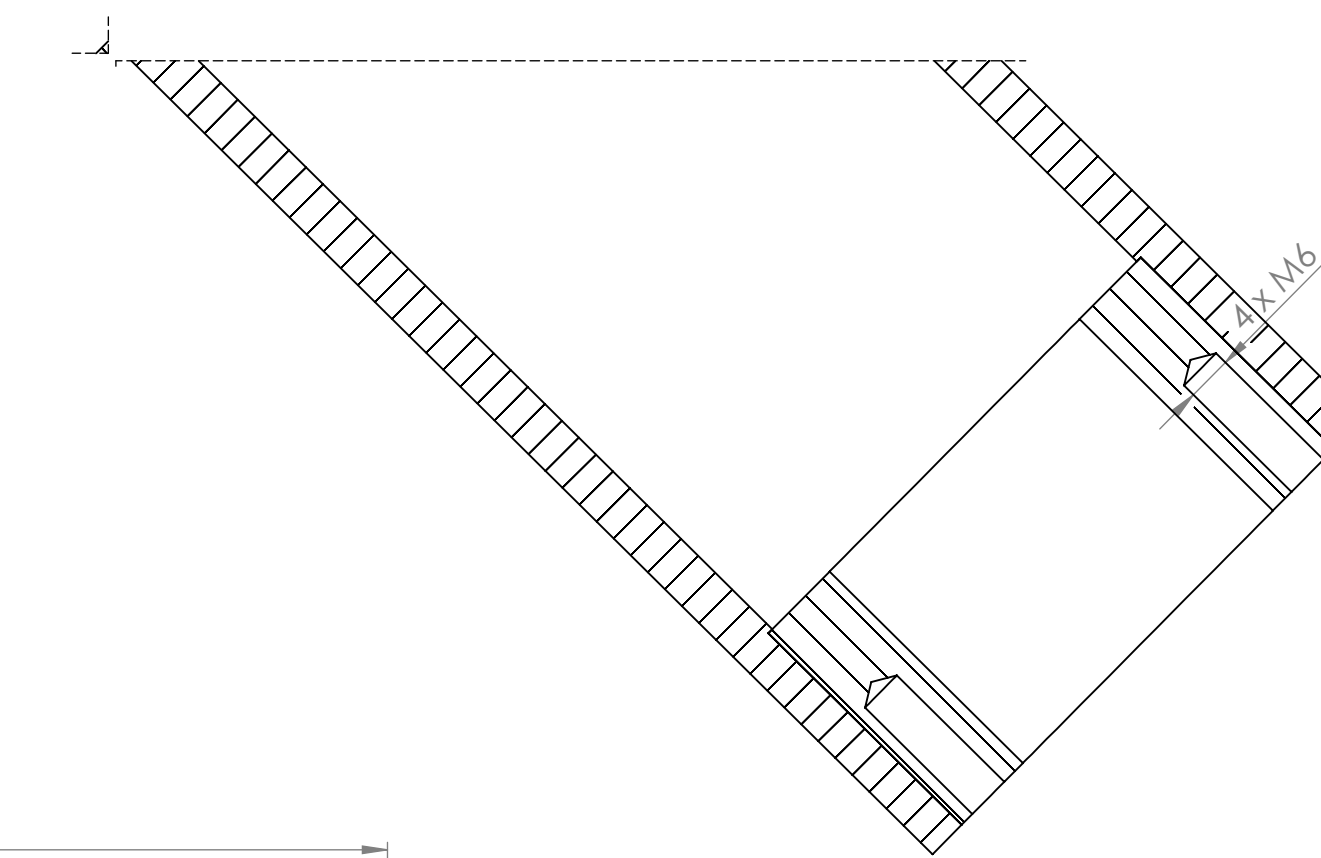
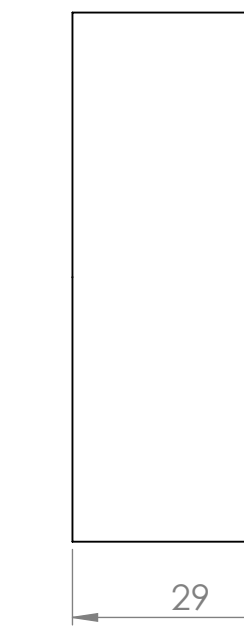
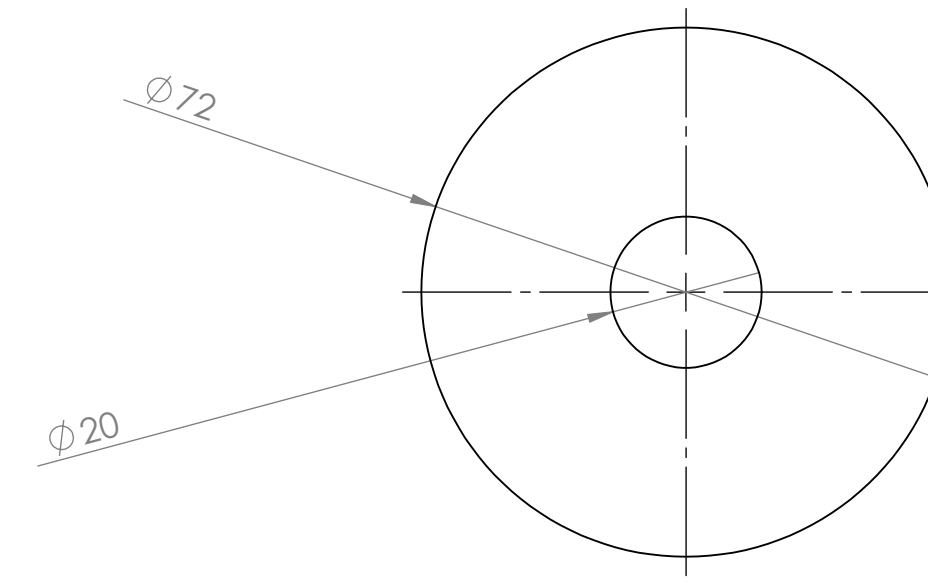
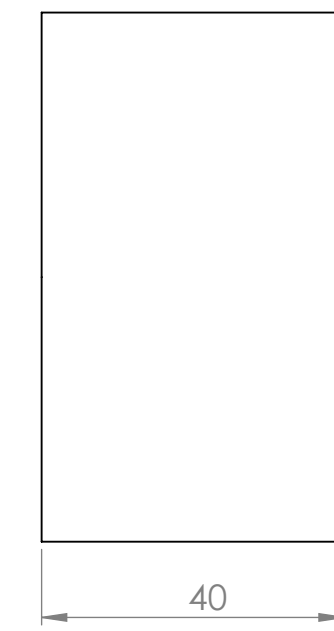
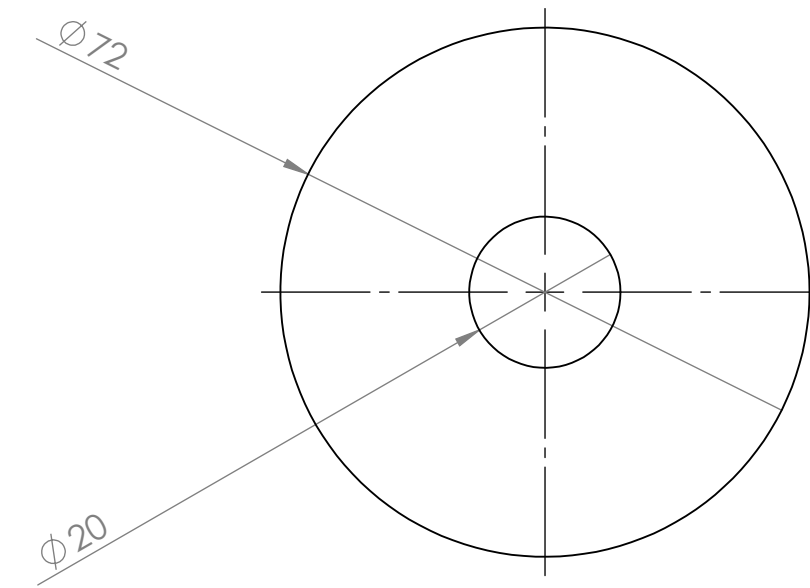
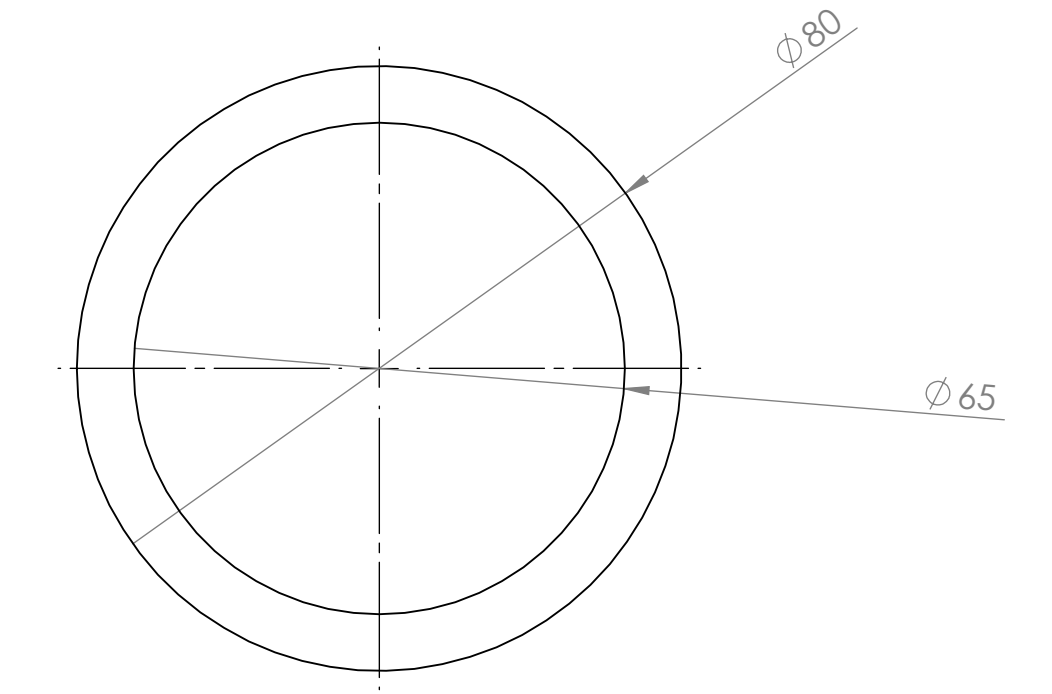
Ra 1.6
 Acabamento Superficial em Fosfato Negro (Black Phosphate Coating)

Designação		Nº Norma		Material		Produto semi acabado		Piso		Observações	
		Nº Desenho				Nº Modelo					
de 0,5 a 3		de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000			
Tolerâncias Lineares Gerais (mm)											
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5					
Tolerâncias Angulares Gerais (mm)											
até 10	1°										
de 10 a 50		0° 30'									
de 50 a 120		0° 20'									
de 120 a 400		0° 10'									
> 400		0° 5'									
		ISO 2768		MFG		MFG		MFG		MFG	
		MFG		MFG		MFG		MFG		MFG	
		MFG		MFG		MFG		MFG		MFG	

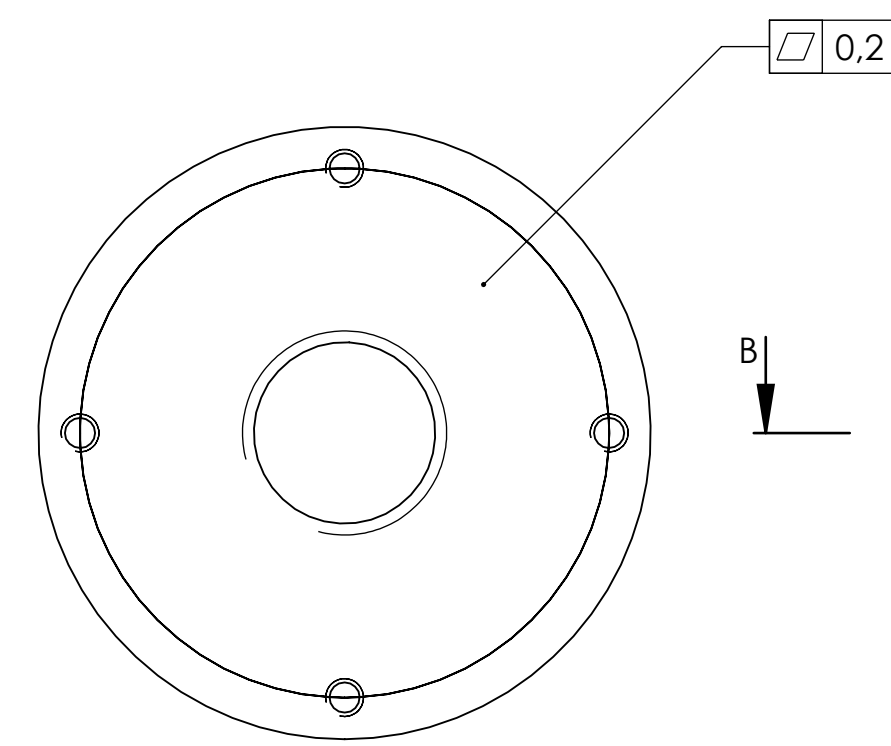
Universidade do Minho
 Placa externa - origem de força



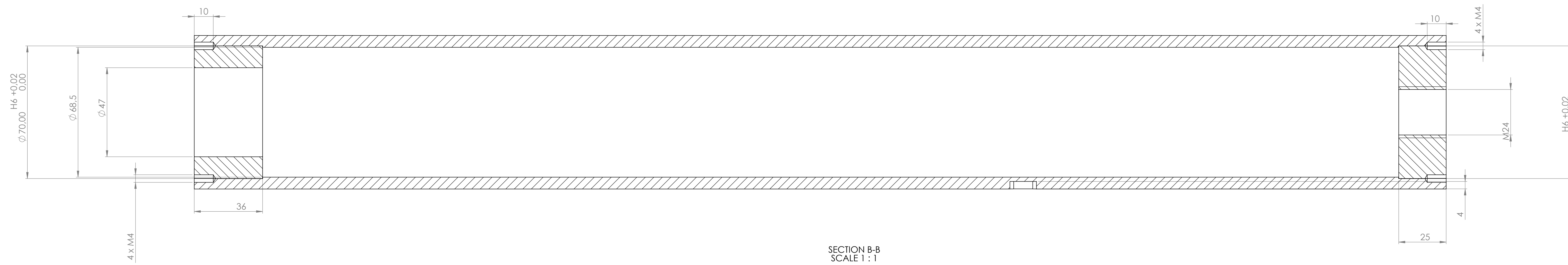
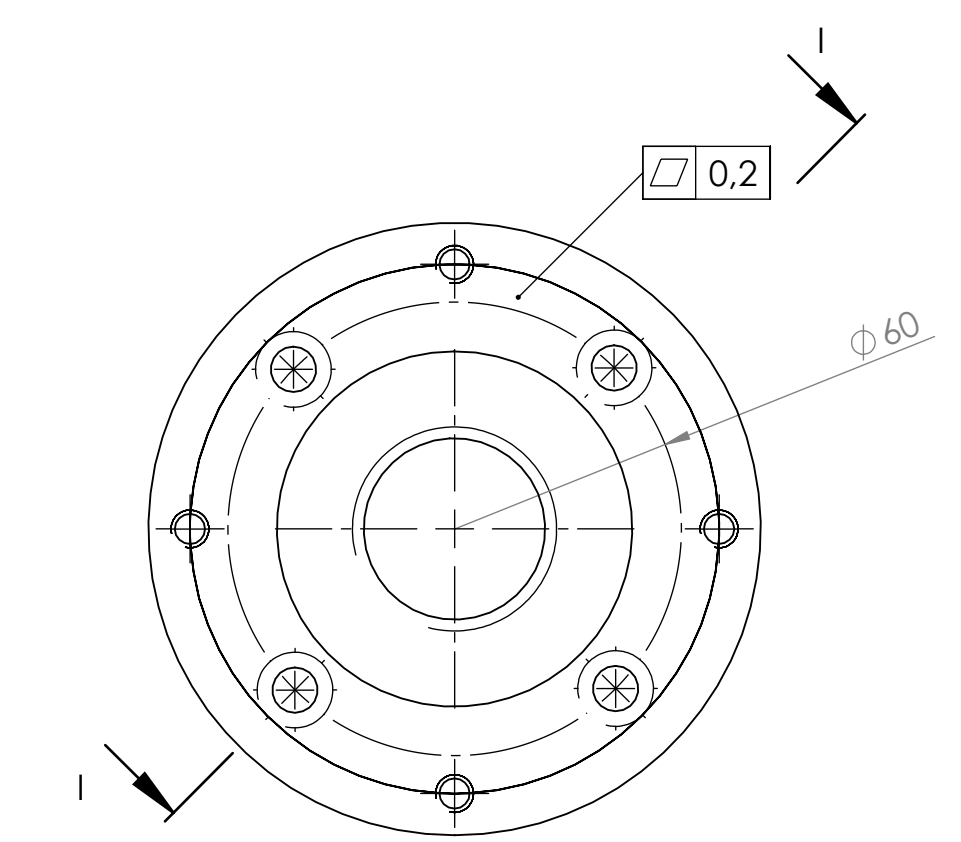
Designação		1103		AS1 1045		Material		Produto semi acabado		Piso		Observações	
		Nº Norma		Nº Desenho		Ref		Nº Modelo		Nº Trabalho			
		de 0,5 a 3		de 3 a 6		de 6 a 30		de 30 a 120		de 120 a 400		de 400 a 1000	
		de 1000 a 2000		de 2000 a 4000									
Tolerâncias Lineares Gerais (mm)													
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5							
Tolerâncias Angulares Gerais (mm)		Proj		Des		1103		Universidade do Minho					
até 10		1°		Cadastr									
de 10 a 50		0° 30'											
de 50 a 120		0° 20'											
de 120 a 400		0° 10'		F (má)		Placa Interna - aplicação de força							
≥ 400		0° 5'		F (má)		1103							



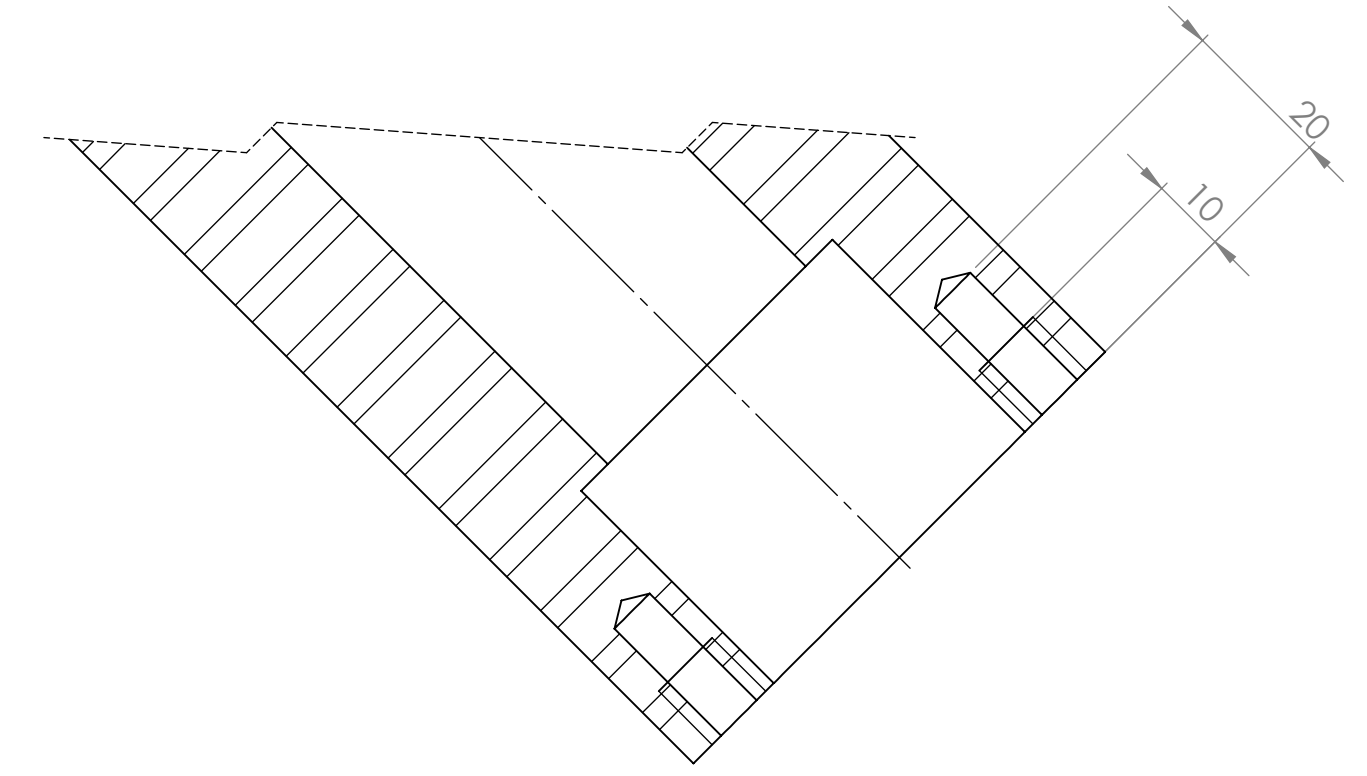
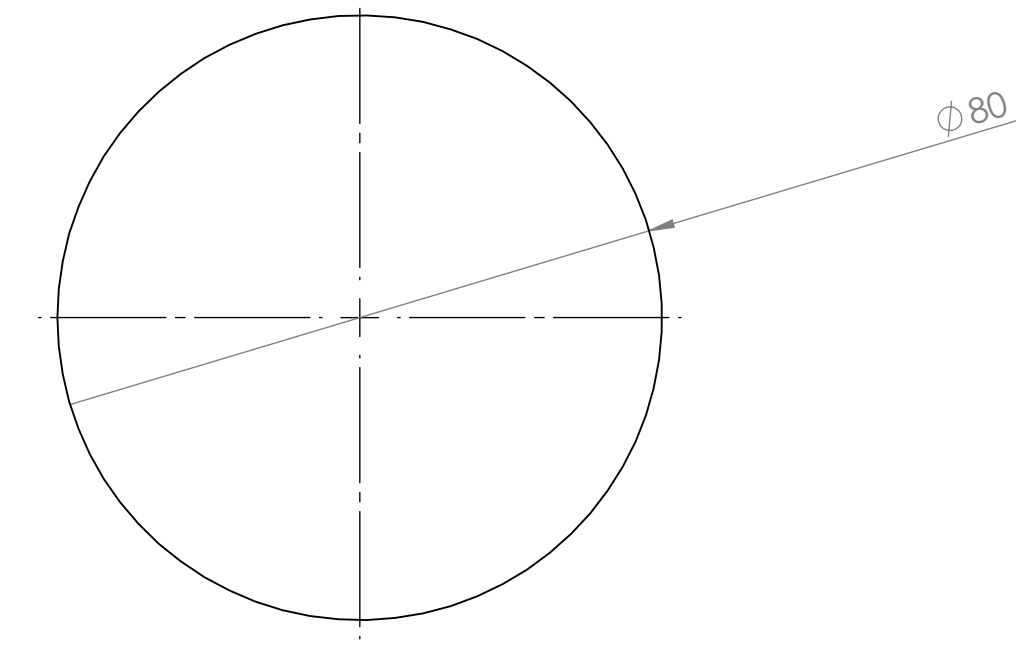
SECTION H-H
SCALE 1 : 1



SECTION B-B
SCALE 1 : 1



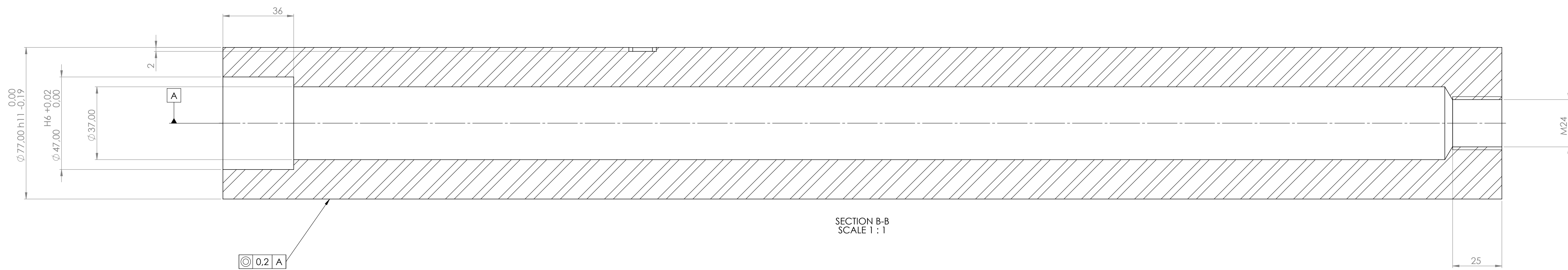
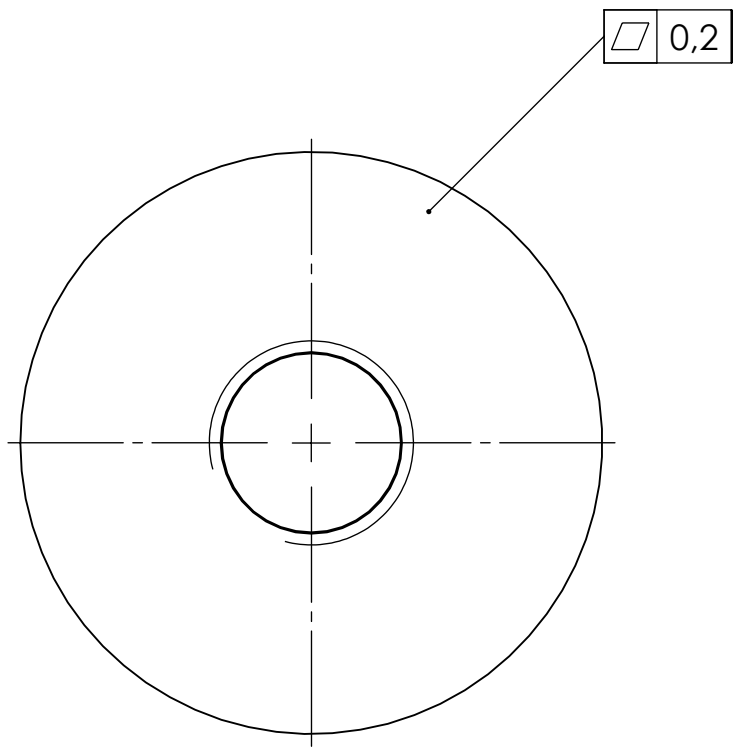
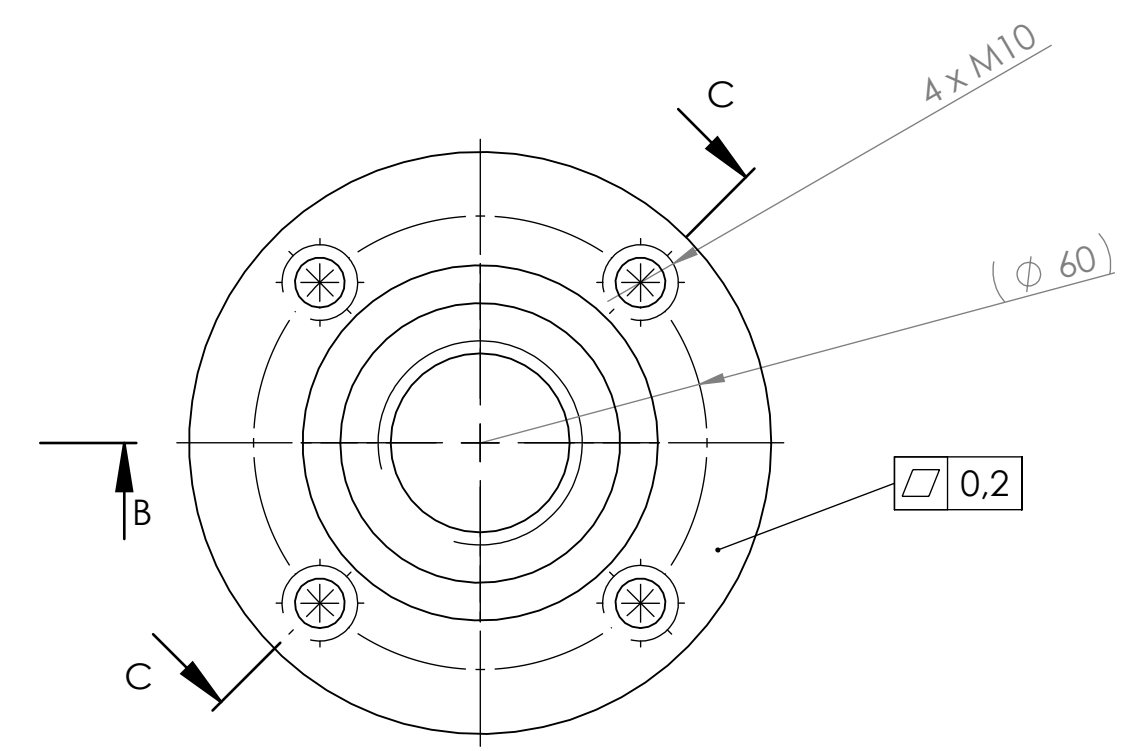
Designação		1106		SAE 1040							
Tolerâncias Lineares Gerais (mm)		Tolerâncias Lineares Gerais (mm)		Tolerâncias Lineares Gerais (mm)		Tolerâncias Lineares Gerais (mm)		Tolerâncias Lineares Gerais (mm)		Tolerâncias Lineares Gerais (mm)	
de 0,5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000				
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5					
Tolerâncias Angulares Gerais (mm)		1106		1106		1106		1106		1106	
até 10	1°										
de 10 a 50	0° 30'										
de 50 a 120	0° 20'										
de 120 a 400	0° 10'										
>400	0° 5'										
Universidade do Minho Tubo integrante - alternativa tubo 1106											



SECTION C-C
SCALE 1 : 1

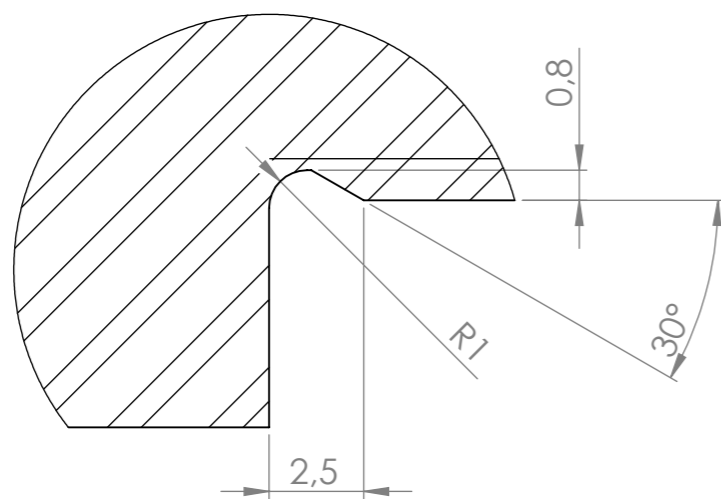
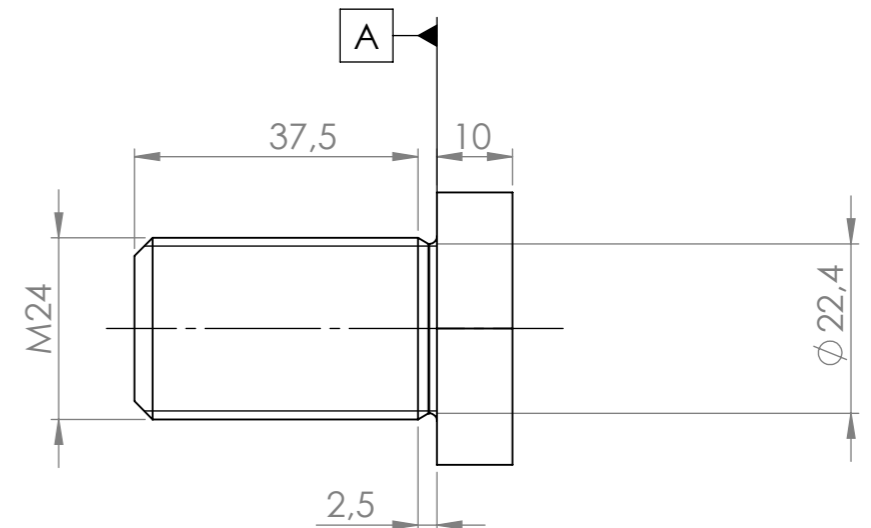
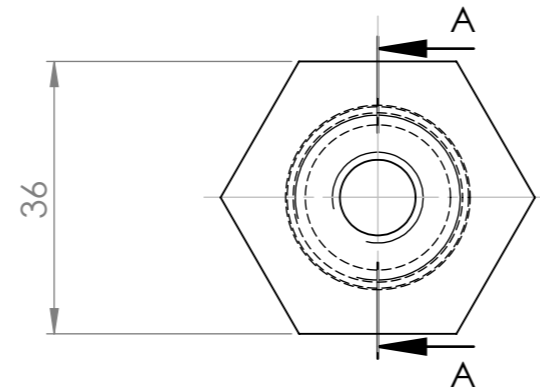
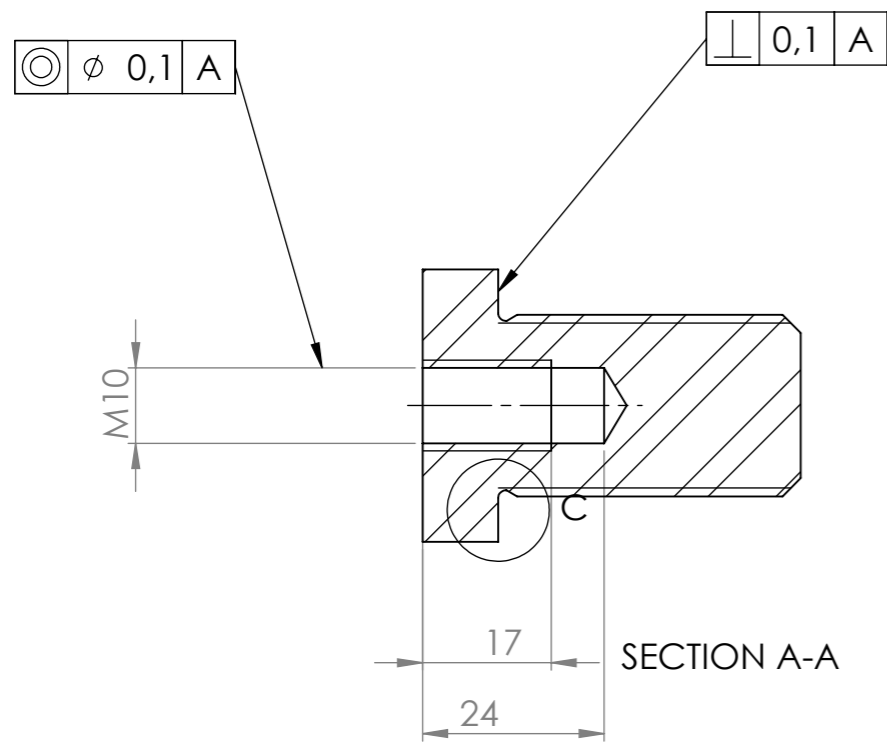


SECTION B-B
SCALE 1 : 1



√Ra 3.2

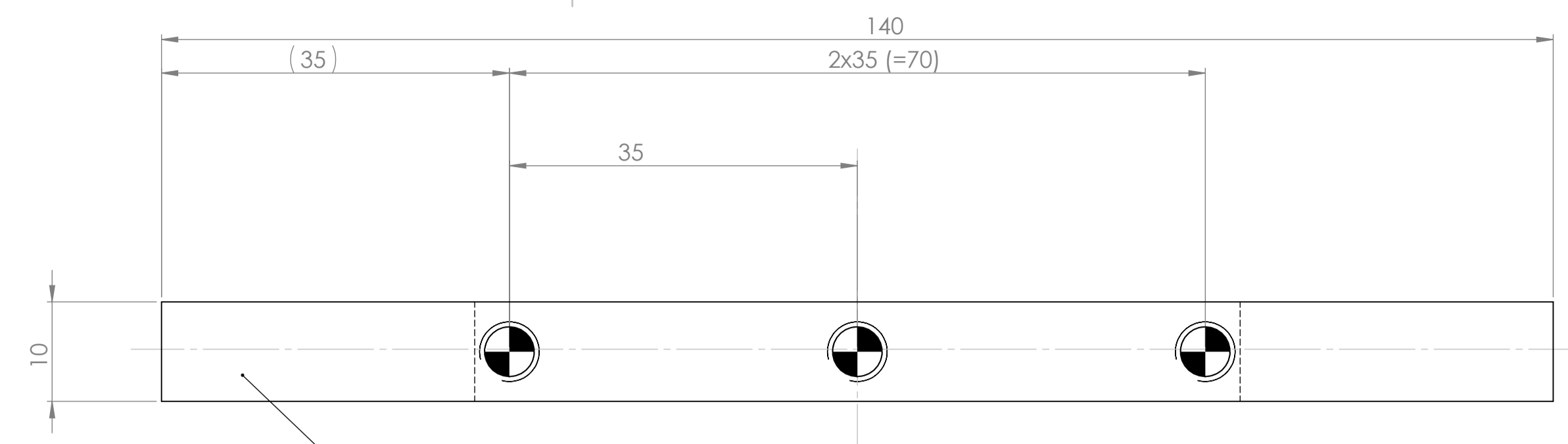
Designação		1106		SAE 1040		Produto semi acabado		Piso		Observações	
		Nº Norma	Nº Desenho	Material	Nº Ref	Nº Modelo	Nº Trabalho				
Tolerâncias Lineares Gerais (mm)											
de 0,5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000				
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5					
Tolerâncias Angulares											
Cotas (mm)		Prof. Des.	Prof. Des.	1106							
até 10		1°	Cotas Vertic.								
de 10 a 50		0° 30'	1:1		Tubo integrante - Alternativa varão				Universidade do Minho		
de 50 a 120		0° 20'			1106						
de 120 a 400		0° 10'									
>400		0° 5'									



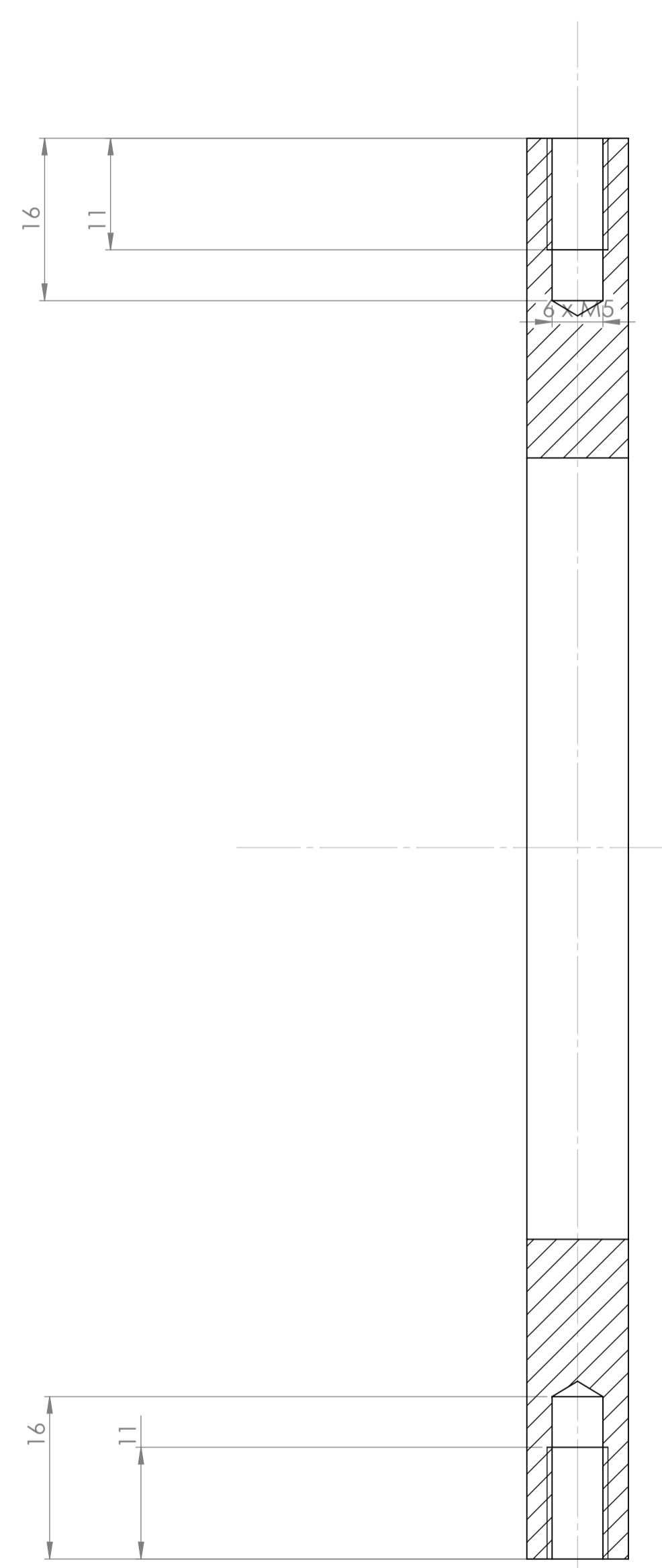
DETAIL C
SCALE 5 : 1

√ Ra 3.2

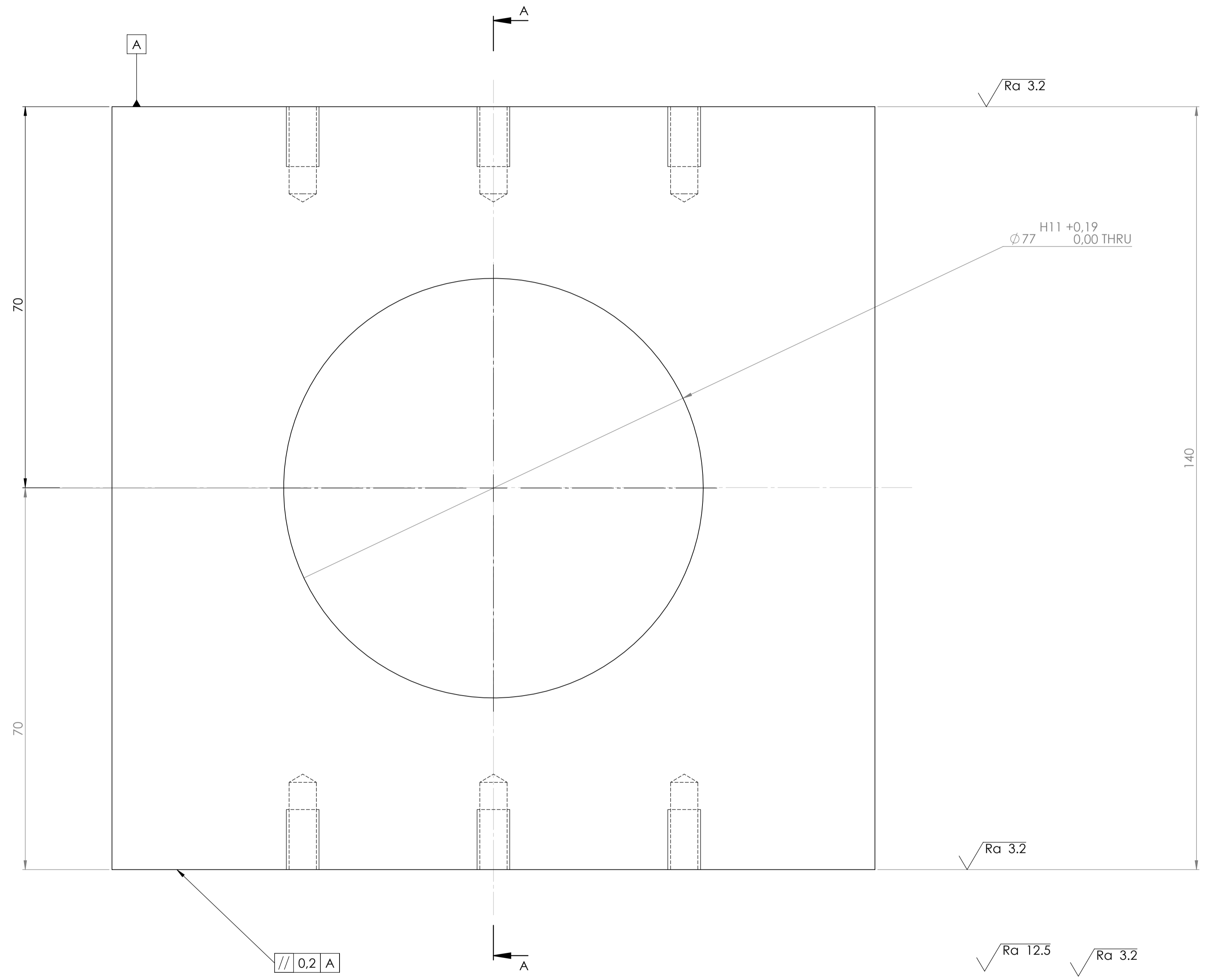
Nº	Designação	Nº Norma Nº Desenho	Material	Nº Ref	Produto	Semi-Acabado	Peso	Observações
	Adaptador célula de carga 2	1109	SAE 1040					
Tolerâncias Lineares Gerais								
de 0,5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000	
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	—	
Tolerâncias Gerais Angulares		Proj. José Silva	1109		Universidade do Minho			
até 10	1°	Des. José Silva						
		Copiou						
		Verif. José Meir.						
de 10 até 50	0° 30'	1:1		Adaptador célula de carga 2 1109				
de 50 até 120	0° 20'							
de 120 até 400	0° 10'	Iso 2768						
acima de 400	0° 5'	Ang:f (fina) Lin:f (fina)						
								Substituí:
								Substituído por:



$\square 0.2$



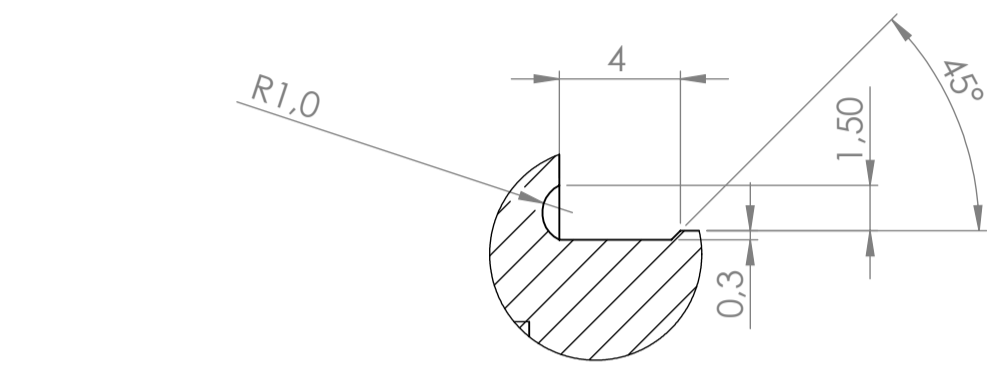
SECTION A-A



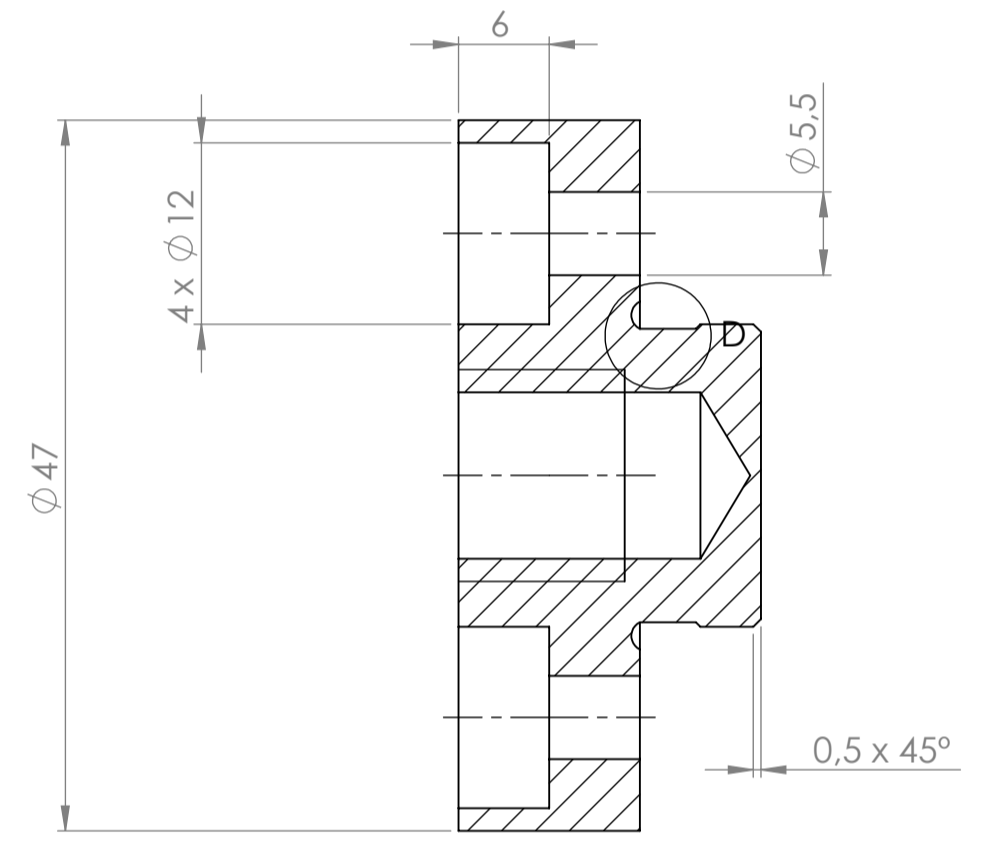
$\parallel 0.2 \text{ A}$

$\sqrt{Ra 12.5}$ $\sqrt{Ra 3.2}$

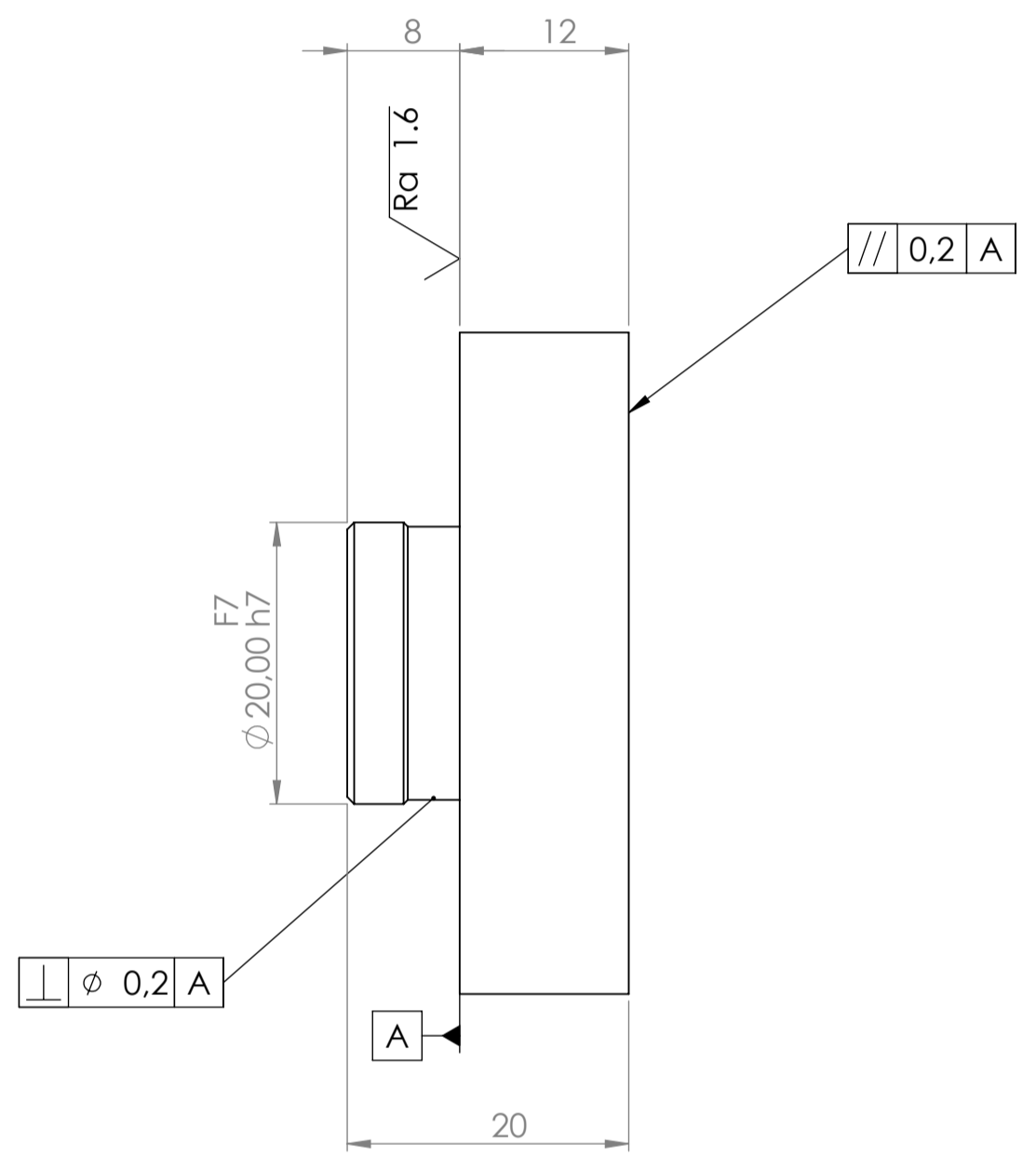
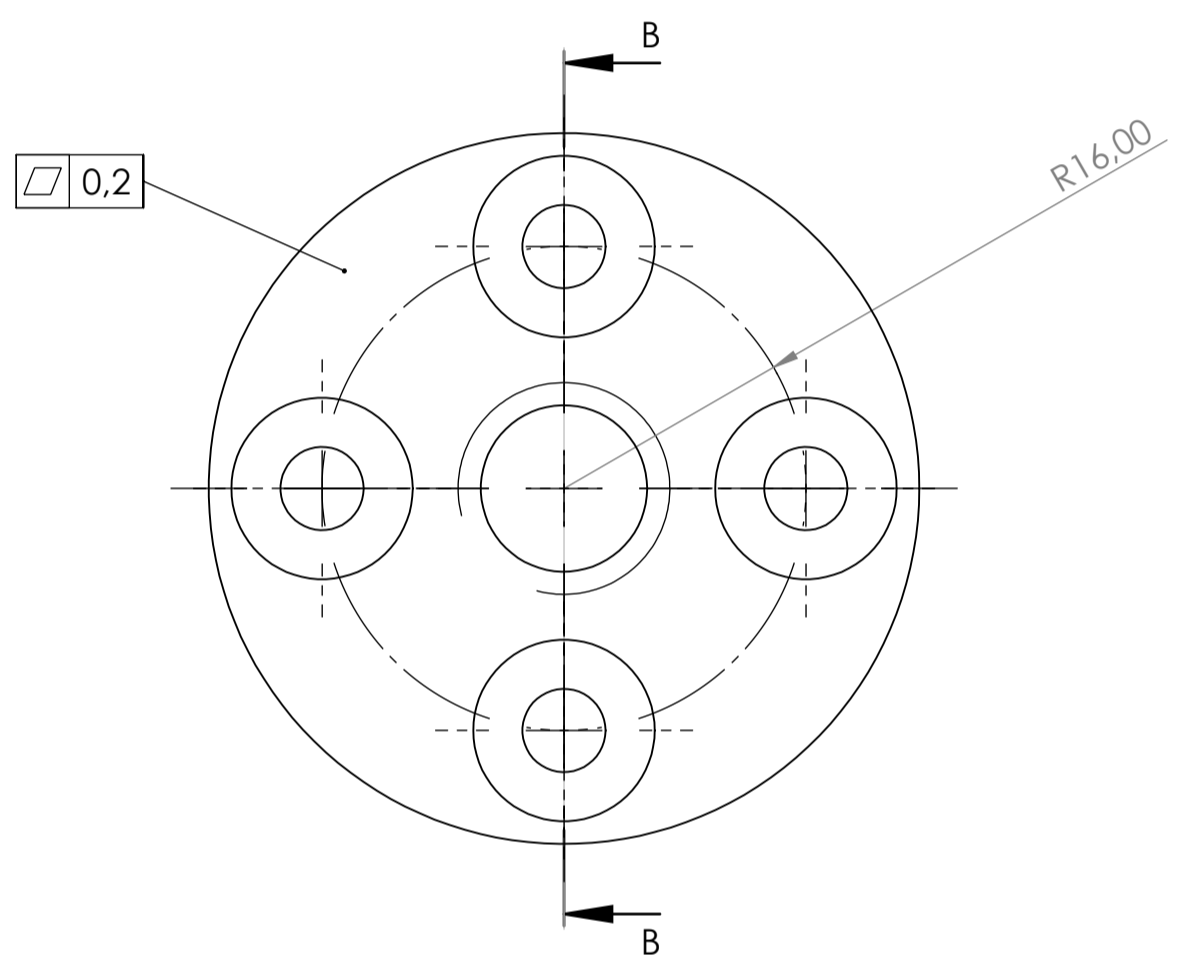
Início suporte tubo integrante		1122	SAE 1040					
Designação		Nº Norma Nº Desenho	Material	Nº Ref	Produto semi acabado Nº Molde	Nº Matriz	Peso	Observações
Tolerância Gerais Lineares (mm)								
de 0.5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000	
0.05	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	—	
Tolerância Gerais Angulares (mm)		Proj. José Silva		1122		Universidade do Minho		
Des. Caslari		Verif.						
até 10	1º	1:1		Início suporte tubo integrante				
de 10 a 50	0º 30'	1122						
de 50 a 120	0º 20'							
de 120 a 400	0º 10'	Ang. final						
> 400	0º 5'	Lin. final						
Substituído por:								



DETAIL D.
SCALE 4 : 1



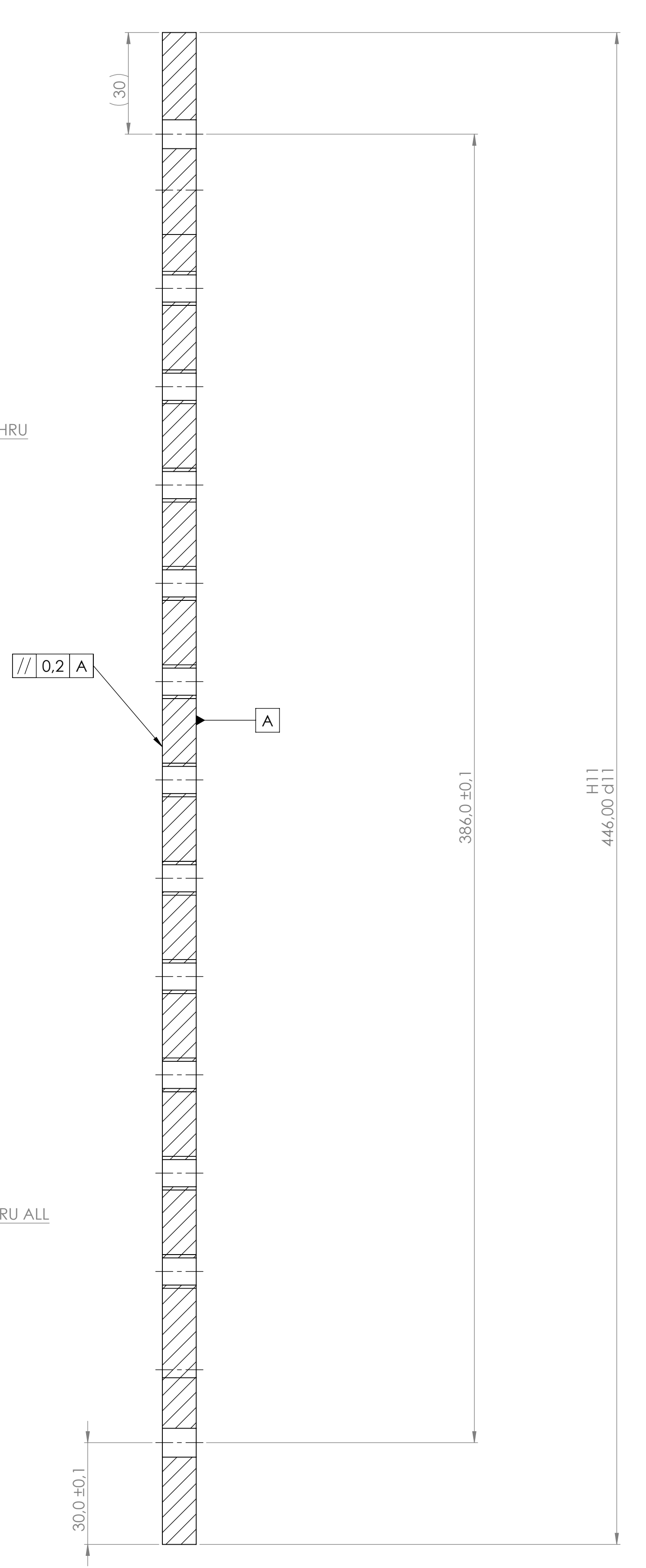
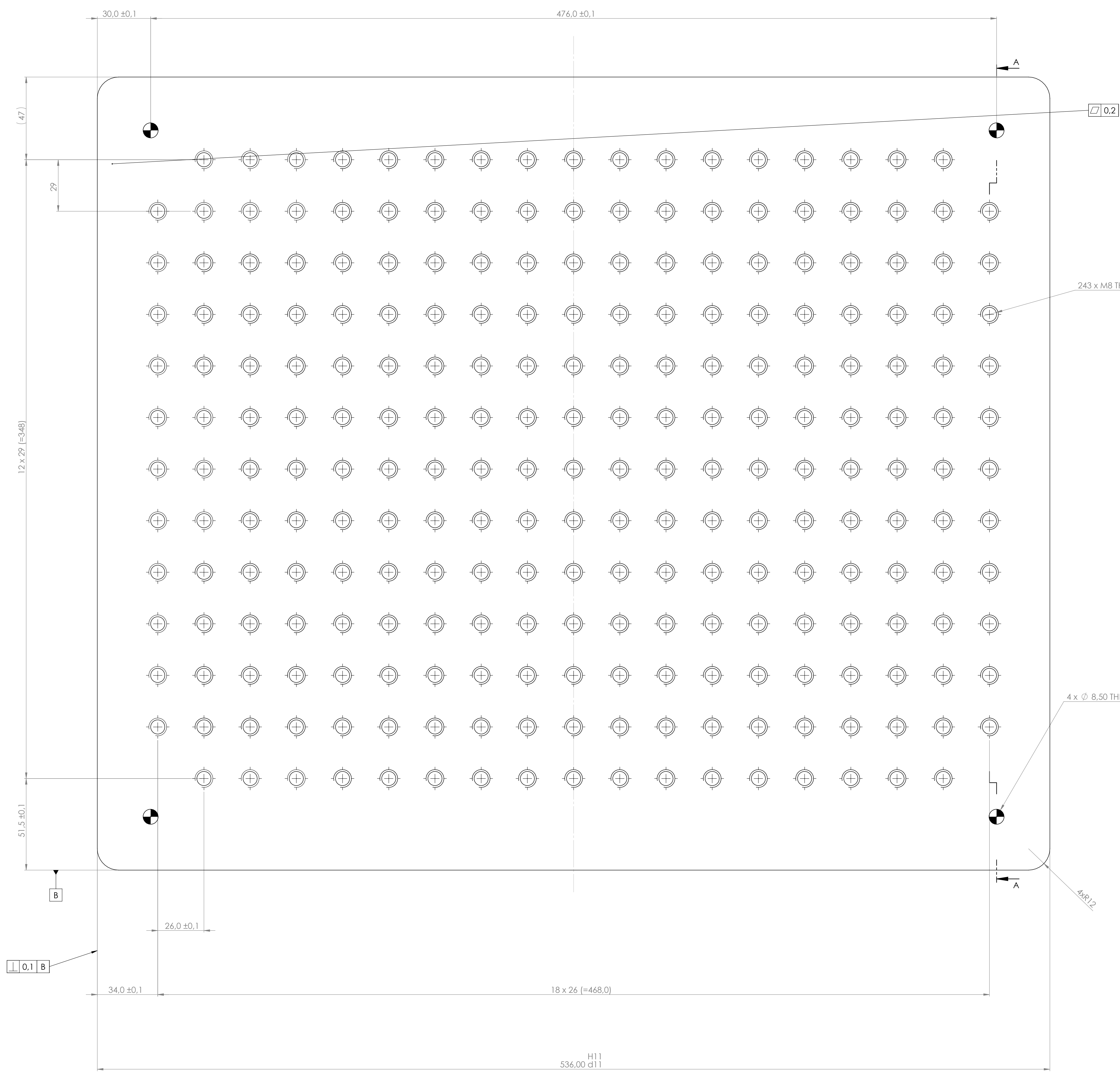
SECTION B-B



$\sqrt{Ra 3.2}$

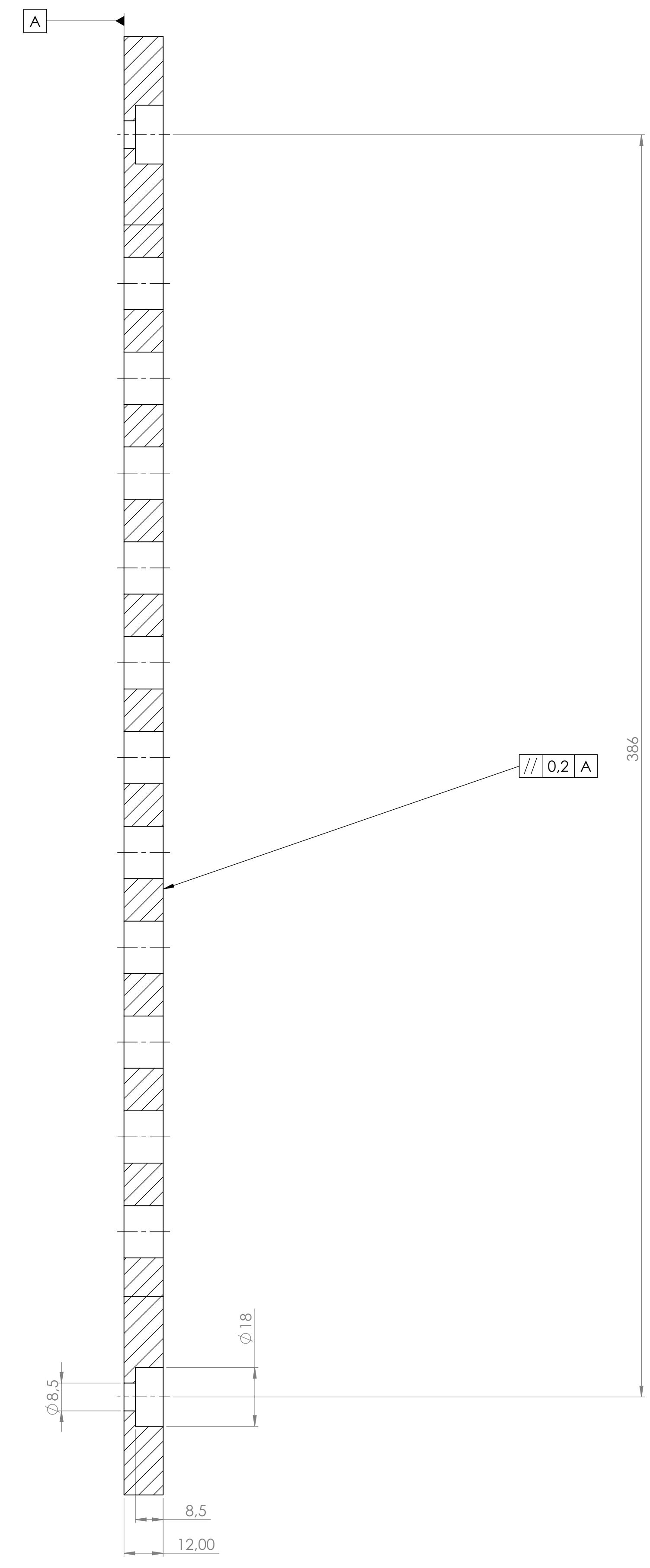
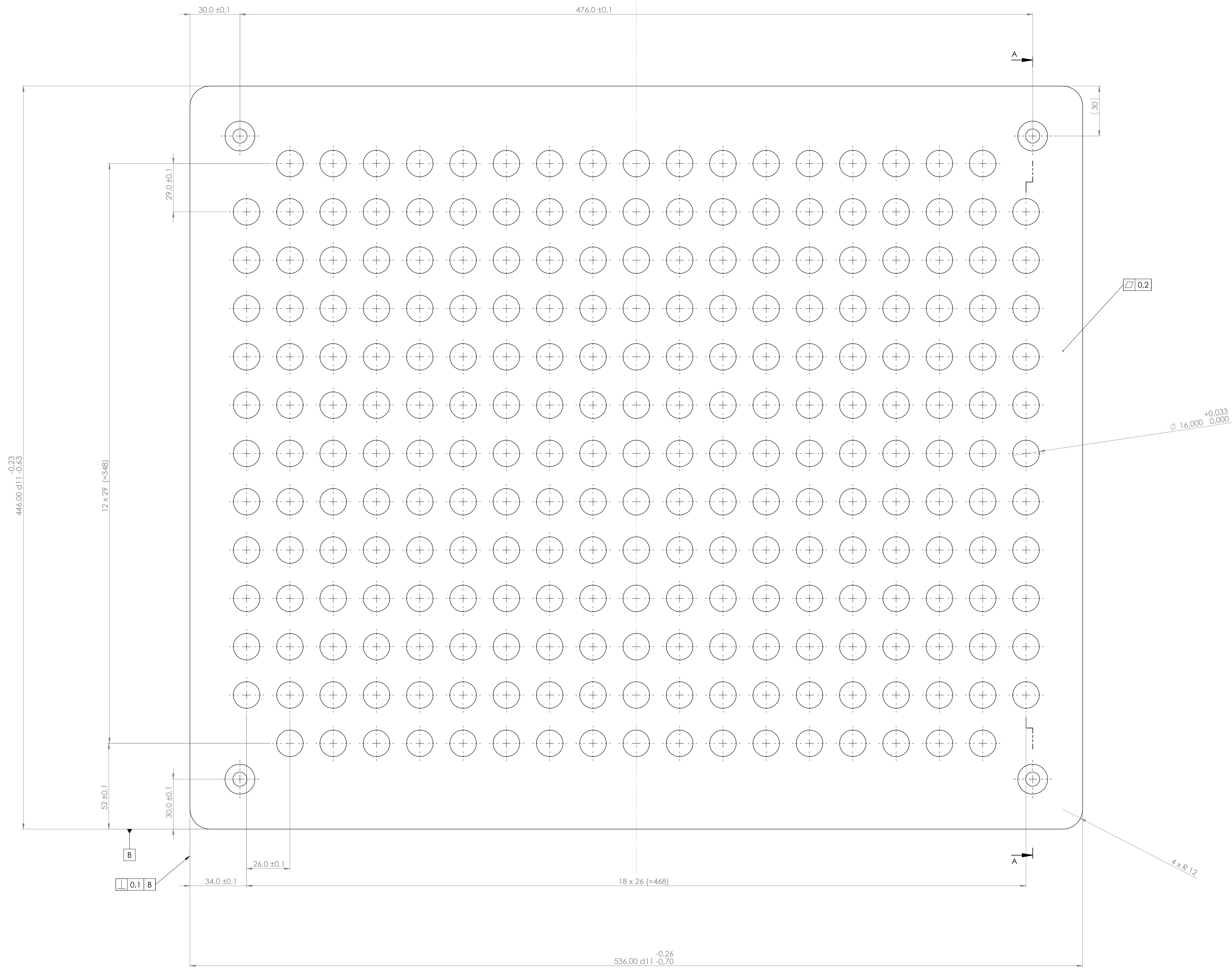
$\sqrt{Ra 1.6}$

Designação		Nº Norma	Material	Nº Ref	Produto semi acabado	Peso	Observações
		Nº Desenho			NºMalde	NºMatriz	
Adaptador 1 da célula de carga		1123	SAE 1040				
Tolerância Gerais Lineares (mm)							
de 0.5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000
0.05	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	—
Tolerância Gerais Angulares (mm)		Proj.	Des.	Calc.	Verif.		
até 10	1°	Proj. José S. 20/12/21	Des. José S. 20/01/22	1123		Universidade do Minho	
de 10 a 50	0° 30'	2:1		Adaptador 1 da célula de carga			
de 50 a 120	0° 20'	1123					
de 120 a 400	0° 10'	Ang. 1(final)					
> 400	0° 5'	Lin. 1(final)					
							Substituído por:



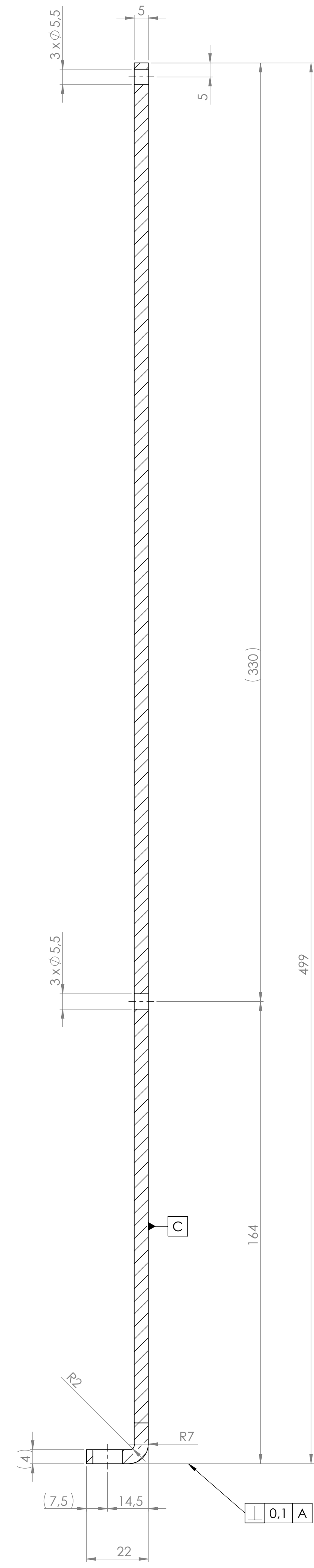
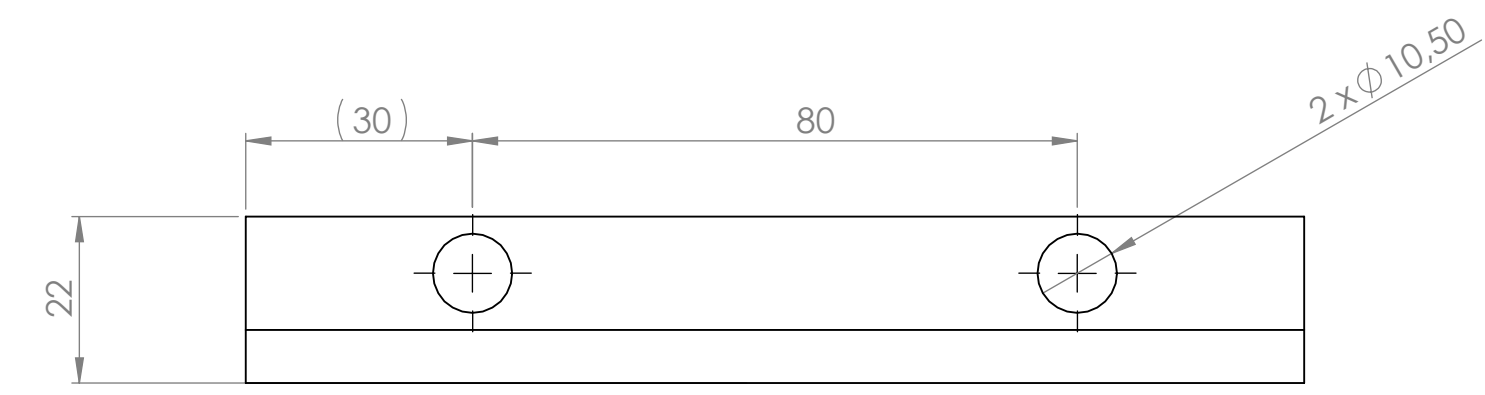
$\sqrt{Ra 3.2}$

Designação		1124		SAE 1040					
Tolerâncias Lineares Gerais (mm)		Tolerâncias Lineares Gerais (mm)		Tolerâncias Lineares Gerais (mm)		Tolerâncias Lineares Gerais (mm)		Tolerâncias Lineares Gerais (mm)	
de 0.5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000		
0.05	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5			
Tolerâncias Angulares Gerais (mm)		Tolerâncias Angulares Gerais (mm)		Tolerâncias Angulares Gerais (mm)		Tolerâncias Angulares Gerais (mm)		Tolerâncias Angulares Gerais (mm)	
até 10	1°	até 10	1°	até 10	1°	até 10	1°	até 10	1°
de 10 a 50	0° 30'	de 10 a 50	0° 30'	de 10 a 50	0° 30'	de 10 a 50	0° 30'	de 10 a 50	0° 30'
de 50 a 120	0° 20'	de 50 a 120	0° 20'	de 50 a 120	0° 20'	de 50 a 120	0° 20'	de 50 a 120	0° 20'
de 120 a 400	0° 10'	de 120 a 400	0° 10'	de 120 a 400	0° 10'	de 120 a 400	0° 10'	de 120 a 400	0° 10'
>400	0° 5'	>400	0° 5'	>400	0° 5'	>400	0° 5'	>400	0° 5'
Projeto: José S. 20/01/2021		Projeto: José S. 20/01/2021		Projeto: José S. 20/01/2021		Projeto: José S. 20/01/2021		Projeto: José S. 20/01/2021	
1:1		1:1		1:1		1:1		1:1	
Suporte apontador 1		Suporte apontador 1		Suporte apontador 1		Suporte apontador 1		Suporte apontador 1	
1124		1124		1124		1124		1124	
Universidade do Minho		Universidade do Minho		Universidade do Minho		Universidade do Minho		Universidade do Minho	

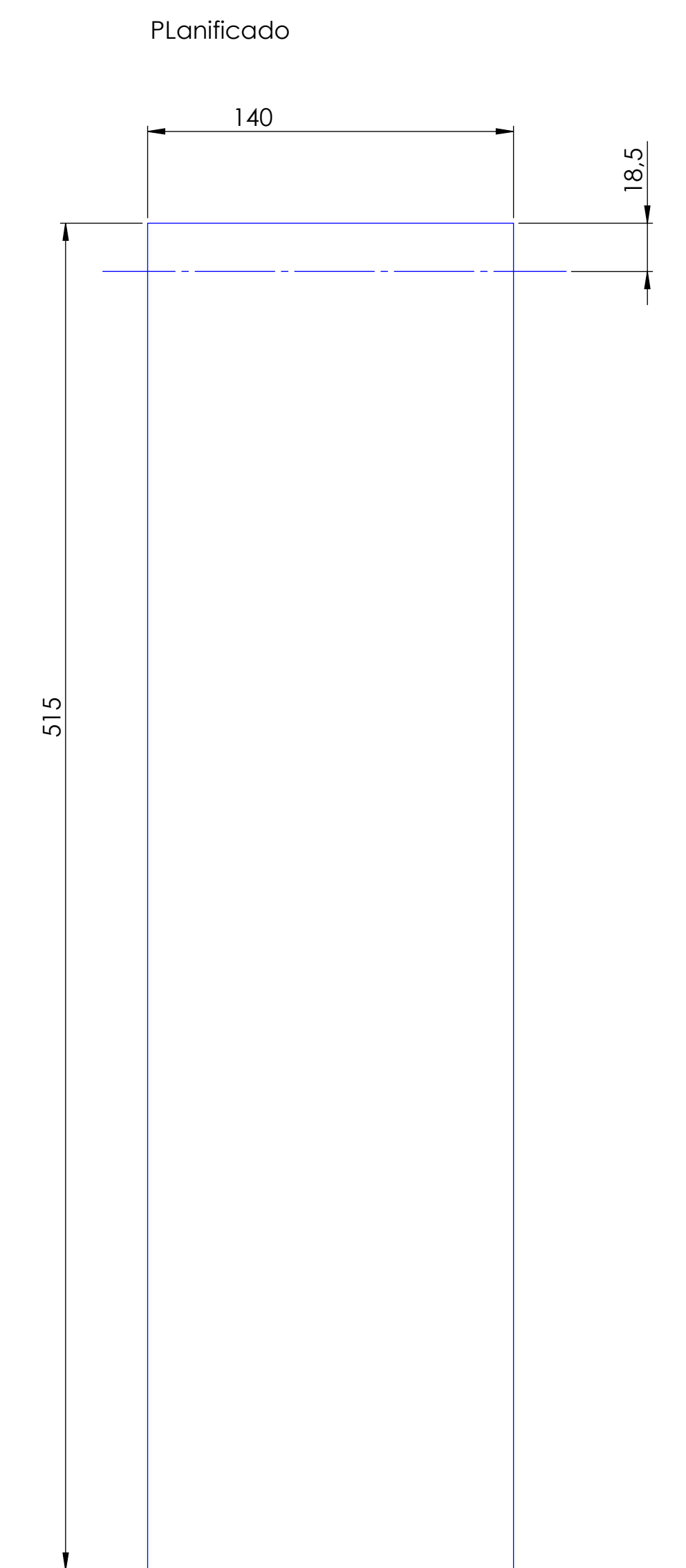
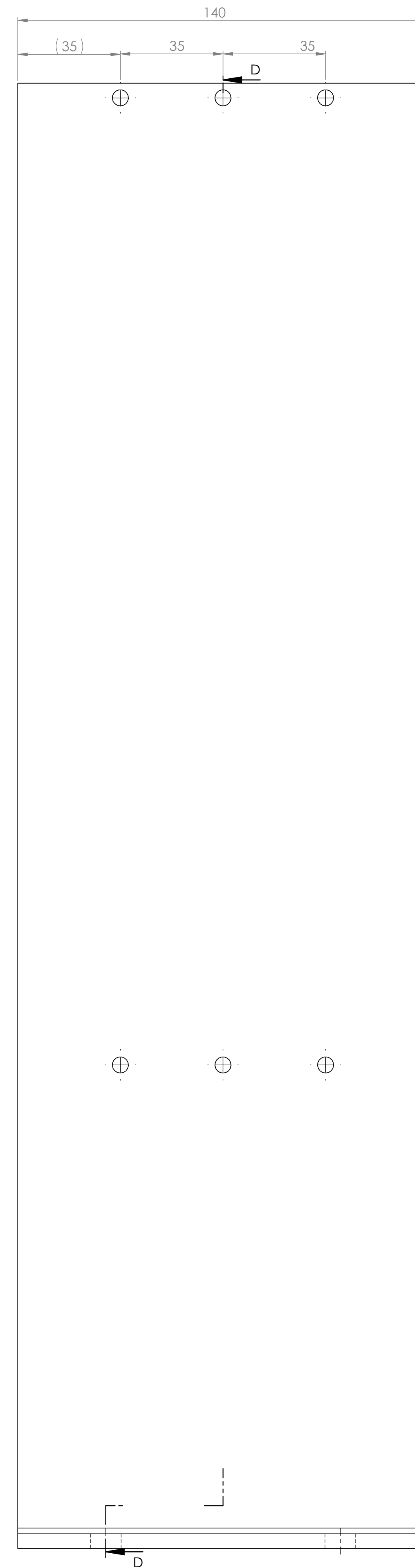


$\sqrt{Ra 3.2}$ $\sqrt{Ra 1.6}$

Designação		1125		SAE 1040		1125		Produto semi acabado		Piso		Observações	
		Nº Norma		Material		Nº Ref		Nº Modelo		Nº Trabalho			
		de 0,5 a 3		de 3 a 6		de 6 a 30		de 30 a 120		de 120 a 400		de 400 a 1000	
		de 1000 a 2000		de 2000 a 4000									
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5							
Tolerâncias Angulares		Proj. José S.		1125		Suporte apontador 2		Universidade do					
Cotas (mm)		Des. José S.						Minho					
de 10 a 50		0° 30'		Suporte apontador 2									
de 50 a 120		0° 20'		1125									
de 120 a 400		0° 10'											
>400		0° 5'											



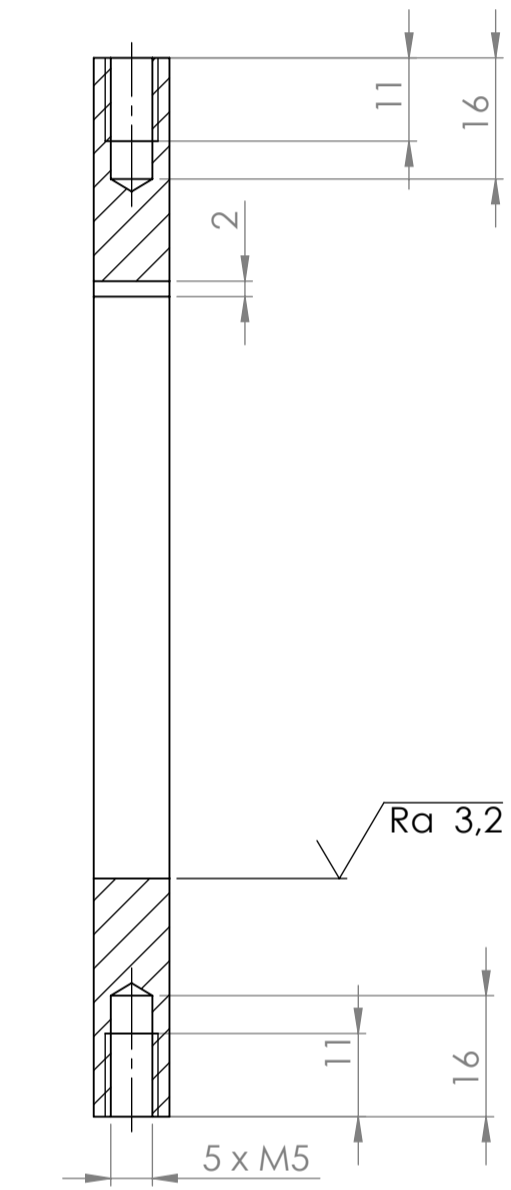
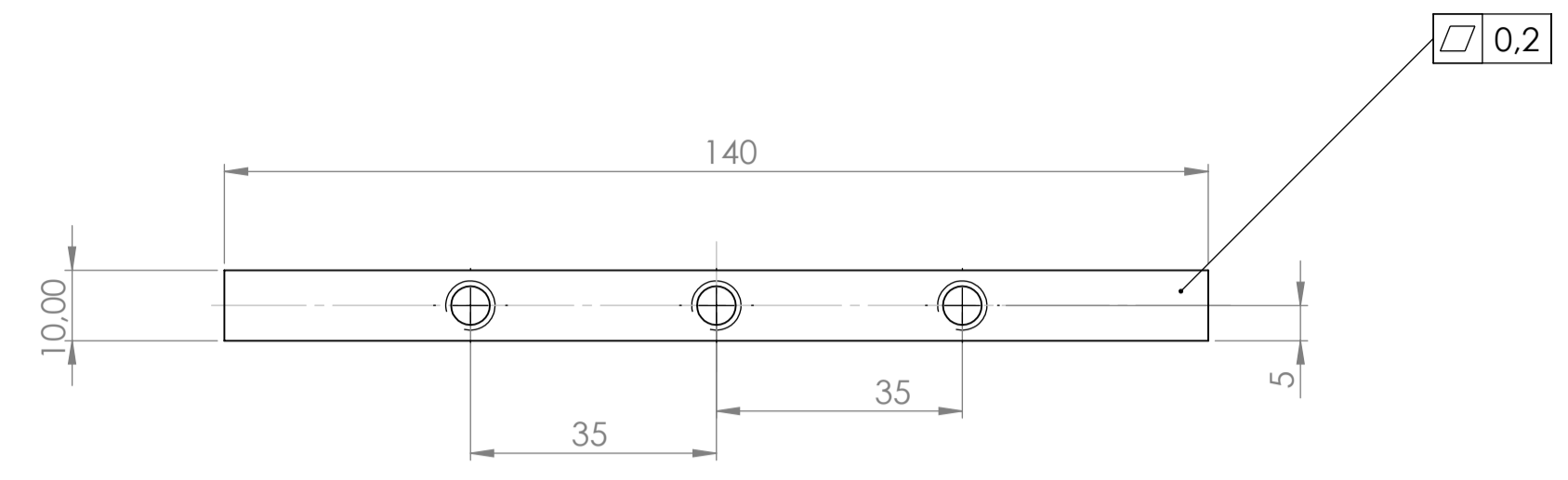
SECTION D-D
SCALE 1 : 1



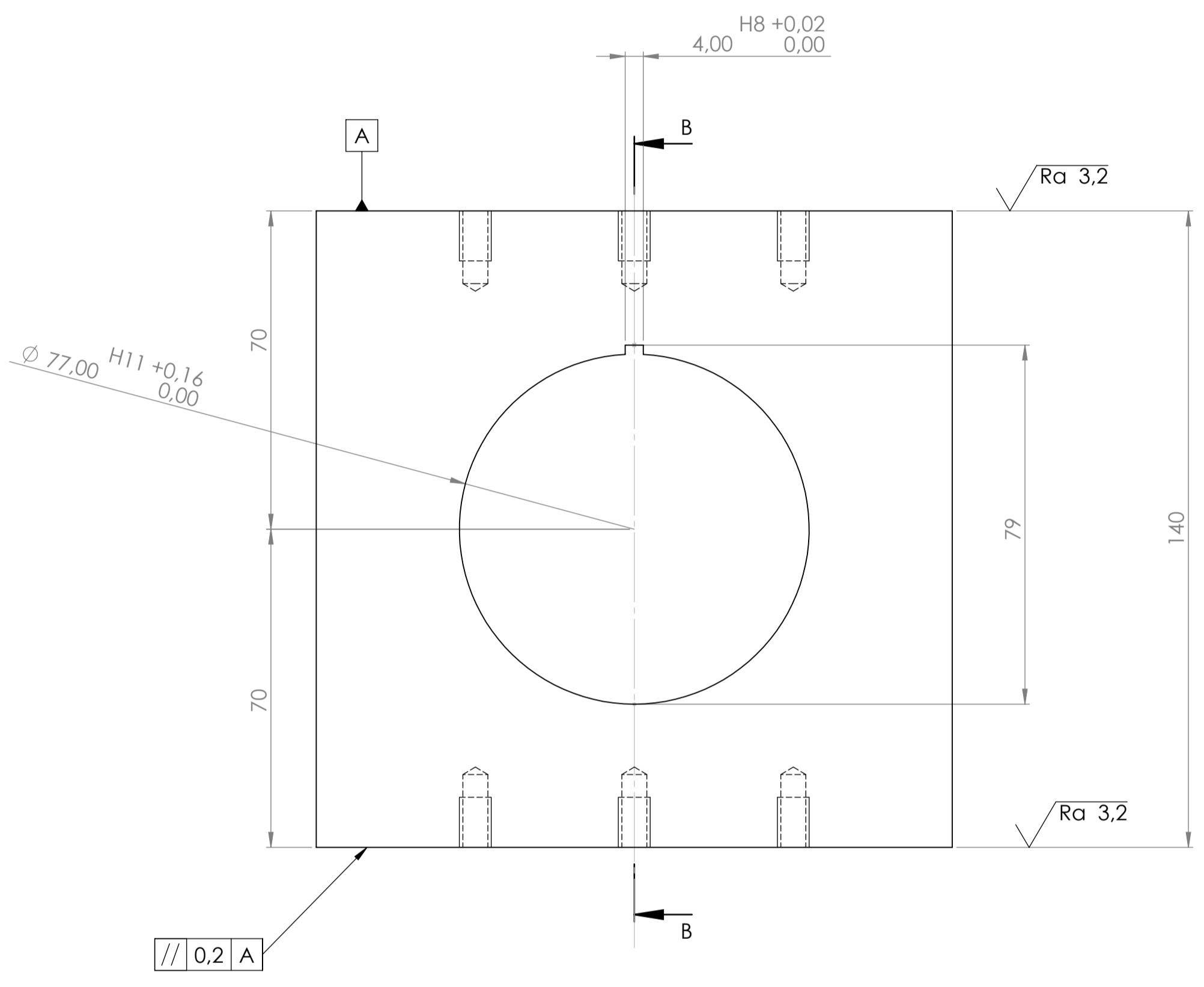
√ Ra 3.2

Designação		1126	SAE 1040	Material		Produto semi acabado		Peso	Observações
		Nº Norma	Nº Desenho	Ref	Nº Modelo	Nº Voliz			
Tolerâncias Lineares Gerais (mm)									
de 0,5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000		
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5			
Tolerâncias Angulares Gerais (mm)		Pris. até 10	Des. até 10	Capôlô	Vert.				
de 10 a 50	0° 30'								
de 50 a 120	0° 20'								
de 120 a 400	0° 10'								
>400	0° 5'								
1:1		Ligador do suporte tubo integrante							
ISO 2768		1126							
1 (fina)									
1 (fina)									

Universidade do Minho

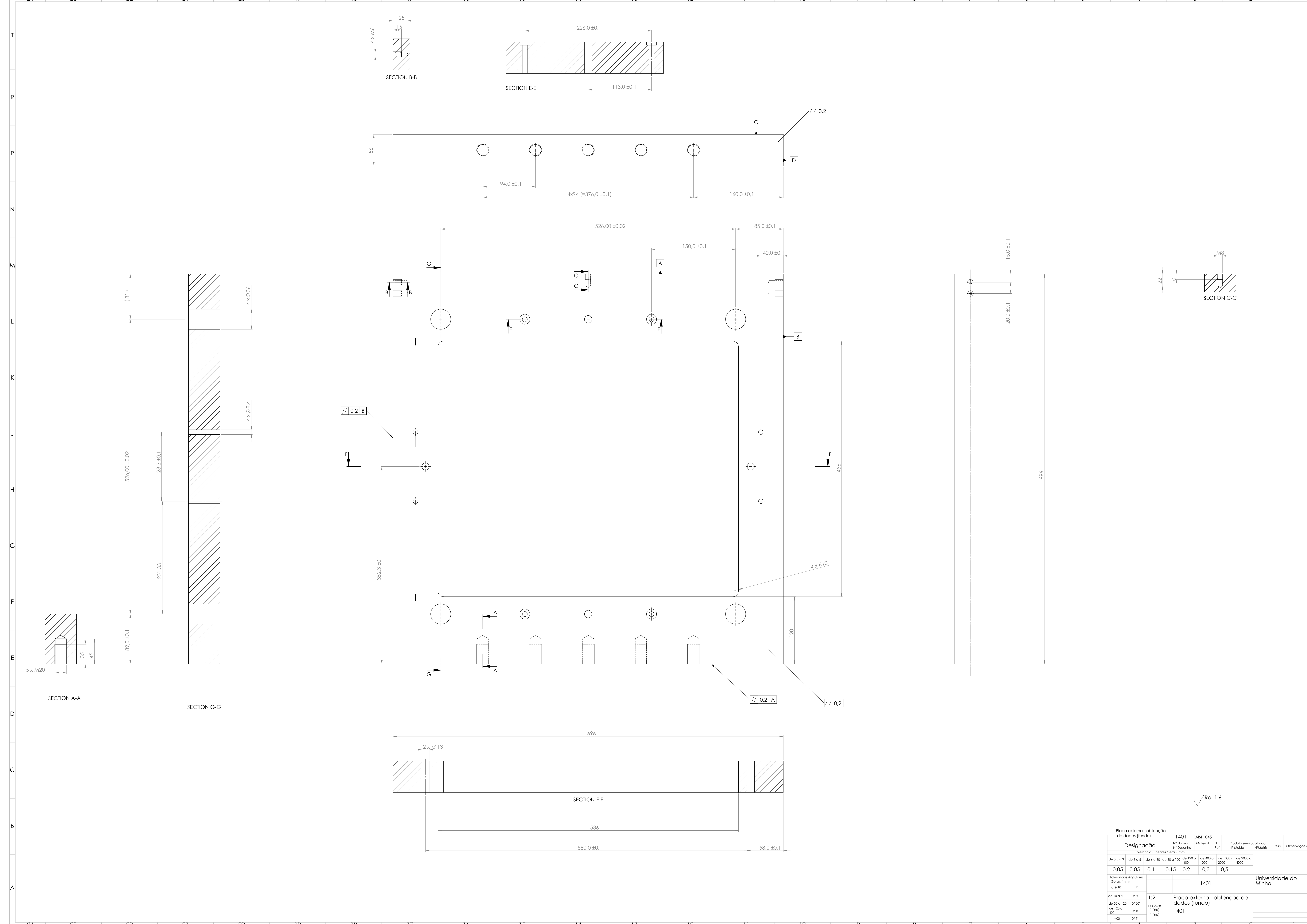


SECTION B-B
SCALE 1:1



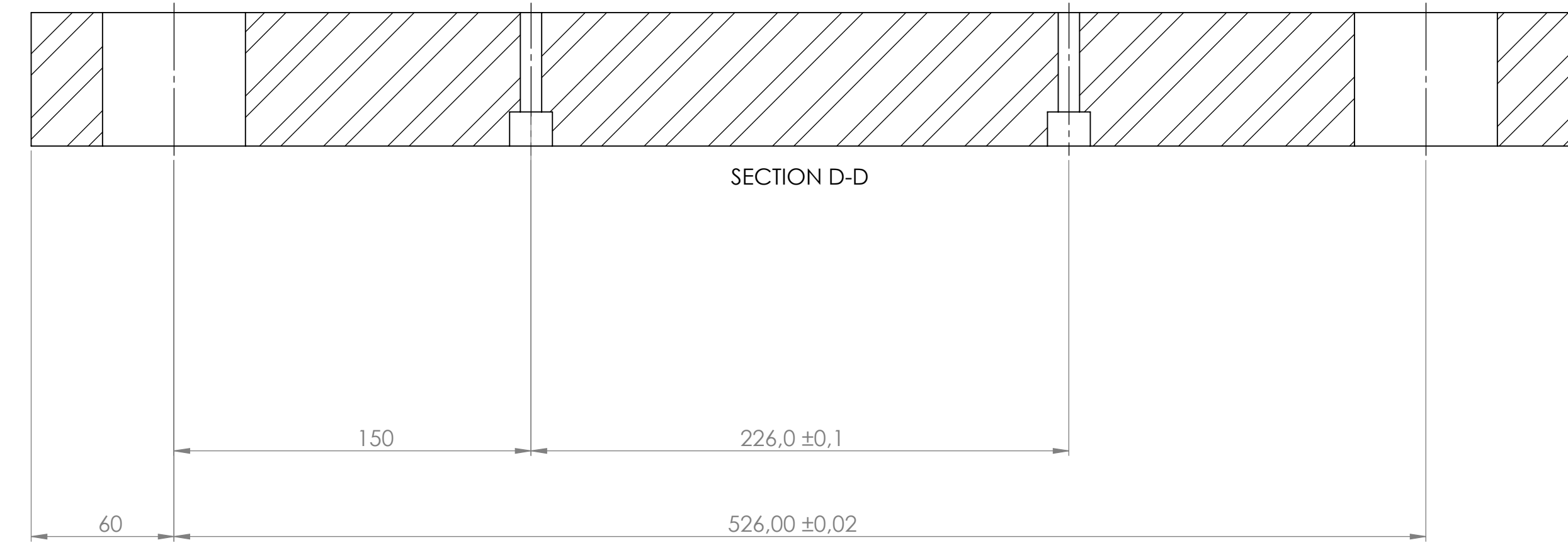
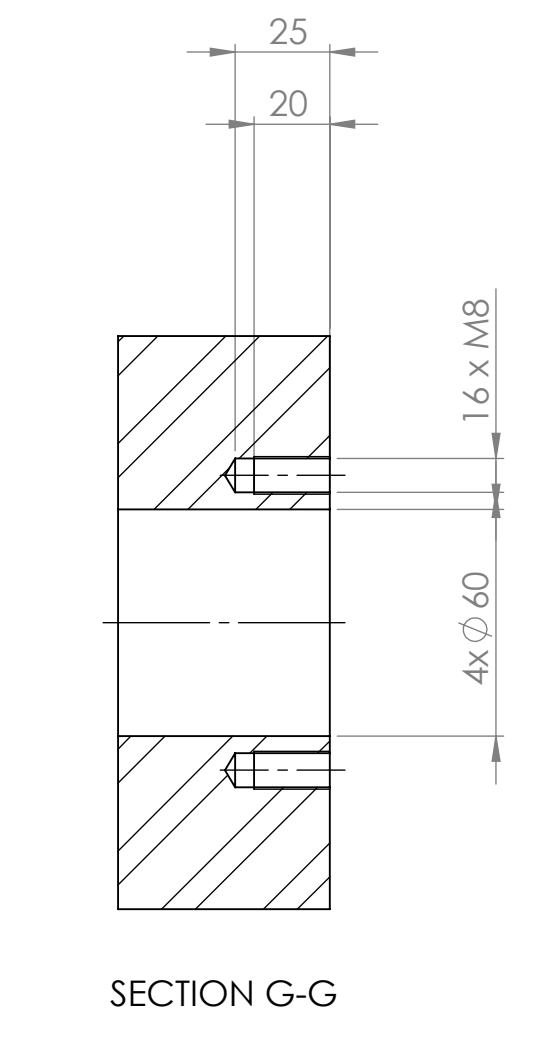
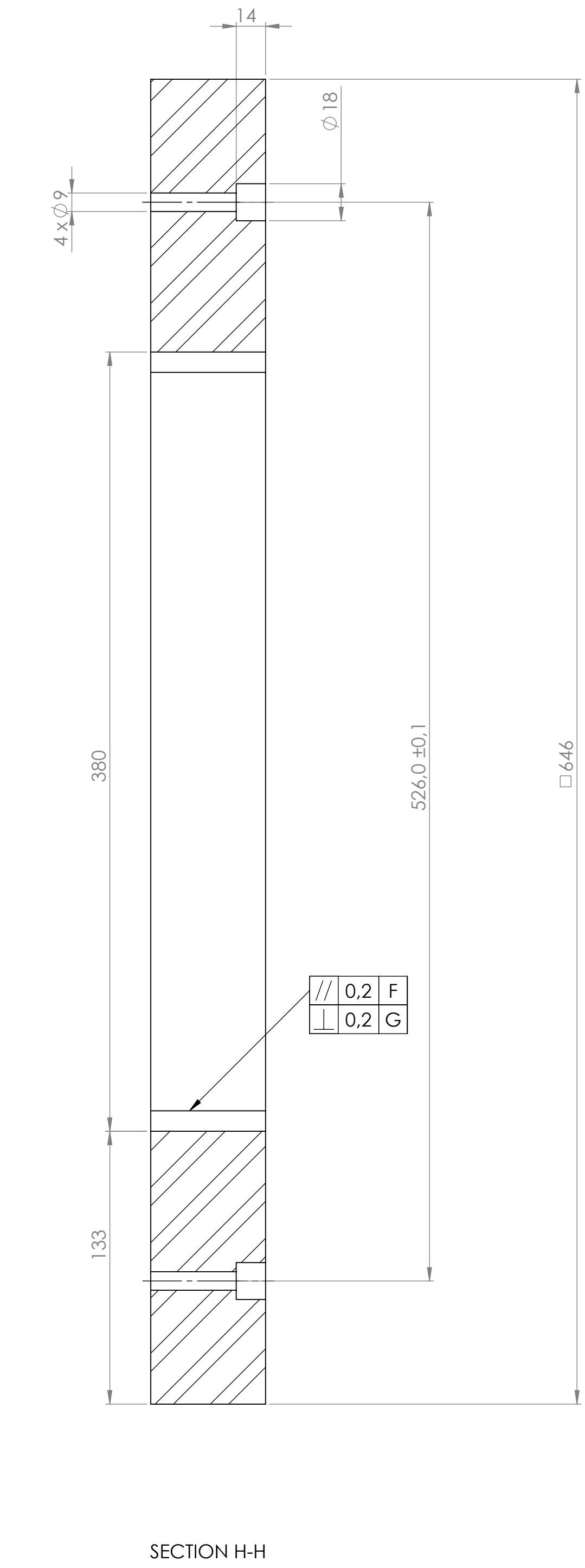
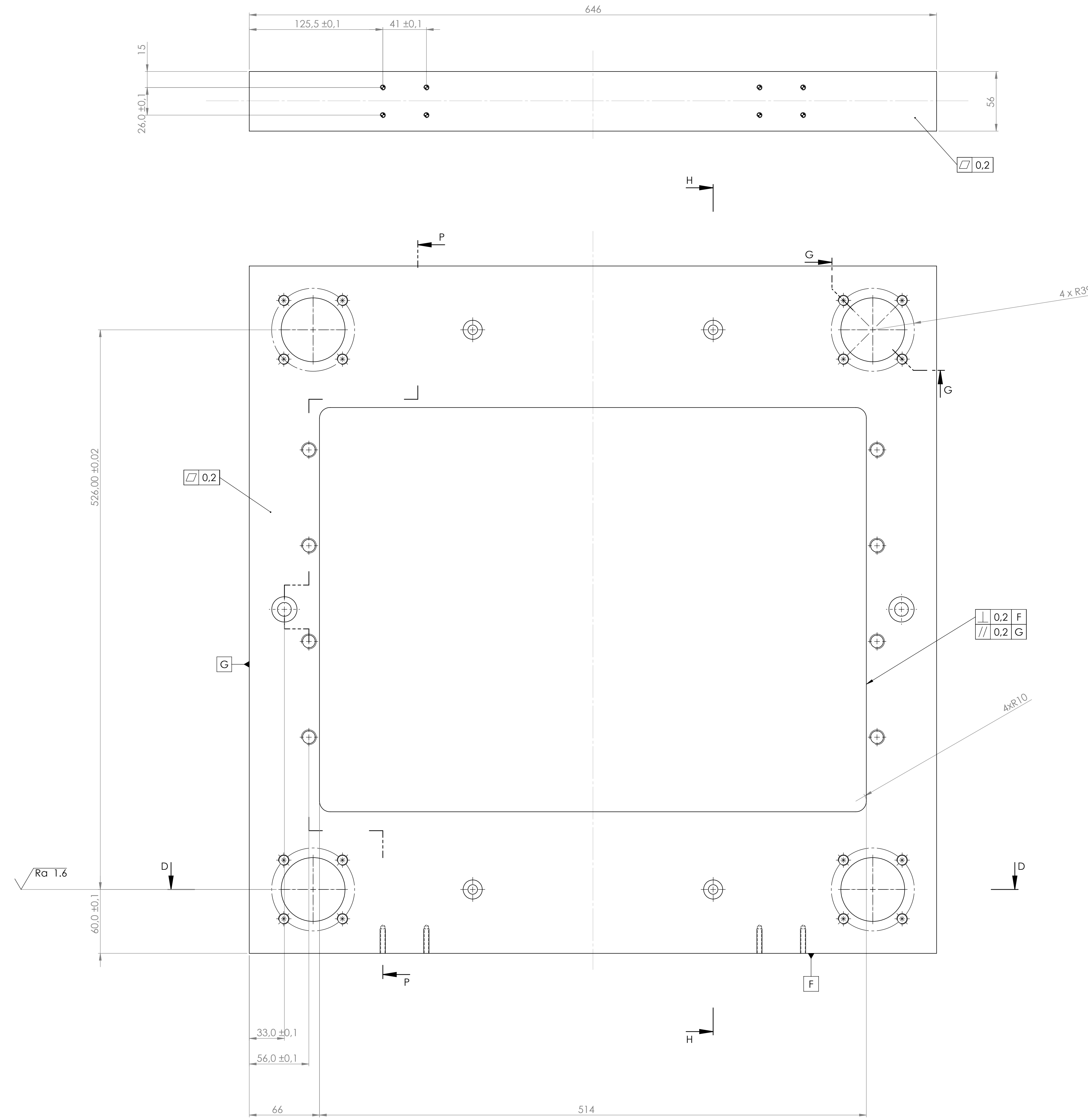
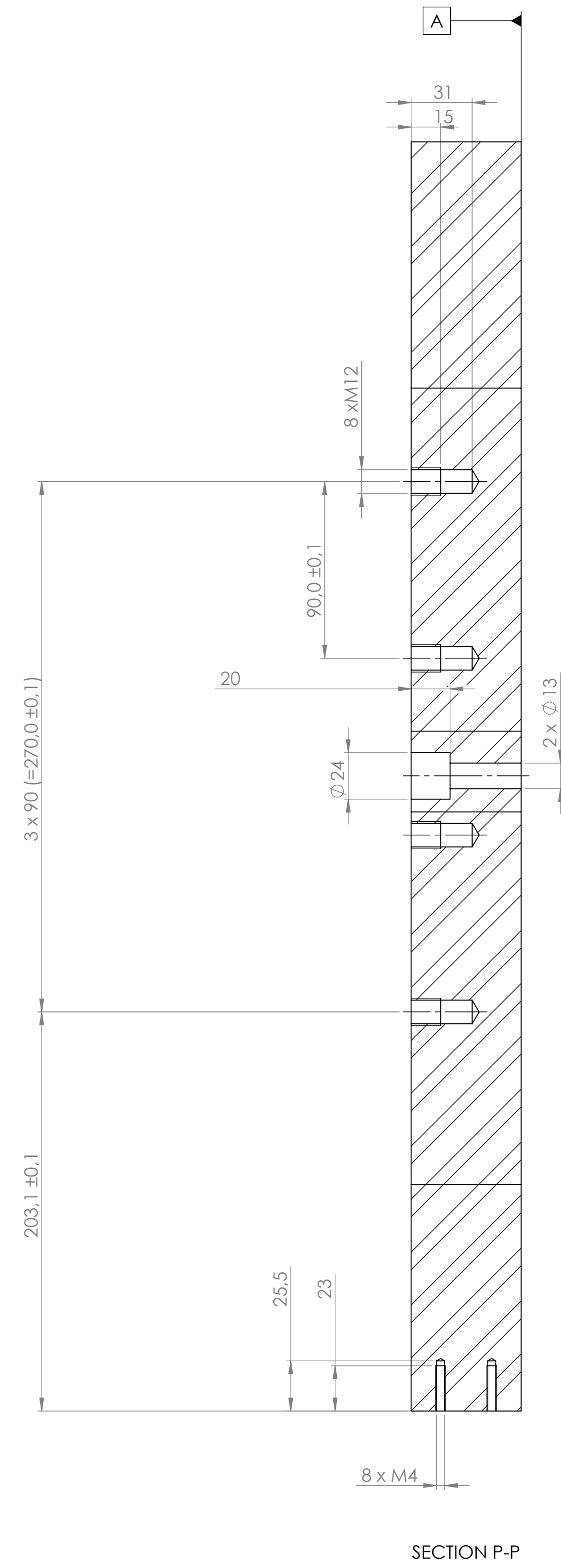
$\sqrt{Ra 12.5}$ $\sqrt{Ra 3.2}$

Entrada tubo -suporte tubo integrante		1128	SAE 1040					
Designação		Nº Norma Nº Desenho	Material	Nº Ref	Produto semi acabado NºMalde	NºMatriz	Peso	Observações
Tolerância Gerais Lineares (mm)								
de 0.5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000	
0.05	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	—	
Tolerância Gerais Angulares (mm)		Proj. José Silva		1128		Universidade do Minho		
até 10		Des. José Silva						
		Copiou						
		Verif.						
de 10 a 50	0° 30'	1:1		Entrada tubo -suporte tubo integrante				
de 50 a 120	0° 20'			1128				
de 120 a 400	0° 10'	Ang 11 final						
> 400	0° 5'	Lin. 10 final						
						Substituído por:		



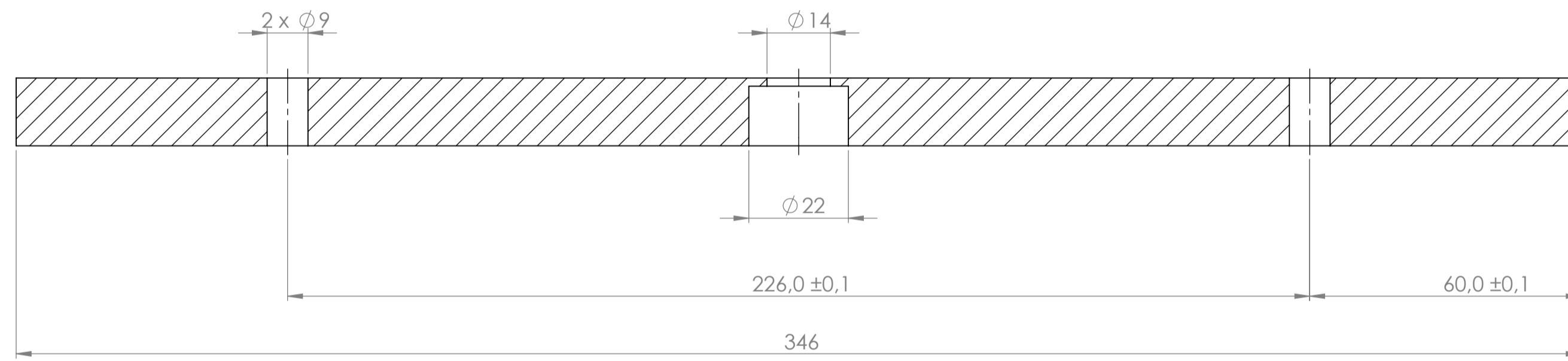
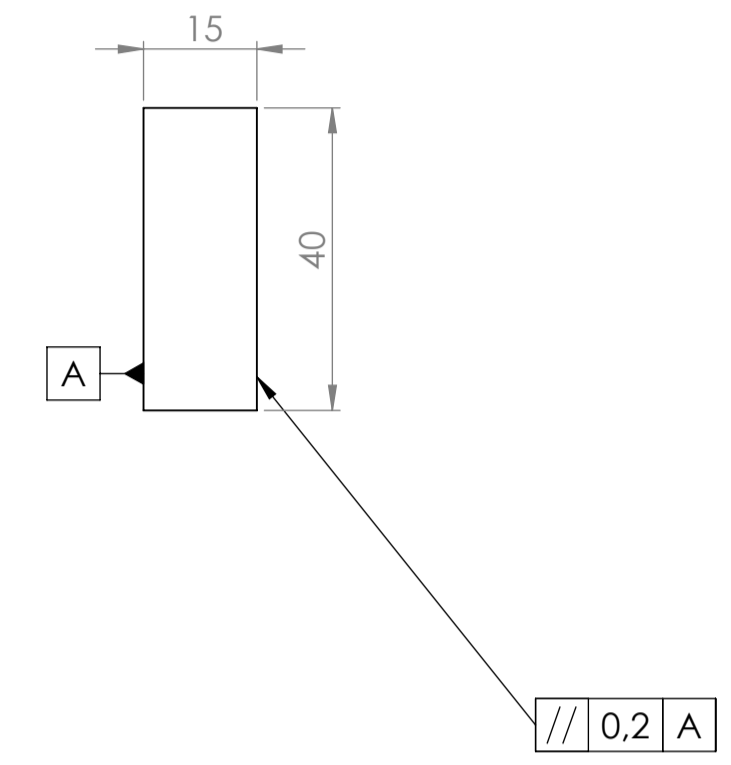
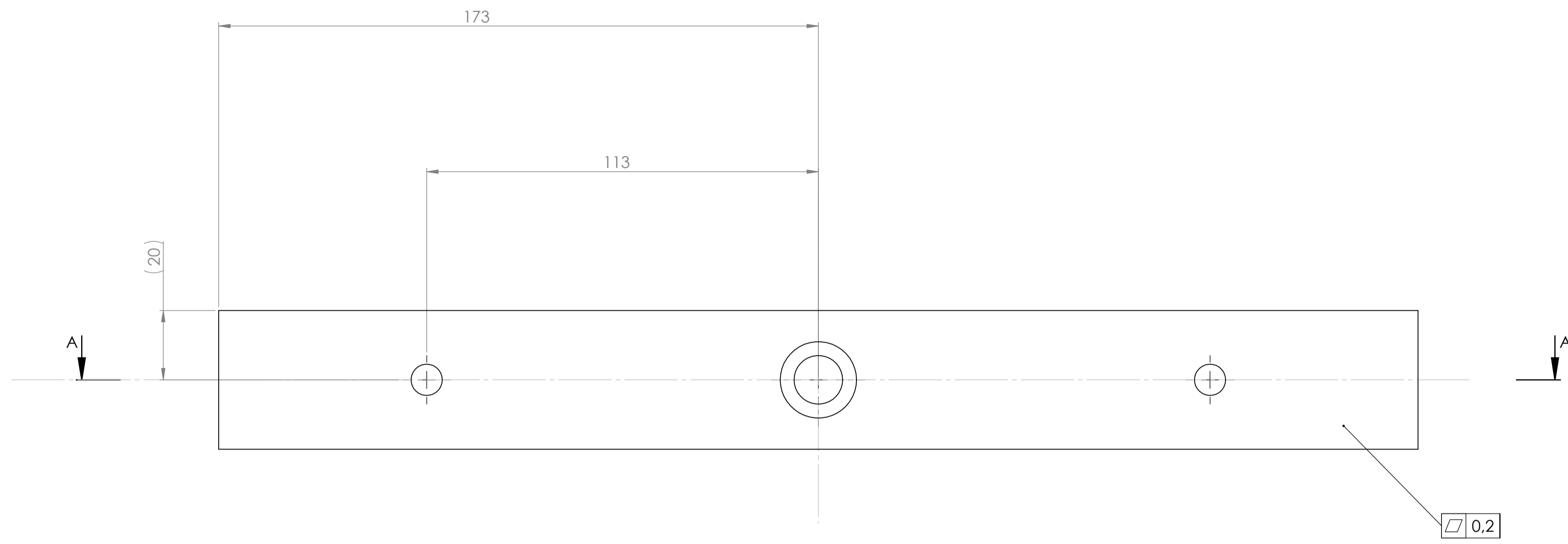
√ Ra 1.6

Designação		1401	AISI 1045		Material		Produto semi-acabado		Peso	Observações	
		Nº Norma	Nº Desenho	Ref	Nº Modelo	Nº Modelo					
Tolerâncias Lineares Gerais (mm)											
de 0,5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000				
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5					
Tolerâncias Angulares Gerais (mm)											
até 10	1°		1401								Universidade do Minho
1:2 de 10 a 50 0°30' de 50 a 120 0°20' de 120 a 400 0°10' >400 0°5' f (fina)											
Placa externa - obtenção de dados [função] 1401											



√Ra 3.2 √Ra 1.6

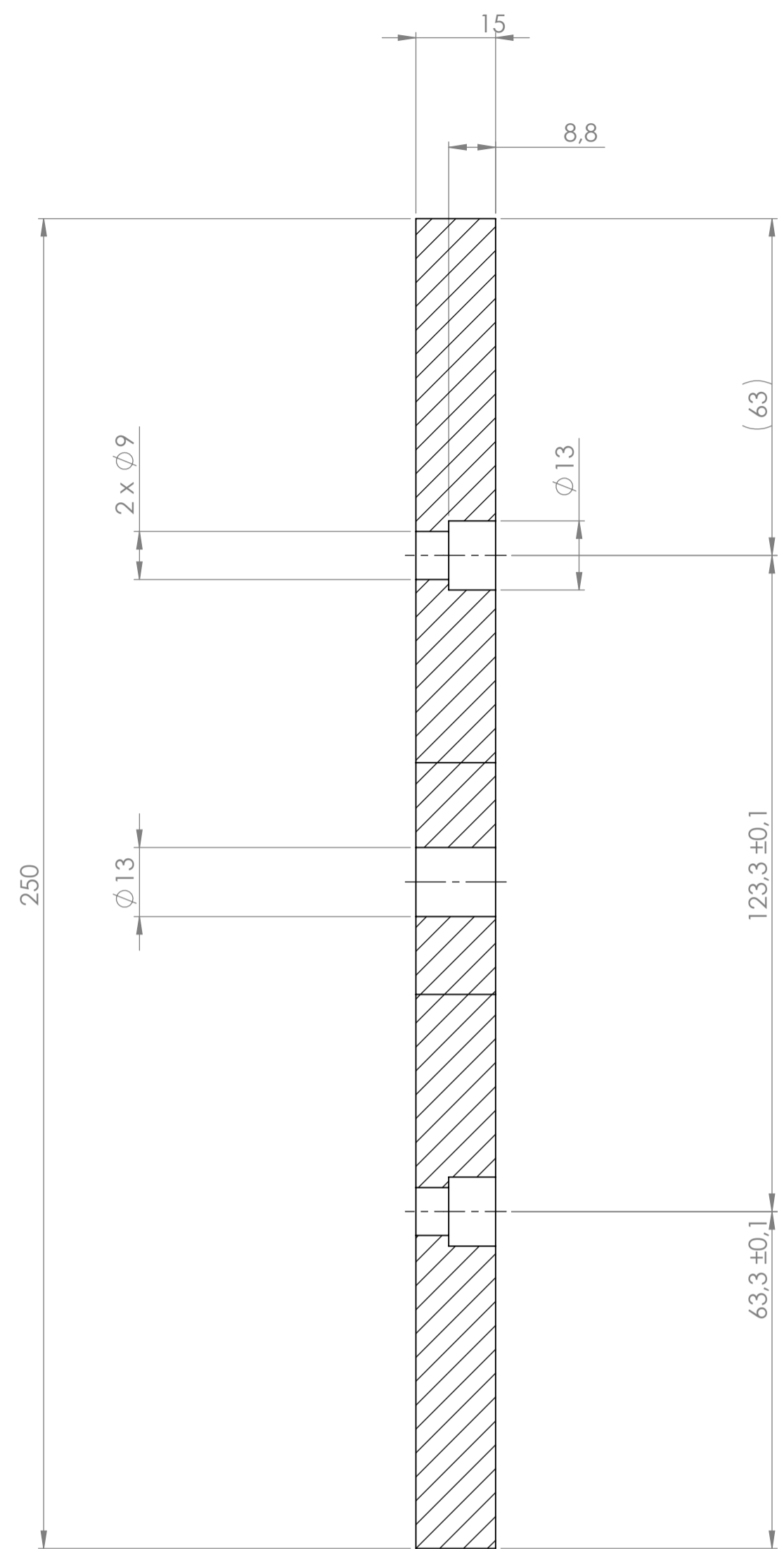
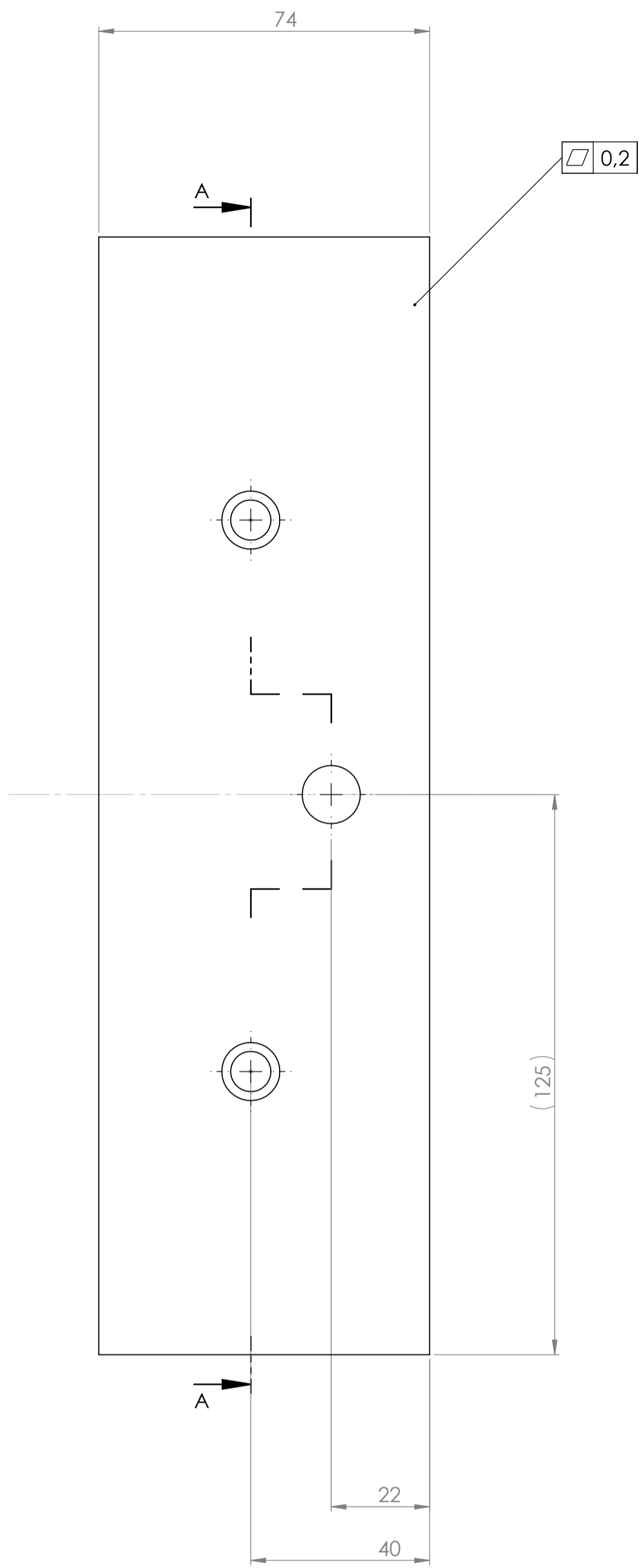
Placa interna - suporte objeto		1402		ASI 1045						
Designação		Nº Norma	Nº Desenho	Material	Nº Ref	Produto semi acabado	Nº Modelo	Nº Trabalho	Peso	Observações
Tolerâncias Lineares Gerais (mm)										
de 0,5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000			
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5				
Tolerâncias Angulares Gerais (mm)										
de 10 a 50	de 50 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000					
0° 30'	0° 20'	0° 15'	0° 10'	0° 5'						
1402										
Placa interna - suporte objeto										
1402										
Universidade do Minho										



SECTION A-A

√ Ra 12.5

Designação		Nº Norma	Material	Nº Ref.	Produto semi acabado	Peso	Observações
Placa batente horizontal		1403	AISI 1215				
Tolerância Gerais Lineares (mm)							
de 0.5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000
0.05	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	—
Tolerância Gerais Angulares (mm)		Proj.		1403		Universidade do Minho	
ate 10		Des.		1403		Universidade do Minho	
de 10 a 50		Cópia		Placa batente horizontal			
de 50 a 120		Verif.		1403			
de 120 a 400		Ang. 1º final		1403			
> 400		Un. 10º final		1403			
Substituído por:							



José Silva

√ Ra 12.5

Chapa batente vertical		1404	AISI 1215						
Designação		Nº Norma Nº Desenho	Material	Nº Ref.	Produto semi acabado Nº Malde	Nº Matriz	Peso	Observações	
Tolerância Gerais Lineares (mm)									
de 0,5 a 3	de 3 a 6	de 6 a 30	de 30 a 120	de 120 a 400	de 400 a 1000	de 1000 a 2000	de 2000 a 4000		
0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	—		
Tolerância Gerais Angulares (mm)		Proj.		1404		Universidade do Minho			
até 10		1ª							
de 10 a 50	0° 30'	1:1		Chapa batente vertical 1404					
de 50 a 120	0° 20'								
de 120 a 400	0° 10'	Ang. ffnal							
> 400	0° 5'	Lin. ffnal							
						Substituído por:			