



Conceção e projeto de balança para túnel de vento

GONÇALO LUÍS COUTO CAMPOS

outubro de 2025



Conceção e projeto de balança para túnel de vento

GONÇALO LUÍS COUTO CAMPOS
setembro de 2025

Conceção e projeto de balança para túnel de vento

Gonçalo Luís Couto Campos

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Automóvel**

**Orientador: Prof. Dr. Fernando José Ferreira
Co-orientador: Eng. Pedro Miguel Rosas de Almeida Areal**

Resumo

Com o rápido avanço tecnológico nas indústrias aeronáutica e automóvel, a utilização de túneis de vento tem assumido um papel cada vez mais relevante na previsão e otimização do comportamento de corpos em movimento no seio de um fluido. Embora estes túneis sejam tradicionalmente utilizados para visualizar o escoamento do ar ao redor dos corpos em estudo, a integração de uma balança permite quantificar diretamente as forças aerodinâmicas envolvidas, abrindo caminho à otimização geométrica de modelos segundo objetivos específicos. Neste contexto, a presente dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma balança de três eixos adaptada a túneis de vento académicos, capaz de medir com precisão a força de sustentação, a força de arrasto aerodinâmico e o momento de cabragem. Após uma revisão abrangente da literatura disponível em bases de dados científicas reconhecidas, foi concluído que, tendo em conta as restrições físicas e funcionais do projeto, a solução mais adequada consistiria numa balança exterior de plataforma equipada com três células de carga, duas para medição de forças ortogonais e uma dedicada à leitura do momento de cabragem. O processo de dimensionamento e projeto considerou as condições operacionais previstas para um túnel de vento em desenvolvimento nas instalações do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), incluindo estimativas das cargas que serão aplicadas às células de carga e critérios de desacoplamento estrutural entre os eixos de medição. O sistema foi posteriormente construído com uma arquitetura modular, de baixo custo e de simples operação recorrendo a interfaces digitais, permitindo leituras em tempo real e configuração de alarmes. Ensaios preliminares demonstraram coerência entre os dados obtidos, embora se tenham verificado discrepâncias face aos valores teóricos, atribuídas à influência de forças de atrito. Conclui-se que os objetivos definidos foram atingidos com sucesso, sendo a solução proposta robusta, funcional e adequada ao meio académico, com potencial de melhoria futura através da substituição de componentes poliméricos por componentes metálicos para aumentar a rigidez e prevenir a deformação não intencional dos elementos estruturais.

PALAVRAS-CHAVE: Balança Aerodinâmica, Células de Carga, Túnel de Vento, Forças Aerodinâmicas.

Abstract

With rapid technological advances in the aeronautical and automotive industries, the use of wind tunnels has taken on an increasingly important role in predicting and optimising the behaviour of moving bodies within a fluid. Although these tunnels are traditionally used to visualise the airflow around the bodies under study, the integration of a balance allows the aerodynamic forces involved to be quantified directly, paving the way for the geometric optimisation of models according to specific objectives. In this context, the main objective of this dissertation was to develop a three-axis balance adapted to academic wind tunnels, capable of accurately measuring lift force, aerodynamic drag force, and pitching moment. After a comprehensive review of the literature available in recognised scientific databases, it was concluded that, taking into account the physical and functional constraints of the project, the most appropriate solution would be an external platform balance equipped with three load cells, two for measuring orthogonal forces and one dedicated to measuring the pitching moment. The sizing and design process considered the operating conditions expected for a wind tunnel under development at the facilities of the Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), including estimates of the loads that will be applied to the load cells and criteria for structural decoupling between the measurement axes. The system was subsequently built with a modular, low-cost and simple-to-operate architecture using digital interfaces, allowing real-time readings and alarm configuration. Preliminary tests demonstrated consistency between the data obtained, although there were discrepancies with the theoretical values, attributed to the influence of friction forces. It is concluded that the defined objectives were successfully achieved, with the proposed solution being robust, functional and suitable for the academic environment, with potential for future improvement by replacing polymeric components with metallic components to increase stiffness and prevent unintended deformation of structural elements.

KEYWORDS: Aerodynamic Balance, Load Cells, Wind Tunnel, Aerodynamic Forces.

Índice

Lista de figuras.....	vii
Lista de tabelas	ix
Acrónimos e símbolos	x
1. Introdução	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Motivação	3
1.3. Objetivos	3
1.4. Organização do documento	4
2. Revisão bibliográfica	5
2.1. Túneis de vento	5
2.1.1. Circuito aberto.....	6
2.1.2. Circuito fechado	6
2.2. Medição de forças	7
2.3. Balanças interiores	10
2.4. Balanças exteriores.....	11
2.5. Especificações da balança	15
2.6. Células de carga.....	15
2.7. Perfis alares	22
2.8. Balanças previamente desenvolvidas.....	23
3. Dimensionamento da balança	27
3.1. Forças e momento.....	27
3.2. Escolha das células de carga	35
4. Projeto da balança	37
4.1. Pontos principais	38
4.2. Primeira proposta.....	39
4.3. Segunda proposta.....	41
4.3.1. Tratamento de dados.....	43
5. Processo construtivo.....	45
5.1. Materiais utilizados	45
5.2. Circuito elétrico	46
5.3. Elementos estruturais.....	49
5.4. Mecanismo ângulo de ataque	53
5.5. Montagem e calibração	56
5.5.1. Ensaio em túnel de vento	59
6. Conclusão	63

7. Referências	65
Declaração de Integridade	69
Anexo A	71
Anexo B	74
Apêndice A	85

Lista de figuras

Figura 1 – Modelos aerodinâmicos. (a) MAV (Lv et al., 2013). (b) DLR F-19 (Cummings & Schütte, 2014).	2
Figura 2 – Túnel de vento de circuito aberto. Adaptado de (TecQuipment, 2020) e de (Limited, 2024).	6
Figura 3 – Túnel de vento de circuito fechado. Adaptado de (de Almeida et al., 2018).	7
Figura 4 – Sistema de eixos. (a) Referencial norte americano. (b) Referencial europeu. (Hufnagel, 2022).	9
Figura 5 – Esquema de uma balança para túnel de vento (Barlow et al., 1999).	9
Figura 6 – Balanças internas. (a) Box balance, adaptado de (Pieterse, 2010). (b) Balança cilíndrica, adaptado de (Burns et al., 2020).	11
Figura 7 – Balanças internas. (a) Para corpos rotativos. (b) Para mísseis. (Hufnagel, 2022).	11
Figura 8 – Balança por fios, adaptado de (Hufnagel, 2022).	12
Figura 9 – Balança exterior. (a) Coaxial. (b) Plataforma. (c) Yoke. (d) Pirâmide. (Hufnagel, 2022).	14
Figura 10 – Balança de parede, adaptado de (Hufnagel, 2022).	14
Figura 11 – Esquema célula de carga, adaptado de (Tomin et al., 2020).	17
Figura 12 – Balança de Tavakolpour-Saleh e Sadeghzadeh. (a) Posição dos extensômetros. (b) Pontes de Wheatstone, adaptado de (Tavakolpour-Saleh et al., 2016).	19
Figura 13 – Esquema da ponte de Wheatstone. Adaptado de (Burns et al., 2020).	20
Figura 14 – Esquema de um perfil alar, adaptado de (Maltauro et al., 2025).	23
Figura 15 – Balança de três eixos. (a) Esquema do mecanismo do ângulo de ataque. (b) Posição das células de carga, adaptado de (Tomin et al., 2020).	24
Figura 16 – Balança de dois eixos. (a) Posição das células de carga. (b) Interface digital, adaptado de (Jeffery, 2016).	24
Figura 17 – Esquema do perfil NACA 4412, adaptado de (Agarwal et al., 2024).	28
Figura 18 – Gráficos polares do perfil NACA 4412. (a) CL em função de α . (b) CD em função de α . (c) CM em função de α	31
Figura 19 – Primeira proposta para o desenho da balança.	39
Figura 20 – Diagrama de corpo livre para o centro de pressão.	40
Figura 21 – Segunda proposta para o desenho da balança.	41
Figura 22 – Esquema da proposta para a medição do momento de cabragem.	42
Figura 23 – Quadro elétrico. (a) Modelação em CAD. (b) Componente construído.	47
Figura 24 – Esquema do circuito elétrico da balança.	48
Figura 25 – Circuito elétrico. (a) Disjuntor. (b) Interfaces.	49
Figura 26 – Cantoneira. (a) Modelação em CAD. (b) Fixação das células de carga.	50
Figura 27 – Base da balança. (a) Modelação em CAD. (b) Construção.	51
Figura 28 – Tabuleiro superior. (a) Modelação em CAD. (b) Montagem na balança.	51
Figura 29 – Ensaio a um modelo de automóvel considerando o efeito solo.	52
Figura 30 – Fixação dos modelos para ensaio. (a) Modelo de automóvel sem considerar o efeito solo. (b) Perfil NACA 4412.	52
Figura 31 – Esticador.	53

Figura 32 – Conversor de momento. (a) Modelação. (b) Distância “a”.	54
Figura 33 – Componentes para o mecanismo. (a) Cantoneira com rasgos. (b) Conector.	54
Figura 34 – Estruturas para ensaios a asas e perfis aerodinâmicos. (a) Mecanismo para medir momento de cabragem e alterar o ângulo de ataque. (b) Apoio do veio.	55
Figura 35 – Projeção da distância “a”.	56
Figura 36 – Processo de calibração. (a) Massas calibradas. (b) Calibração da célula.	57
Figura 37 – Preparação da balança. (a) Para ensaio a um modelo de automóvel. (b) Para ensaio a perfis de asas.	58
Figura 38 – Botões para configuração da interface digital (círculos laranja e verde) e zona de indicação da unidade (retângulo azul).	59
Figura 39 – Perfil de asa utilizado nos ensaios	60
Figura 40 – Ensaio em túnel de vento.	61

Lista de tabelas

Tabela 1 - Caraterísticas do perfil NACA 4412	32
Tabela 2 - Forças e momento	33
Tabela 3 - Caraterísticas principais das células de carga.....	36
Tabela 4 - Registos dos ensaios experimentais	62

Acrónimos e símbolos

Lista de acrónimos

2D	Bidimensional
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
FBG	<i>Fibre Bragg Gratings</i>
ISAE	<i>Institut Supérieur de L'aéronautique et de L'espace</i>
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
MEF	Método de Elementos Finitos
MAV	<i>Micro air vehicle</i>
3D	Tridimensional

Lista de símbolos

α	Ângulo de ataque	°
A_S	Área da secção de estudo	m^2
A_w	Área frontal do modelo	m^2
S	Área planificada da asa	m^2
C	Capacidade da célula de carga	kgf
CP	Centro de pressão	-
C_D	Coeficiente de arrasto	-
C_M	Coeficiente de momento	-
ν	Coeficiente de <i>Poisson</i>	-
C_L	Coeficiente de sustentação	-
c	Corda	m
ε	Deformação	-
a	Distância	m
X	Eixo horizontal	-
Y	Eixo transversal	-
Z	Eixo vertical	-
b	Envergadura	m
ER	Erro de repetibilidade	%
G_F	Fator de sonda	-
D	Força de arrasto aerodinâmico	N
L	Força de sustentação	N

F	Força resultante	N
ρ	Massa volúmica	kg/m^3
E	Módulo de elasticidade	GPa
M	Momento	Nm
M_y	Momento de cabragem	Nm
M_z	Momento de guinada	Nm
M_x	Momento de rolamento	Nm
Re	Número de <i>Reynolds</i>	-
BR	Razão de bloqueio	-
R_i	Resistência elétrica	Ω
Res	Resolução	-
σ	Tensão de excitação	V
V_i	Tensão elétrica (entrada)	V
V_o	Tensão elétrica (saída)	V
u	Velocidade do fluido	m/s
μ	Viscosidade dinâmica	m^2/s

1. Introdução

As balanças são utilizadas desde os primórdios da civilização, os egípcios conceberam-nas para realizar trocar comerciais de bens, quantificar riquezas e gerir a agricultura. Atualmente, estas ferramentas são empregues em praticamente todas as áreas, resultado dos avanços tecnológicos e científicos, servindo não só como mecanismo para medir forças, mas também um símbolo de justiça em várias culturas.

Nesta dissertação, será abordado o estudo e desenvolvimento de balanças de precisão instaladas em túneis de vento. Instrumentos de altíssima sensibilidade, concebidos com o propósito de medir forças aerodinâmicas permitindo a caracterização de parâmetros de corpos aerodinâmicos e conduzindo a otimizações estruturais e funcionais.

1.1. Contextualização

Com o progresso das indústrias aeroespacial e automóvel, os túneis de vento ganharam notoriedade entre os engenheiros e investigadores, sendo capazes de simular a interação entre o escoamento do ar e um corpo. Apesar da existência de túneis de vento capazes de realizar ensaios em modelos à escala real, a sua aplicação mais comum incide sobre modelos à escala reduzida, particularmente em meio académico. Contudo, a necessidade de obter dados quantitativos precisos sobre o desempenho aerodinâmico dos corpos levou ao desenvolvimento de balanças especializadas para túneis de vento. Estas começaram como mecanismos rudimentares baseados em equilíbrio de massas, evoluindo para os atuais sistemas de balanças de precisão.

A dinâmica dos fluidos computacional, ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*), é uma área da engenharia que utiliza métodos numéricos para analisar problemas relacionados com o escoamento de fluidos. Através de programas especializados é possível simular o comportamento de líquidos e gases em diferentes condições, permitindo uma análise detalhada sem a necessidade de ensaios físicos em túneis de vento.

As balanças de precisão medem, de forma direta, as forças aerodinâmicas resultantes da interação entre o fluido e o modelo em estudo. Estes dados são comparados com previsões analíticas ou computacionais, garantindo a correlação entre os dados previstos e os dados obtidos experimentalmente.

De facto, ensaios experimentais em túneis de vento são amplamente conduzidos em várias áreas quer seja para testar o comportamento de asas, por exemplo, ou prever como um edifício irá reagir sob a ação do vento. Esta necessidade é explicada baseada no facto que métodos

teóricos e computacionais podem não ser suficientes para avaliar convenientemente geometrias muito complexas ou com elevado nível de detalhes ou por falta de poder computacional. Uma análise aerodinâmica rigorosa necessita de ensaios em túneis de vento para colmatar ou complementar os estudos teóricos e numéricos.

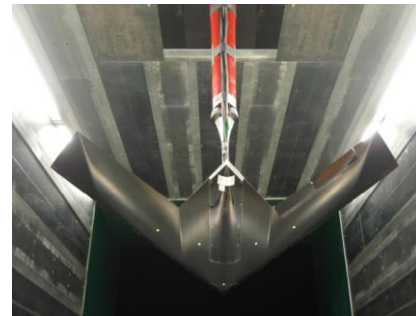
Na área da engenharia aeronáutica, os túneis de vento são elementos essenciais quando se projeta uma nova aeronave permitindo obter de forma experimental informação acerca dos parâmetros aerodinâmicos, coeficiente de sustentação, C_L , coeficiente de arrasto, C_D , momento de cabragem (*pitch*) de rolamento (*rolling*) e de guinada (*yaw*), permitindo assim otimizar parâmetros como o consumo de combustível, velocidade máxima, manobrabilidade, entre outros.

A título de exemplo, a Figura 1 (a), representa um ensaio experimental de um micro veículo aéreo, MAV (*micro air vehicle*) de corpo inclinado desenvolvido em *Toulouse*, França, no *Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace* (ISAE). Segundo Lv et al. (2013) este veículo tem a particularidade de conseguir voar na longitudinal e de conseguir pairar como um helicóptero.

Por sua vez a Figura 1 (b) representa um modelo à escala de um DLR F-19 a ser testado no túnel de vento de baixa velocidade em *Braunschweig*, Alemanha, com o objetivo de perceber a influência de superfícies de controlo no bordo de fuga da asa e comparar os resultados experimentais com a análise efetuada em CFD (Cummings & Schütte, 2014).



(a)



(b)

Figura 1 – Modelos aerodinâmicos. (a) MAV (Lv et al., 2013). (b) DLR F-19 (Cummings & Schütte, 2014).

Na área da engenharia automóvel, os túneis de vento e respetivas balanças são utilizados para prever o comportamento de um modelo de automóvel com o fluxo de ar circundante, quantificando as forças aerodinâmicas que atuam no veículo e procedendo a otimizações que visem reduzir o arrasto aerodinâmico, melhorar consumos de combustível, entre outras.

Os túneis de vento podem também ser utilizados para estudar a velocidade e turbulência do ar em terrenos complexos como demonstrado por Mattuella et al. (2016) onde, com o auxílio de impressão 3D, uma parte do terreno onde se pretender instalar geradores eólicos foi construída e analisada determinando qual a melhor localização para colocar os geradores.

1.2. Motivação

O constante avanço tecnológico nas áreas da engenharia automóvel e da engenharia aeronáutica tem impulsionado o uso de túneis de vento como ferramentas essenciais para o estudo e otimização do comportamento aerodinâmico de diferentes corpos e estruturas. No entanto, apesar da relevância destes mecanismos, a inexistência de uma balança de precisão nas instalações do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), constitui uma lacuna significativa que limita a realização de ensaios experimentais e compromete o desenvolvimento de investigação nesta área.

Esta necessidade motivou o desenvolvimento de um mecanismo capaz de medir, com elevada precisão, as forças aerodinâmicas atuantes sobre diferentes corpos, permitindo a validação experimental de modelos previamente analisados através de métodos analíticos e numéricos.

Adicionalmente, o projeto representa uma oportunidade de aplicar conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico, através do desenho, construção e calibração de um sistema complexo de medição.

1.3. Objetivos

O propósito desta dissertação é o projeto de uma balança de três eixos, compatível com o túnel de vento que será construído no ISEP.

O mecanismo deverá garantir resolução e capacidade suficientes para medir forças num amplo espetro, permitindo a realização de ensaios precisos com diferentes corpos aerodinâmicos. Adicionalmente, privilegiou-se o desenvolvimento de uma solução de baixo custo, adequada à aplicação didática em ambiente académico. Neste contexto, foi concebida uma solução baseada numa balança exterior de plataforma, tendo sido elaborados os desenhos técnicos necessários à sua construção.

Entre os objetivos do projeto, destaca-se ainda a manufatura dos componentes, a montagem do sistema e a subsequente calibração da balança, preferencialmente complementada com ensaios experimentais em túnel de vento, de forma a validar o desempenho do mecanismo em condições reais de funcionamento.

1.4. Organização do documento

Esta dissertação reparte-se em seis capítulos com cada um deles abordando tópicos específicos para o correto desenvolvimento de uma balança de precisão de três eixos começando pelo Capítulo 1 Introdução que visa a explicação do tema que será abordado, a motivação que culminou na escolha deste tópico e nos objetivos que se pretende cumprir com a dissertação.

O Capítulo 2 Revisão bibliográfica, reúne todos os fundamentos teóricos associados ao projeto de uma balança, começa por uma curta análise aos diferentes túneis de vento que são normalmente utilizados, avançando para a exposição dos diferentes tipos de balanças atuais e como estas conseguem medir forças. Em seguida são exploradas as diferentes famílias de balanças dentro do contexto do túnel de vento, balanças interiores e balanças exteriores, assim como as características que estes mecanismos deverão possuir no que diz respeito a capacidade e resolução.

No Capítulo 2 ainda são analisadas as células de carga e as suas soluções construtivas, abordando ainda perfis alares, formas geométricas especialmente desenvolvidas para retirar partido da interação do fluxo de ar com a sua superfície. Este capítulo finaliza com uma análise a projetos desenvolvidos, dentro desta temática, por outros autores.

O capítulo 3 Dimensionamento da balança, visa estudar a grandeza das forças que serão geradas durante os ensaios experimentais definindo condições importantes como o tamanho da secção de estudo do túnel de vento, a velocidade do escoamento e as dimensões dos modelos que serão ensaiados. Este capítulo encerra com a explicação teórica de como é possível decompor momento em força e quais as células de carga que serão utilizadas na balança.

Tendo em vista a construção do mecanismo, no capítulo 4 Projeto da balança, é exposto um possível desenho para uma balança de três eixos e justificado se este seria adequado para o projeto em desenvolvimento, culminando num segundo desenho que foi otimizado e construído.

No capítulo 5 Processo construtivo, os diversos componentes que fazem parte da balança são analisados, assim como a construção dos mesmos e a conceção de um mecanismo que permita alterar o ângulo de ataque de asas. Este mecanismo consegue também medir o momento de cabragem. O capítulo finaliza com o processo de calibração da balança explicando como preparar o mecanismo para iniciar um novo estudo, além de mencionar brevemente a condução de alguns ensaios em túnel de vento.

Por fim, o capítulo 6 Conclusão reflete sobre os objetivos que foram atingidos e refere algumas condicionantes que afetaram este projeto, além de referir possíveis trabalhos futuros tendo em vista a melhoria do sistema atual.

2. Revisão bibliográfica

Este capítulo aborda todos os fundamentos teóricos que sustentam o projeto da balança para utilização em túnel de vento. Inicialmente, é analisado o ambiente em que a balança irá operar, com uma introdução aos diferentes tipos de túneis de vento existentes.

Segue-se uma análise detalhada das balanças utilizadas em túnel de vento, explorando os diversos formatos e objetivos que cada balança procura atingir. São também abordados os tipos de sensores normalmente integrados nestes sistemas, com especial atenção aos princípios de funcionamento das células de carga.

Adicionalmente, são discutidos os métodos de aquisição e tratamento de dados provenientes dos sensores, incluindo técnicas de filtragem e análise de sinal, essenciais para garantir a precisão e fiabilidade nas medições.

É ainda apresentada uma introdução aos perfis alares, frequentemente utilizados como corpos de ensaio em túneis de vento, dada a sua geometria especialmente concebida para tirar proveito da interação com o fluxo de ar.

O capítulo encerra com uma breve revisão de projetos desenvolvidos por outros investigadores no domínio das balanças de precisão.

2.1. Túneis de vento

Um túnel de vento é uma estrutura usada para simular o escoamento de um fluido, geralmente ar, sobre um corpo, permitindo o estudo dos efeitos aerodinâmicos associados à sua interação com o escoamento. Estas estruturas foram originalmente desenvolvidas para investigação em aerodinâmica, com o objetivo de testar e caracterizar perfis aerodinâmicos, bem como otimizar a interação entre corpos com o fluxo de fluido envolvente (Chanetz, 2017).

Atualmente, diversas outras áreas beneficiam da sua aplicação, desde o estudo do impacto do vento sobre estruturas urbanas até à indústria automóvel, onde se analisam, por exemplo, a influência de asas e outros apêndices aerodinâmicos nos veículos (Chanetz, 2017).

Os túneis de vento podem ser classificados, de forma geral, em dois tipos principais: circuito aberto e circuito fechado. Além disso, a zona de ensaio pode apresentar uma secção de teste aberta ou fechada (Chanetz, 2017).

2.1.1. Circuito aberto

Num túnel de vento de circuito aberto, Figura 2, existem essencialmente três secções relevantes por onde o fluxo de ar segue um trajeto linear. A contração, a zona de entrada do fluxo do ar, seguida da secção de teste, onde se posiciona o modelo em análise, e por fim o difusor, zona correspondente à exaustão do fluido (Chanetz, 2017).

Segundo Chanetz (2017), os túneis podem ainda ser divididos em dois grupos dependendo da zona onde está montado o ventilador. Quando este se encontra na zona do difusor, o ventilador suga o ar envolvente gerando assim um fluxo contínuo e com menos turbulência. Por sua vez, quando o ventilador se encontra na entrada do túnel, este tem a função de soprar o ar o que obriga à posterior instalação de redes e favos de abelha para tentar diminuir os vórtices, turbulência.

A principal vantagem deste tipo de túnel reside na possibilidade de utilizar gases ou fumos por tempo prolongado para visualização do escoamento, sem restrições relevantes quanto à sua acumulação no circuito (Barlow et al., 1999).

No entanto, o facto de a entrada de ar estar exposta ao meio circundante representa uma limitação significativa dificultando o controlo preciso das condições do ensaio, tais como pressão, temperatura e humidade do ar. Adicionalmente, este tipo de túnel tende a ser ruidoso e exige elevados consumos energéticos para manter a velocidade do fluido constante (Barlow et al., 1999).

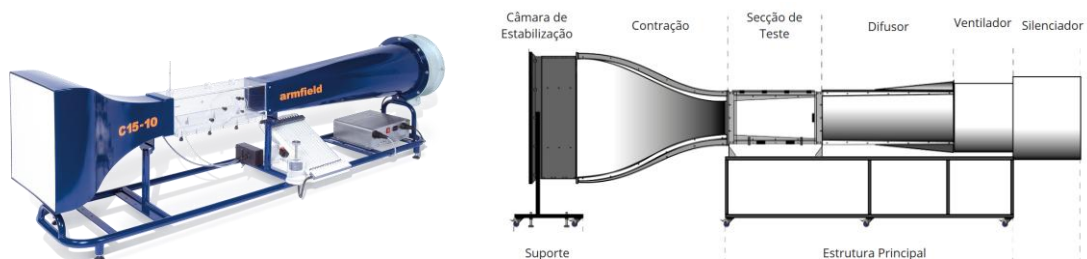


Figura 2 – Túnel de vento de circuito aberto. Adaptado de (TecQuipment, 2020) e de (Limited, 2024).

2.1.2. Circuito fechado

Por sua vez, um túnel de vento em circuito fechado, centra-se num conceito que minimiza as trocas de matéria e energia com o exterior, permitindo, assim, manter constantes as condições do ensaio durante toda a sua extensão (Calautit et al., 2014).

Este tipo de túnel é composto por diversas secções interligadas, como representado na Figura 3, permitindo a recirculação contínua do fluido. À semelhança do túnel de circuito aberto, a secção de teste é a zona onde se poderá instalar o modelo em estudo. Após esta secção, o fluxo atravessa um primeiro difusor, cuja função principal é proporcionar uma variação de pressão

favorável ao desempenho do ventilador, que é o responsável por impulsionar o escoamento do fluido (Chanetz, 2017).

Devido à elevada turbulência gerada à saída do ventilador, o ar é conduzido a uma câmara de estabilização, onde são instaladas redes de malha fina e estruturas semelhantes a favos de mel, destinadas à redução de vórtices e à homogeneização do escoamento (Barlow et al., 1999). Em seguida, o fluxo é acelerado na zona da contração antes de voltar à secção de teste (Cattafesta et al., 2010).

A utilização de fumo para visualização do escoamento é possível, mas limitada. Quando utilizado em grandes quantidades, o fumo pode formar uma nuvem densa e homogênea, dificultando ou mesmo impedindo a observação do escoamento de ar em redor do corpo de ensaio. Nestes casos, é necessário dotar o túnel de um sistema de purga eficaz, assim como de um sistema de refrigeração, especialmente em ensaios de longa duração, uma vez que o aumento da temperatura altera as propriedades do ar (Cattafesta et al., 2010).

Normalmente o custo de produção de um túnel em circuito fechado é significativamente superior aos dos túneis de circuito aberto, devido à presença de elementos adicionais como curvas, dutos de retorno e sensores de temperatura e pressão posicionados ao longo do circuito para manter o ensaio estável e controlado (Barlow et al., 1999).

Independentemente da tipologia de túnel utilizada, é essencial o desenvolvimento de um mecanismo de medição capaz de registar as forças exercidas pelo escoamento sobre o modelo a ser ensaiado. Para este fim, é indispensável a utilização de uma balança que permita medir, pelo menos, duas componentes de força e um momento. Esta exigência é particularmente relevante em ensaios que envolvam asas ou aeronaves.

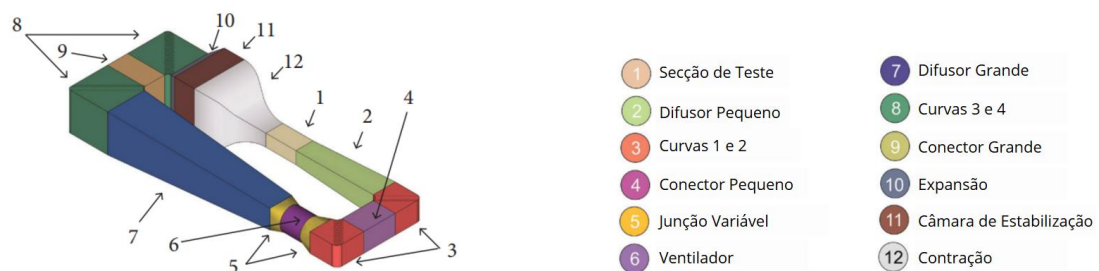


Figura 3 – Túnel de vento de circuito fechado. Adaptado de (de Almeida et al., 2018).

2.2. Medição de forças

O principal objetivo da medição das forças que um corpo desenvolve quando interage com um fluido é a previsão do seu comportamento aerodinâmico, bem como a caracterização dos respetivos parâmetros para posterior otimização.

Existem quatro abordagens principais para a medição dessas forças em túneis de vento. Uma das mais comuns consiste na medição da pressão em múltiplos pontos da superfície do modelo, utilizando transdutores de pressão. Esta técnica permite gerar um mapa detalhado das pressões ao longo do corpo em estudo (Etkin & Duff Reid, 1995).

Uma segunda abordagem consiste na monitorização da pressão ao longo das paredes da secção de teste do túnel, sem interferir diretamente com o modelo. Esta metodologia permite medir as forças globais exercidas pelo fluxo sobre o objeto de forma indireta e menos intrusiva (Society of Automotive Engineers, 1994).

Em alternativa, é possível recorrer a métodos analíticos, baseando-se nas equações do movimento e nos deslocamentos registados do corpo, para obter as forças aerodinâmicas atuantes (Douglas L & William F, 1995), (Barlow et al., 1999). Apesar da complexidade, este método apresenta como vantagem a total eliminação de interferências introduzidas por estruturas de suporte.

A abordagem mais direta e amplamente utilizada consiste na utilização de células de carga para medir, de forma instantânea, as forças aplicadas ao modelo (American National Standards Institute, 1992). Este método apresenta simplicidade na conceção e elevada fiabilidade, exigindo apenas um sistema de aquisição e processamento de dados para registar os valores medidos.

Independentemente do método adotado, é possível medir até seis componentes de força durante um ensaio: as três forças segundo os eixos coordenados (longitudinal, lateral e vertical) e os três momentos correspondentes (rolamento, cabragem e guinada) (Hufnagel, 2022).

No contexto da medição de forças aerodinâmicas, distinguem-se dois sistemas de referência: o sistema fixo ao túnel, alinhado com a direção do escoamento, e o sistema fixo ao próprio corpo em estudo (Hufnagel, 2022). É importante notar que o sistema de referência adotado influencia diretamente a interpretação dos sinais de momento. O sistema norte-americano Figura 4 (a), define o momento de cabragem positivo no sentido horário e os momentos de guinada e rolamento como positivos no sentido anti-horário, o que pode introduzir ambiguidade e aumentar o risco de erros na análise. Em contraste, o sistema europeu Figura 4 (b), segue a regra da mão direita, sendo mais intuitivo e consistente com a convenção internacional da mecânica clássica.

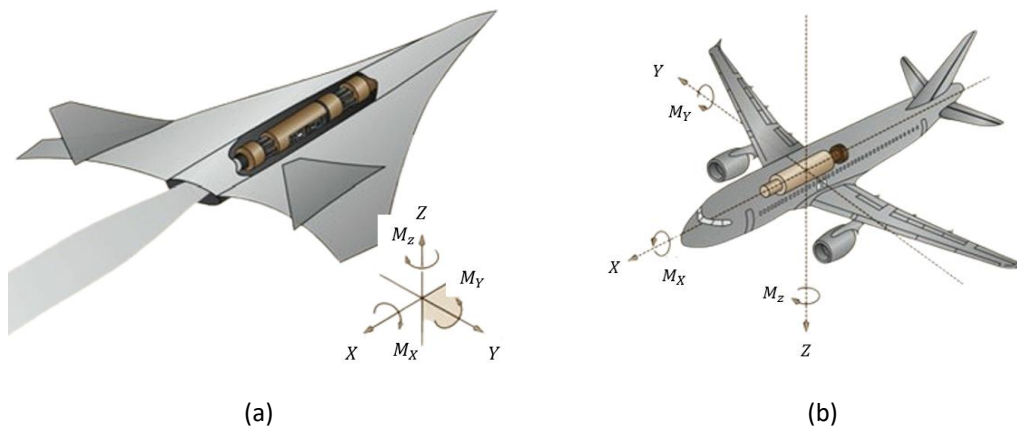


Figura 4 – Sistema de eixos. (a) Referencial norte americano. (b) Referencial europeu. (Hufnagel, 2022).

Na Figura 5, o somatório das forças medidas nos pontos A e B corresponde à força de arrasto aerodinâmico. De forma análoga, a força de sustentação é obtida pela soma das forças registradas em C, D e E, enquanto a força lateral é diretamente medida no ponto F.

Os momentos são derivados das forças e respectivas distâncias ao centro de referência do modelo. O momento de guinada é calculado a partir das forças em A e B, tendo como braço a distância b , representando a rotação do corpo em torno do seu eixo vertical. O momento de rolamento resulta da diferença entre as forças em C e D, também com o braço b , refletindo a rotação em torno do eixo longitudinal. Por fim, o momento de cabragem é determinado pela força registrada em E, com o braço c , e descreve a rotação em torno do eixo transversal do modelo (Barlow et al., 1999).

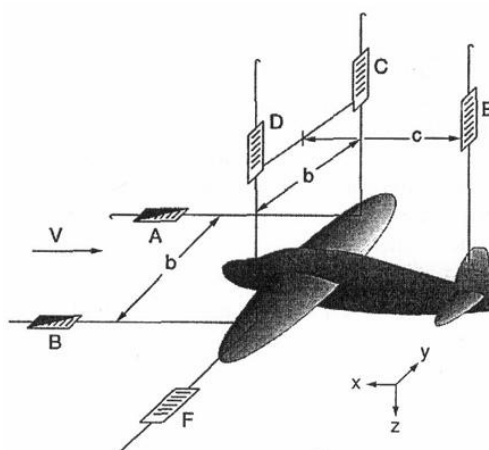


Figura 5 – Esquema de uma balança para túnel de vento (Barlow et al., 1999).

2.3. Balanças interiores

A designação balança interior aplica-se a todos os dispositivos de medição de forças instalados no interior dos corpos em estudo, sendo, por isso, limitados a mecanismos extremamente compactos. Estas balanças operam de acordo com um sistema de coordenadas fixo ao próprio modelo e são, portanto, dependentes da sua geometria e escala (Hufnagel, 2022).

As balanças interiores dividem-se geralmente em dois tipos principais: balanças monolíticas, construídas a partir de um único bloco com zonas estruturalmente otimizadas para deformação localizada, e balanças de múltiplos componentes, que utilizam elementos separados com extensómetros dispostos em direções específicas para medir as componentes de força desejadas (Hufnagel, 2022).

No que respeita à geometria, distinguem-se duas configurações predominantes, a box balance, Figura 6 (a), onde todos os sensores e mecanismos são integrados numa estrutura paralelepípedica, e a balança cilíndrica onde os sensores se distribuem ao longo do eixo longitudinal da estrutura (Hufnagel, 2022).

As balanças cilíndricas subdividem-se de acordo com o tipo de esforço que são projetadas para medir. Algumas são destinadas à medição de forças longitudinais e transversais, utilizando extensómetros configurados para leitura em tração ou compressão; outras são desenhadas especificamente para medição de momentos. Este tipo de balança é particularmente útil em ensaios de aeronaves com propulsão traseira, como aviões de combate, onde pode ser montada no local reservado ao motor, minimizando a perturbação do escoamento de ar e mantendo a fidelidade geométrica do modelo (Hufnagel, 2022).

Já as box balance são geralmente compostas por dois tabuleiros sobrepostos conectados por hastes muito finas. Estas hastes contêm zonas otimizadas para deformação sob uma força orientada, onde se instalam os extensómetros (Hufnagel, 2022). Para aplicações mais específicas, como a medição do empuxo gerado por uma hélice rotativa, são utilizadas balanças instaladas em componentes rotativos, como ilustrado na Figura 7 (a).

No campo da balística, especialmente no estudo de foguetes e mísseis, existem balanças específicas concebidas para medir forças durante eventos dinâmicos, como a separação de estágios ou o lançamento de mísseis a partir da asa de uma aeronave Figura 7 (b) (Hufnagel, 2022).

Finalmente, com intuito de eliminar completamente interferências com o escoamento de ar, foi desenvolvida a balança de suspensão magnética. Este sistema sustenta o modelo em levitação através de campos eletromagnéticos, dispensando suportes físicos. A medição das forças é realizada com base na variação dos campos magnéticos. No entanto, apesar do seu potencial, este tipo de balança permanece confinado ao âmbito académico e experimental, sem aplicação comercial significativa até à data (Hufnagel, 2022).

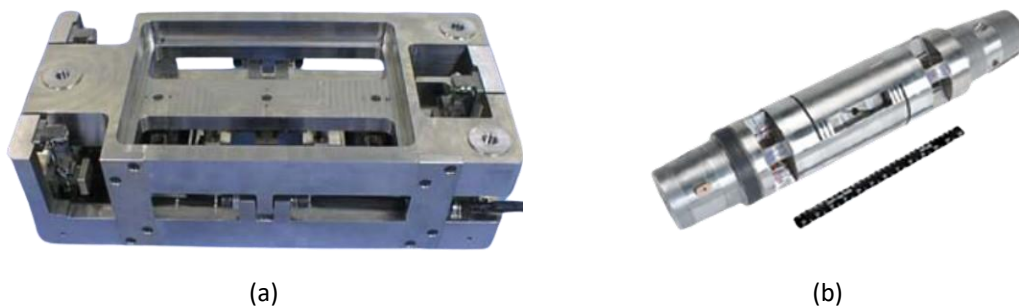


Figura 6 – Balanças internas. (a) Box balance, adaptado de (Pieterse, 2010). (b) Balança cilíndrica, adaptado de (Burns et al., 2020).

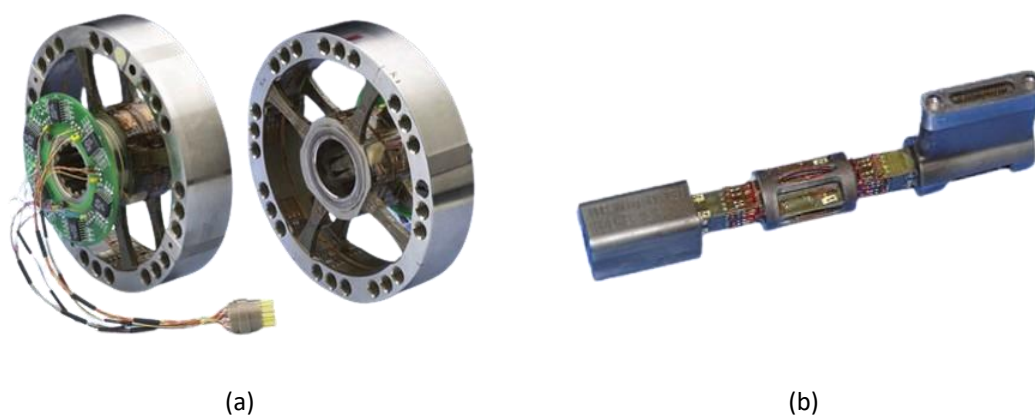


Figura 7 – Balanças internas. (a) Para corpos rotativos. (b) Para mísseis. (Hufnagel, 2022).

2.4. Balanças exteriores

As balanças exteriores, como o próprio nome indica, estão localizadas fora da câmara de ensaio do túnel de vento. Estas balanças ligam-se ao modelo em estudo através de hastes, o que implica que todos os sensores e o sistema de aquisição de dados se encontrem na periferia da área de teste, minimizando significativamente a interferência com o escoamento interno (Barlow et al., 1999).

Apesar de todos os mecanismos se encontrarem fora da área de ensaio, a haste de ligação ao modelo representa uma inevitável fonte de perturbação aerodinâmica. No entanto, este efeito pode ser mitigado através da utilização de perfis aerodinâmicos para revestir a haste, reduzindo assim o impacto sobre o campo de escoamento (Barlow et al., 1999).

Uma das vantagens mais relevantes desta tipologia prende-se com a simplicidade no processo de calibração. O acesso facilitado aos sensores permite uma calibração precisa e repetível, mantendo-se estável ao longo de múltiplos ensaios. Aliado à sua ampla faixa de medição, este tipo de balança revela-se particularmente adequado para aplicações em que a magnitude das forças aerodinâmicas a medir é incerta ou variável (Barlow et al., 1999).

Existem diversas configurações de balanças exteriores. Um exemplo, representado na Figura 8, é a balança por fios. Devido às limitações mecânicas e ao risco elevado de falha estrutural raramente é aplicada. Neste sistema, o modelo é suspenso por fios finos no interior da câmara de ensaio, o que implica vulnerabilidade a ruturas que podem comprometer tanto o ensaio como a integridade do modelo. Para garantir que as forças atuantes sobre os fios se mantenham sempre em tração, o corpo é frequentemente montado de forma invertida (Barlow et al., 1999), (Hufnagel, 2022).

A metodologia de medição neste tipo de balança baseia-se num sistema análogo às balanças comerciais tradicionais, onde massas calibradas são deslocadas ao longo de uma haste até o sistema atingir o equilíbrio. A partir da posição estabilizada da agulha numa escala calibrada, mede-se o valor da força gerada pelo modelo (Hufnagel, 2022). Este processo, embora funcional, é bastante rudimentar e exige um procedimento de calibração complexo.

Atualmente, o tipo de balança exterior mais amplamente utilizado é a balança de plataforma, representada na Figura 9 (b). Este sistema consiste numa plataforma sobre a qual o modelo é fixo. A plataforma, por sua vez, está conectada a um conjunto de sensores, geralmente células de carga, responsáveis por registar as forças aerodinâmicas exercidas sobre o modelo durante o ensaio (Barlow et al., 1999).

A principal vantagem deste tipo de balança reside na sua versatilidade e adaptabilidade a diferentes configurações geométricas. Permite a realização de ensaios tanto com modelos que mantêm contacto com o solo, como veículos terrestres, como com modelos suspensos, tais como asas de aeronaves (Barlow et al., 1999).

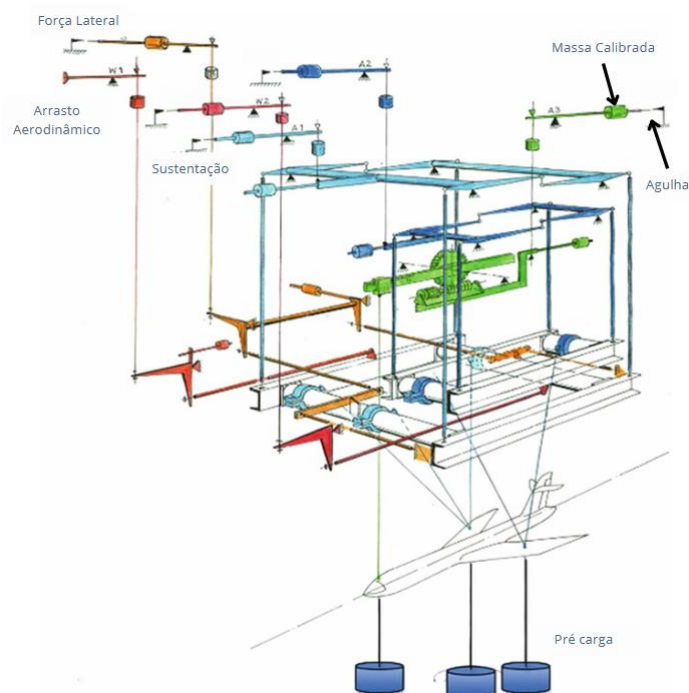


Figura 8 – Balança por fios, adaptado de (Hufnagel, 2022).

Apesar das suas vantagens, as balanças de plataforma apresentam uma limitação significativa. Dado que as forças e momentos medidos resultam da combinação de vários sensores, existe uma suscetibilidade elevada à interferência de forças parasitas ou deformações não intencionais. Pequenos desalinhamentos ou cargas laterais podem gerar medições incorretas nos extensómetros, comprometendo a precisão dos resultados ((Barlow et al., 1999) (Hufnagel, 2022)).

Com o objetivo de mitigar este problema, foram desenvolvidas geometrias alternativas e soluções construtivas específicas, tais como a balança Yoke e a balança em pirâmide, representada na Figura 9 (c) e (d), respetivamente (Hufnagel, 2022).

A balança em pirâmide consiste numa estrutura compacta composta por dois tabuleiros sobrepostos conectados por hastes. A deformação destas hastes permite a medição direta das forças aplicadas. Contudo, este tipo de balança exige elevada precisão na construção e alinhamento dos componentes, visto que qualquer inclinação ou descentralização influencia significativamente as leituras, tornando o processo de calibração especialmente sensível ((Barlow et al., 1999) (Hufnagel, 2022)).

A balança Yoke, representada na Figura 9 (c), é uma variação da plataforma convencional, concebida para medir diretamente no centro de gravidade do modelo, eliminando a necessidade de compensações matemáticas pós-ensaio. Esta abordagem, embora teoricamente vantajosa, apresenta uma limitação estrutural importante: a baixa rigidez à flexão associada às longas hastes necessárias compromete a fidelidade dos resultados em ensaios com forças elevadas (Barlow et al., 1999).

Outra solução amplamente utilizada em túneis de vento de grande escala é a balança coaxial, Figura 9 (a), onde todos os sensores e mecanismos de aquisição são integrados numa configuração linear e compacta. Uma haste rígida conecta o modelo ao topo ou ao piso do túnel, alojando internamente os sensores que registam diretamente as forças verticais. As forças transversais e os momentos são obtidos através do processamento combinado das leituras dos sensores internos, recorrendo a algoritmos de pós-tratamento de dados (Hufnagel, 2022).

Na Figura 9, os componentes estruturais de cada balança estão identificados com letras minúsculas, ao passo que os sensores de aquisição de dados são representados por letras maiúsculas, facilitando a leitura e interpretação dos esquemas das diferentes balanças.

Para aplicações altamente especializadas, existem ainda outros dois tipos de balanças exteriores com uso bastante restrito: as balanças de parede, representadas na Figura 10, e as balanças em espiral. As primeiras são integradas diretamente nas paredes do túnel e destinam-se à medição de modelos divididos longitudinalmente, enquanto que as segundas constituem um conceito experimental baseado na medição de forças por torção de hastes e deformação de lâminas, desenvolvido em contexto académico (Hufnagel, 2022).

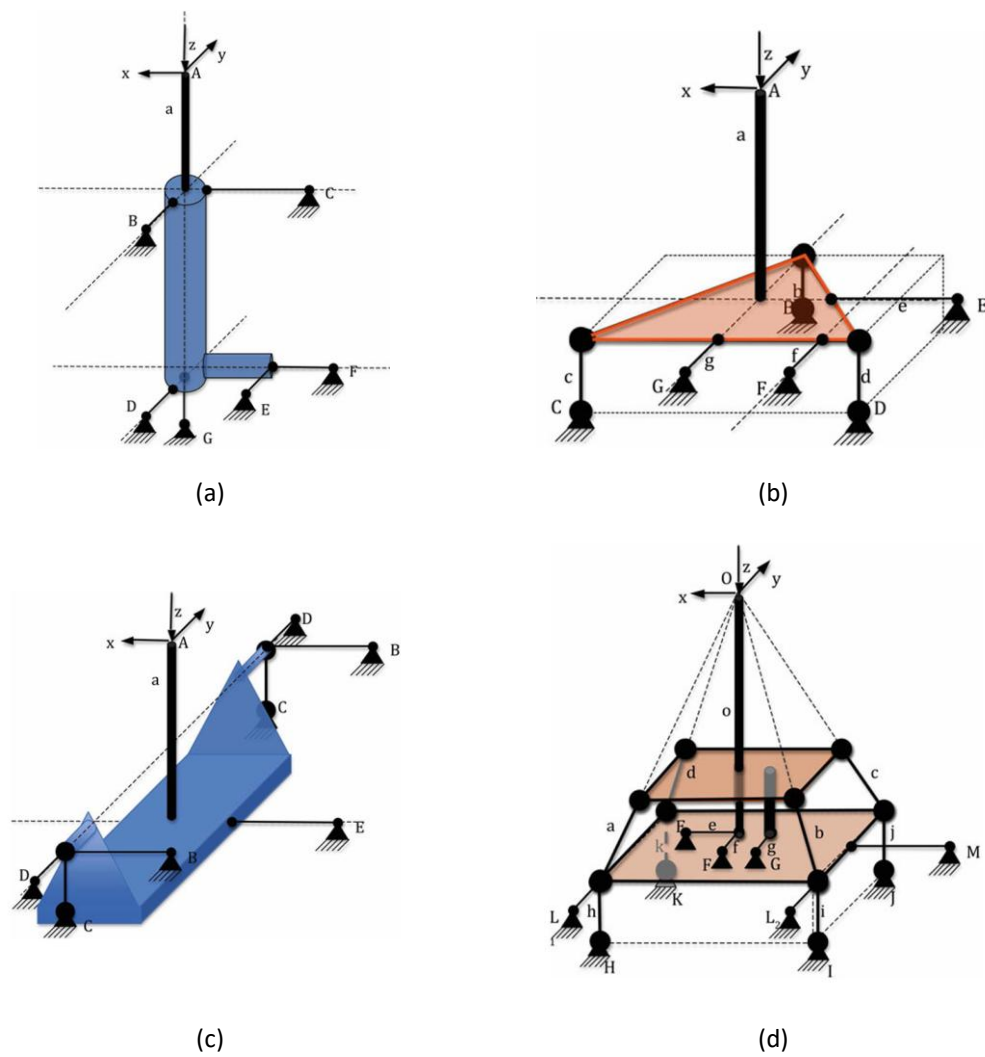
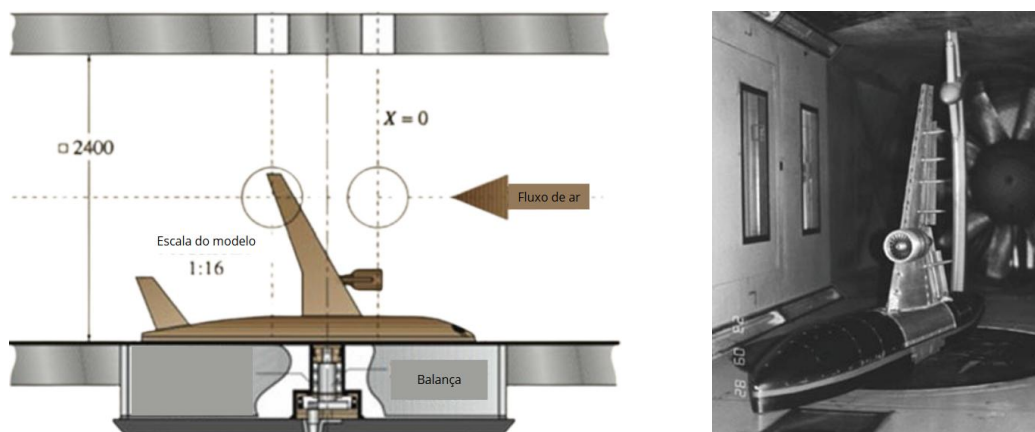


Figura 9 – Balança exterior. (a) Coaxial. (b) Plataforma. (c) Yoke. (d) Pirâmide. (Hufnagel, 2022).



2.5. Especificações da balança

O processo de concepção de uma balança para túnel de vento inicia com a definição dos requisitos operacionais, nomeadamente as dimensões dos modelos a ensaiar, o espaço disponível para instalação da balança no túnel, o intervalo de forças a medir, o número de componentes de força e momento a ser registado e a resolução pretendida para cada medição (Hufnagel, 2022).

Estes requisitos irão determinar a morfologia da balança (interior ou exterior), bem como o seu custo de produção. Em muitos casos, as exigências associadas a diferentes modelos e regimes de ensaio requerem balanças com capacidades e resoluções distintas, implicando o desenvolvimento de múltiplas balanças específicas (Hufnagel, 2022).

Nos túneis de vento de pequena escala é comum o desenvolvimento de uma única balança multifuncional, dado o custo elevado associado à concepção e fabrico de dispositivos de medição de alta precisão. No entanto, este compromisso resulta frequentemente em balanças com elevada capacidade de carga, mas baixa resolução, o que limita a precisão da medição em modelos de pequenas dimensões (Kara & Öztürk, 2024).

As balanças interiores, por estarem alojadas no interior dos modelos, são particularmente condicionadas pelas restrições geométricas. Assim, a sua concepção deve partir das dimensões do modelo e não apenas das capacidades do túnel. A limitação volumétrica impõe desafios significativos ao nível do projeto estrutural e da integração dos sensores (Ewald & Hufnagel, 1997).

A seleção dos materiais é um fator crítico, sobretudo no desenvolvimento de balanças monolíticas, onde o corpo da balança é uma única peça com zonas calibradas para deformação controlada. O material deve apresentar um equilíbrio entre rigidez e estabilidade térmica, permitindo deformação elástica previsível na direção da medição sem comprometer a estabilidade estrutural nas restantes direções (Burns & Parker, 2020).

Os aços endurecidos por precipitação são frequentemente escolhidos por possuírem características semelhantes às molas, com elevado limite elástico, elevada resistência à tração e compressão, boa maquinabilidade e resistência à fadiga (Burns et al., 2020).

2.6. Células de carga

Os extensómetros elétricos são sensores fundamentais para a medição de deformações mecânicas em estruturas ou componentes, essenciais na análise experimental de tensões e na validação de modelos computacionais analisados com MEF. Estes sensores detetam a deformação sofrida por um corpo quando submetido a esforços mecânicos, convertendo tal deformação em sinais elétricos. Os extensómetros destacam-se pela sua precisão, facilidade de aplicação e boa resposta em diferentes condições de ensaio (Zhao et al., 2020).

Além deste tipo de extensómetro, existem outras alternativas para medir deformações como por exemplo, os sensores piezoelétricos. Quando deformados estes materiais alteram a sua resistência elétrica devido ao uso de cristais, que quando sujeitos a uma deformação geram

uma carga elétrica, resultando na polarização do material. Este tipo de sensor permite medir forças estáticas ((Curry et al., 2018) (Yu et al., 2016)) oferecendo vantagens a nível de simplicidade e reduzidos custos de aquisição, sendo fiáveis mecanicamente e resistentes a ruídos eletromagnéticos.

No entanto, este tipo de sensor possui uma característica que limita o seu uso. Quando uma força estática é aplicada, a carga elétrica no sensor começa a diminuir exponencialmente seguindo a condição imposta pela equação (1), o que implica que as medições de forças têm de ser efetuadas num curto espaço de tempo, caso contrário haverá variações nos resultados (K. Kim et al., 2021).

Na equação (1), q representa a carga remanescente no sensor ao fim de um certo tempo, t . A letra Q representa a carga inicial gerada pela deformação, R a resistência interna do circuito e C a capacidade nominal do condensador.

$$q = Q e^{-t/RC} \quad (1)$$

Por este motivo, os sensores piezoelétricos são mais adequados para medições transientes ou oscilatórias, como vibrações e forças instantâneas, e menos indicados para medições de forças estáticas ou quase-estáticas (K. Kim et al., 2021), características dos testes aerodinâmicos convencionais em túnel de vento.

Uma alternativa cada vez mais promissora aos sensores tradicionais são os sensores de rede de *Bragg* em fibra ótica, conhecidos como *fibre Bragg gratings* (FBG). Estes sensores utilizam métodos óticos baseados na reflexão seletiva de comprimentos de onda da luz para medir deformações, variações de temperatura e outras grandezas físicas (Y.-J. Rao, 1997).

As redes de *Bragg* consistem em microestruturas periódicas inscritas no núcleo de uma fibra ótica, que funcionam como filtros de comprimento de onda, refletindo apenas a luz numa faixa específica e transmitindo o restante do espectro. Quando a fibra é submetida a deformações mecânicas ou alterações de temperatura, a distância entre as regiões de índice de refração é alterada, variando assim o comprimento de onda refletido. A medição dessa variação permite inferir com grande precisão a força ou temperatura aplicada (Y.-J. Rao, 1997).

O interesse nos sensores FBG tem crescido exponencialmente nos últimos anos devido a duas razões principais. Primeiramente, o seu papel fundamental nas tecnologias de comunicação por fibra ótica (Mizrahi, 1993), onde são utilizados para gerir sinais multiplexados, amplificar esses sinais ((Ball & Morey, 1992) (Farries et al., 1992)) assim como compensar dispersões ((Ouellette, 1991) (Williams et al., 1994)). O seu enorme potencial como sensores físicos, permitindo medições quase estáticas de força, pressão diferencial, temperatura, aceleração e até campos magnéticos com elevada resolução e estabilidade ((Foote et al., 1996) (Kersey & Marrone, 1994) (Y. J. Rao et al., 1996) (Webb et al., 1996) (Thériault et al., 1997) (Bjerkkan et al., 1996)).

Segundo Tomin et al. (2020), as células de carga, são dispositivos que convertem forças em sinais elétricos por meio de extensómetros organizados numa ponte de *Wheatstone*. Quando uma força é exercida sobre a célula, os extensómetros sofrem deformações mecânicas, o que resulta numa alteração proporcional da sua resistência elétrica. A ponte de *Wheatstone*, quando ligada a um condicionador de sinal permite não só a amplificação do sinal, mas também a compensação de forças indesejadas, como esforços de torção ou flexão, assegurando que apenas a componente de força pretendida seja medida com precisão.

As células de carga podem apresentar diversas geometrias e ter diferentes pontos de amarração. Por exemplo, as células específicas para medir esforços de tração utilizam dois olhais como pontos de amarração. Esta opção, embora seja sensível apenas a uma direção, necessita que os restantes graus de liberdade sejam restritos por mecanismos externos.

Em alternativa, a utilização de células destinadas a medir esforços de tração e de compressão, tal como a representada na Figura 11, oferece a vantagem de restringir todos os graus de liberdade à exceção do sentido de aplicação da força, devido ao facto de uma das extremidades estar encastrada. Os extensómetros estão posicionados em zonas programadas para se deformarem e estão interligados segundo a configuração da ponte de *Wheatstone*, o que confere a característica de ser possível aplicar uma força a qualquer distância do ponto de amarração e ainda assim obter uma leitura confiável sem interferências de momento fletor.

Esta característica permite utilizar a célula de carga como elemento estrutural evitando a utilização de mecanismos, que implicariam o aumento da complexidade do sistema assim como a presença de forças de atrito.

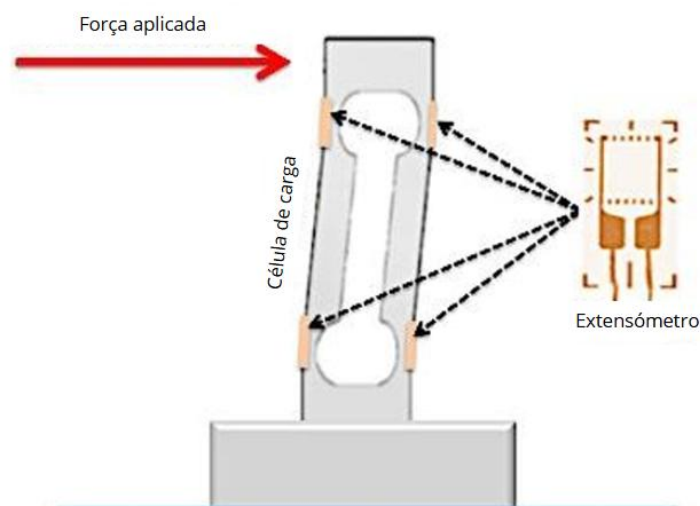


Figura 11 – Esquema célula de carga, adaptado de (Tomin et al., 2020).

Apesar da sua elevada precisão, uma característica das células de carga é a sua capacidade de medir forças apenas numa única direção. Para contornar esta limitação, é comum o uso de múltiplas células de carga integradas num sistema mecânico conhecido como balança de múltiplas peças. Neste tipo de configuração, cada célula é responsável por medir a força numa direção específica. No entanto, a introdução de ligações mecânicas móveis pode provocar atritos que interferem negativamente com a medição, falseando os resultados experimentais (B. F. R. Ewald, 2000).

Com o objetivo de eliminar completamente o atrito e obter medições mais fiáveis, foram desenvolvidas balanças exteriores monolíticas ou balanças de peça única. Estas são fabricadas a partir de um único bloco metálico, cuidadosamente maquinado para permitir deformações em direções específicas, mantendo-se extremamente rígido nas restantes. Ao aplicar extensómetros em zonas estrategicamente selecionadas, denominadas regiões de deformação controlada, é possível medir as forças nas direções pretendidas com elevada resolução e sem interferências mecânicas externas (Burns & Parker, 2023).

O desenvolvimento deste tipo de balança é altamente exigente, tanto a nível de projeto como de validação estrutural, exigindo a aplicação de métodos de elementos finitos (MEF). Estas análises permitem prever com exatidão o comportamento da balança quando sujeita a diferentes forças e momentos, assegurando que as deformações ocorram apenas nas zonas desejadas (Ewald & Hufnagel, 1997).

A balança representada na Figura 12 (a) é um exemplo de uma balança de uma só peça que utiliza três pontes de *Wheatstone* para medir arrasto aerodinâmico, sustentação e momento de cabragem. Na Figura 12 (b), os números representam os diferentes extensómetros colocados de forma estratégica pela balança de forma que a interligação entre os sensores 1, 2, 3 e 4 resulte no momento de cabragem, o conjunto dos extensómetros 5, 9, 10 e 12 represente o arrasto aerodinâmico e a conjugação dos sensores 6, 7, 8 e 11 simboliza a sustentação (Tavakolpour-Saleh et al., 2016).

Na Figura 12 (b), os extensómetros estão organizados de forma a criar uma ponte de *Wheatstone*, uma estratégia geralmente utilizada em diversos equipamentos de medição que consegue filtrar forças e momentos não desejados colocando dois extensómetros à tração e dois à compressão, anulando-se assim os sinais parasitas, evitando a sua transmissão ao condicionador de sinal (Burns et al., 2020).

Quando sujeitos a uma força externa, os extensómetros sofrem uma alteração do seu comprimento, provocando uma variação muito reduzida na resistência elétrica do material. Esta variação resulta num sinal analógico de fraca intensidade. Contudo, a maioria das interfaces eletrónicas e dos sistemas de aquisição de dados apenas opera corretamente com sinais de intensidade superior. Para superar esta limitação, utiliza-se um condicionador de sinal, uma configuração de circuito que permite amplificar eficientemente estas pequenas variações de resistência, convertendo-as em diferenças de potencial elétrico detetáveis (Muller et al., 2010).

A ponte de *Wheatstone*, Figura 13, é amplamente utilizada na instrumentação industrial para medir variações reduzidas de resistência elétrica. Devido à disposição dos extensómetros este

circuito permite medir as pequenas variações na tensão elétrica provocadas pela deformação. Segundo Muller et al. (2010), a partir de alguns cálculos (equação (2)) é possível converter as variações de resistência em variações de tensão elétrica, com a vantagem de reduzir o ruído elétrico normalmente presente em divisores de tensão convencionais, o que melhora significativamente a qualidade do sinal adquirido.

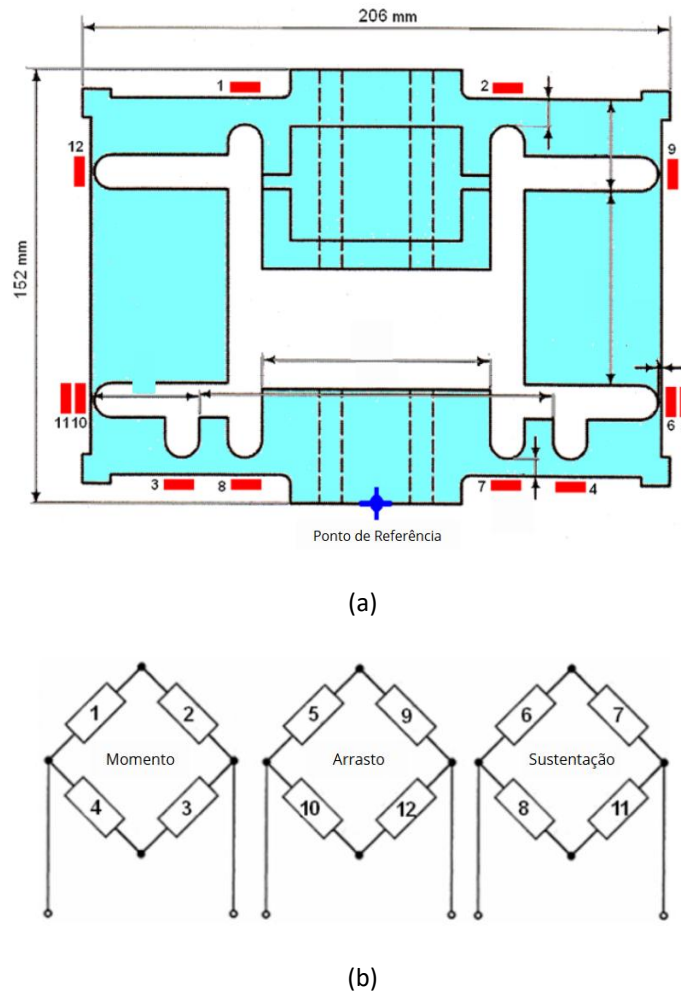


Figura 12 – Balança de Tavakolpour-Saleh e Sadeghzadeh. (a) Posição dos extensômetros. (b) Pontes de *Wheatstone*, adaptado de (Tavakolpour-Saleh et al., 2016).

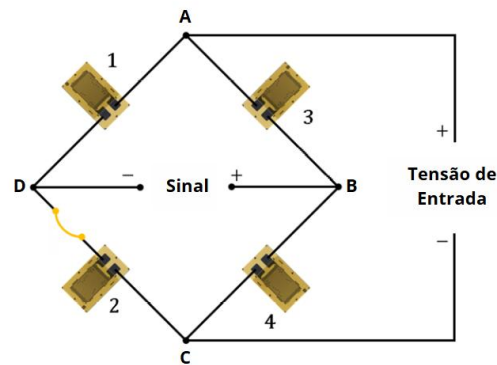


Figura 13 – Esquema da ponte de *Wheatstone*. Adaptado de (Burns et al., 2020).

A utilização de pontes de Wheatstone apresenta como principal limitação a sua sensibilidade a variações de temperatura. Alterações térmicas podem modificar a resistência elétrica dos extensômetros, afetando, a exatidão da medição da deformação.

Ainda assim, a adoção deste tipo de circuito é vantajosa, dado que a sua configuração facilita a medição de sinais de baixa intensidade. O ajuste de zero permite equilibrar a ponte no início de cada ensaio, compensando eventuais deformações residuais. Consequentemente, é possível empregar amplificadores de menor tensão, uma vez que os sinais a amplificar possuem amplitudes reduzidas. Seguindo a denominação apresentada na Figura 13, o sinal de saída da ponte de *Wheatstone* pode ser expresso como uma diferença de potencial elétrico entre os dois pontos centrais da ponte. Esta diferença, que constitui o sinal de saída da célula de carga, é dada pela equação (2), onde V_0 representa a tensão de saída da célula de carga, V_i a tensão de excitação e R_i cada uma das resistências associada a cada extensômetro.

$$V_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_i \quad (2)$$

O fator de sonda, G_F (*gauge factor*), caracteriza a sensibilidade de um extensômetro à deformação aplicada (Tavakolpour-Saleh & Sadeghzadeh, 2014). Este parâmetro é definido como a razão entre a variação relativa da resistência elétrica do extensômetro e a deformação longitudinal aplicada, sendo expresso pela equação (3). Nesta equação, R representa a resistência do sensor e ΔR a variação da resistência quando aplicada uma deformação, ε .

$$G_F = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (3)$$

Segundo Tavakolpour-Saleh & Sadeghzadeh (2014), após determinado G_F , a equação (3) pode ser reescrita com base em deslocamentos, ao invés de variações de resistências obtendo assim a equação (4).

$$\Delta V_0 = 0,25 G_F V_i (\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - \varepsilon_2 - \varepsilon_4) \quad (4)$$

A resolução de uma balança está diretamente relacionada com a sensibilidade dos sensores instalados, nomeadamente os extensómetros. Esta sensibilidade define a eficiência com que o sensor converte um deslocamento mecânico numa variação elétrica mensurável (Tavakolpour-Saleh & Sadeghzadeh, 2014). Um dos parâmetros determinantes nesta conversão é o fator de sonda. Quanto maior este fator, maior será a capacidade do extensómetro em amplificar deformações em sinais elétricos.

Considerando a tensão de excitação aplicada à ponte de *Wheatstone*, σ , e do módulo de elasticidade do material, E , em que o extensómetro está montado, é possível estimar o sinal de saída da célula de carga através da equação (5) (Tavakolpour-Saleh & Sadeghzadeh, 2014).

$$\text{Sinal} = \sigma \left(\frac{G_F}{E} \right) 10^6 \quad (5)$$

É importante ter em consideração que os extensómetros utilizam fios extremamente finos e apresentam sensibilidades elevadas. Por este motivo, durante o processo de calibração da balança, devem ser tidos em conta possíveis erros sistemáticos causados por variações na temperatura ambiente e pela humidade relativa do meio envolvente (Burns et al., 2020).

O sinal proveniente da célula de carga é um sinal analógico de baixa intensidade em forma de tensão. Para que este possa ser tratado por um sistema computacional, é necessário proceder à conversão analógico-digital através de circuitos eletrónicos dedicados. Existem, para esse fim, conversores de sinal especificamente concebidos para operar com células de carga. Contudo, estes equipamentos requerem a inclusão de um filtro de ruído eletromagnético posicionado entre os sensores e o conversor (Wan et al., 2022).

Os campos eletromagnéticos podem ser induzidos por diversos dispositivos eletrónicos ou fios elétricos, podendo afetar a qualidade do sinal medido e comprometer a fidelidade dos dados adquiridos (Barr et al., 2017).

Durante os ensaios em túnel de vento, atuam sobre o modelo diversas forças e momentos que variam em função da velocidade do escoamento do ar e da orientação do corpo. Assim, é essencial dispor de um sistema de aquisição de dados capaz de armazenar, processar e organizar as leituras provenientes dos extensómetros. Alternativamente, em contextos mais simples, poderá ser utilizado um sistema que apresente em tempo real os valores das forças atuantes, ainda que com menor capacidade de análise posterior.

2.7. Perfis alares

De acordo com Maltauro et al. (2025), um perfil alar representa a secção de um objeto que se movimenta por um fluido, desenhado para gerar sustentação. As principais características que definem a sua geometria são a linha de curvatura, que caracteriza os coeficientes de sustentação e de arrasto aerodinâmico, e a espessura, que irá influenciar o momento em que ocorre separação do escoamento assim como alterar o comportamento das forças de arrasto aerodinâmico. Qualquer perfil pode ser caracterizada por estes dois parâmetros além das coordenadas da linha de corda (Maltauro et al., 2025).

A convenção do que é a espessura num perfil, referenciando Maltauro et al. (2025), não é consentida globalmente existindo dois modificadores, a convenção inglesa (LP) que afirma ser a distância perpendicular à linha de corda entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo da superfície do perfil e a convenção americana (LS) que define a espessura como sendo o tamanho de uma esfera inscrita no perfil alar. A convenção europeia é em tudo semelhante à convenção inglesa com a diferença de fixar o ponto inicial de medição no bordo de ataque e utilizar o comprimento da corda como unidade ao invés do método LP que assume o comprimento da corda como o seu tamanho real.

Para definir a espessura do perfil, o método europeu consiste em vetores e não numa dimensão, relacionando apenas o comprimento de referência unitário (a corda) com a distância vertical entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo da superfície do perfil. Assim a espessura nunca assumirá um valor, por exemplo 0,1 m, mas sim uma percentagem, por exemplo 12% do comprimento real da corda.

Por sua vez, a linha de curvatura, é definida como o lugar geométrico dos pontos médios de qualquer segmento vertical que conecte a superfície superior do perfil à superfície inferior do mesmo. Por definição, segundo Maltauro et al. (2025), tanto a linha de corda como a linha de curvatura começam no bordo de ataque e terminam no bordo de fuga.

A linha de corda corresponde ao segmento $\overline{OA}$ representado na Figura 14, ou seja, uma linha que conecta o bordo de ataque, o primeiro ponto de contacto da asa com o fluido que tem como objetivo separar o escoamento de forma controlada, com o bordo de fuga, o ponto onde o escoamento se volta a juntar após atravessar toda a extensão do perfil.

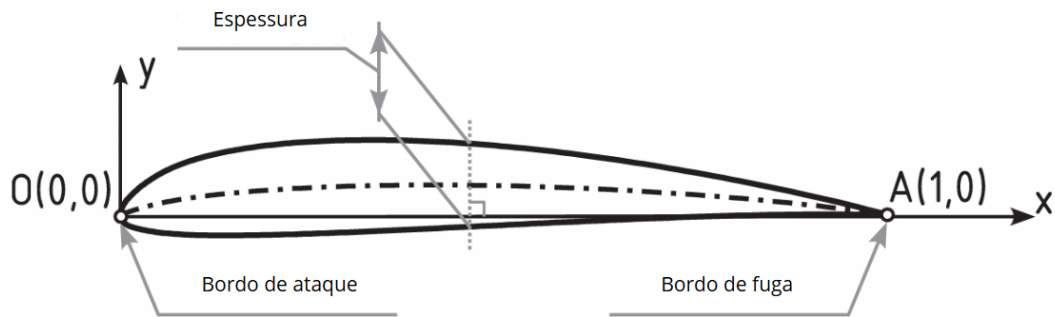


Figura 14 – Esquema de um perfil alar, adaptado de (Maltauro et al., 2025).

Ao projetar asas, segundo Min et al. (2023), um dos parâmetros a ter em conta é a razão entre a envergadura, ou seja, a largura da asa, e o comprimento da corda isto porque esta razão define o seu formato, afetando significativamente o desempenho das asas para valores de Reynolds elevados, normalmente associados a altas velocidades.

Quando esta razão é elevada, o arrasto induzido, gerado pela formação de vórtices nas extremidades da asa, é menor, sendo ideal para aviões de passageiros que procuram eficiência e consumos de combustível inferiores em voos de longa duração.

Por outro lado, razões menores proporcionam asas mais quadradas, curtas e largas, ideais para aviões acrobáticos que necessitam de elevada manobrabilidade em altas velocidades.

2.8. Balanças previamente desenvolvidas

Analisando alguns projetos anteriormente desenvolvidos por outros estudantes e cientistas de diferentes países, é possível concluir acerca das metodologias utilizadas e dos erros comuns na construção e projeto de uma balança para um túnel de vento.

Por exemplo, Tomin et al. (2020), três estudantes universitários de *Queens University of Charlotte*, desenvolveram e construíram uma balança de três eixos, Figura 15 (b), com três células de carga, eletrónica básica para tratar os sinais e um pequeno servomotor para alterar o ângulo de ataque da asa, Figura 15 (a). Neste artigo não existem dados relativos aos erros percentuais obtidos em ensaios práticos, mas os autores referenciam alguns inconvenientes com os quais tiveram que lidar, como a fricção entre componentes, ruído eletromagnético que interferia com os componentes eletrónicos e incorreta calibração da balança.

Jeffery (2016), em alternativa, criou uma balança de apenas dois eixos, Figura 16 (a), que evita qualquer tipo de interação entre os seus componentes, montando as células de carga perpendicularmente uma à outra, onde uma apenas se dedica a medir sustentação e a outra a medir o arrasto aerodinâmico, conseguindo assim criar uma balança eficaz que pode ser facilmente adaptada para qualquer tipo de túnel de vento. As forças geradas no modelo são exibidas numa interface digital em tempo real especificamente criada para ligar diretamente as células de carga, Figura 16 (b).

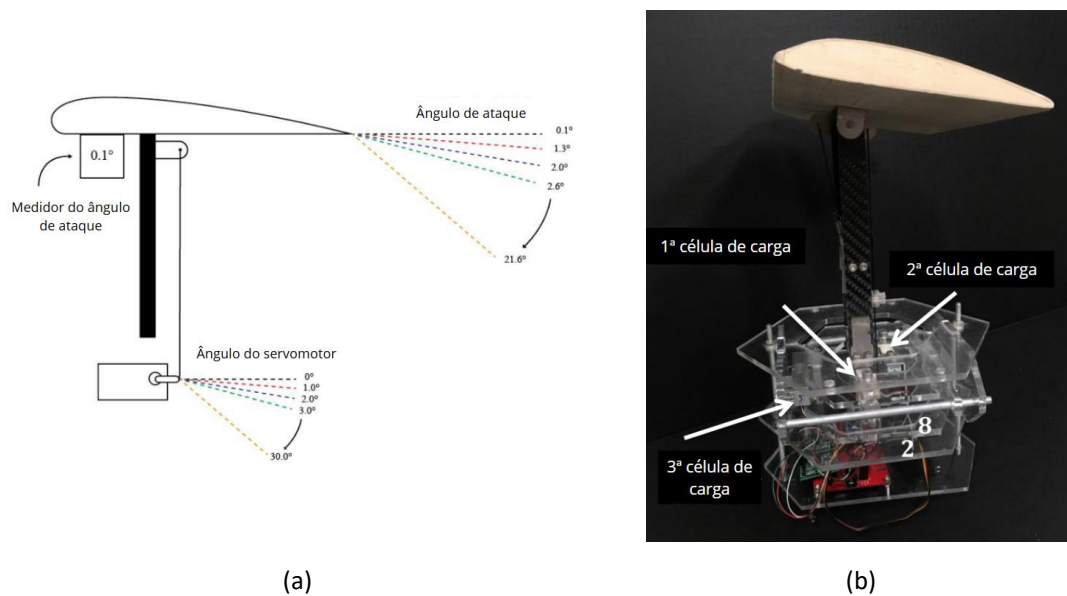


Figura 15 – Balança de três eixos. (a) Esquema do mecanismo do ângulo de ataque. (b) Posição das células de carga, adaptado de (Tomin et al., 2020).

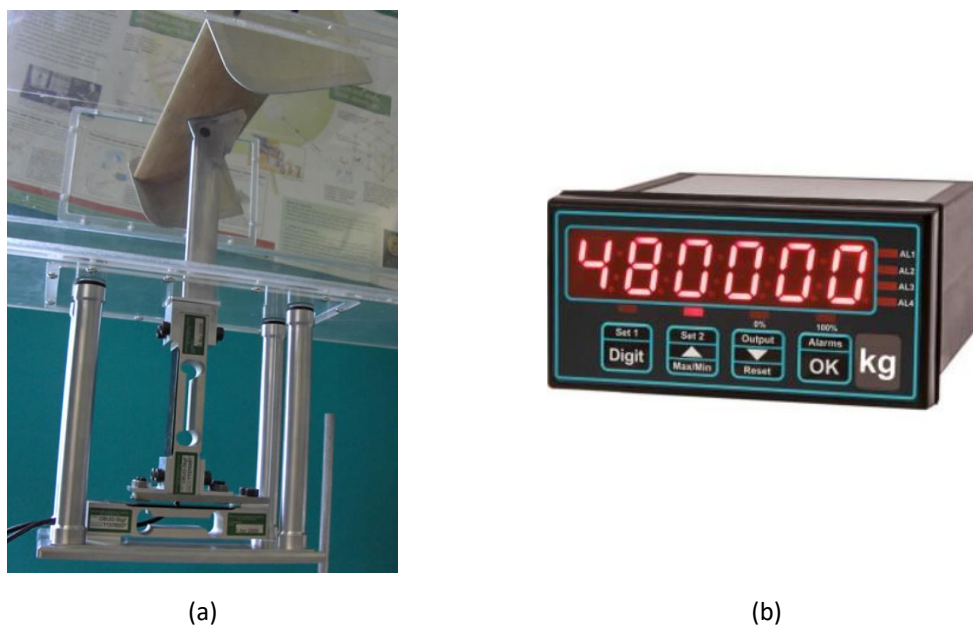


Figura 16 – Balança de dois eixos. (a) Posição das células de carga. (b) Interface digital, adaptado de (Jeffery, 2016).

Por sua vez, Iwakawa et al. (2015) desenvolveram uma balança de 6 eixos compacta para um túnel de vento supersônico com o mínimo de interações entre componentes possível. A balança consiste de três peças, um anel, um braço anterior e um braço posterior medindo as diversas forças de forma independente e com erros relativos muito baixos, entre 0,1% e 1,7% para a sustentação e erros entre 0,1% a 4,5% para o arrasto aerodinâmico.

Um problema grave destacado pelos autores é o facto de o erro percentual variar muito para a gama de valores registados pela balança (Iwakawa et al., 2015).

Relativamente ao tópico das células de carga e sensibilidade dos extensómetros, Tavakolpour-Saleh & Sadeghzadeh (2014) pertencentes ao departamento de Engenharia Mecânica e de Engenharia Aeroespacial, desenvolveram uma balança de um só componente que mede as forças com base na deformação de extensómetros estrategicamente posicionados para que existisse elevados deslocamentos nas direções pretendidas, mas que nas restantes a balança fosse rígida.

Após um elaborado processo de otimização da balança com base em métodos de elementos finitos, os autores construíram e testaram a balança obtendo sensibilidades de 1,01 mV/V, 1,08 mV/V e 0,96 mV/V para a força de sustentação, força de arrasto e para o momento respetivamente (Tavakolpour-Saleh et al., 2016).

As balanças de alta precisão podem ser configuradas para trabalhar em locais muito apertados, por exemplo dentro de um braço robótico tal como G. S. Kim (2007), explorou esta hipótese e desenvolveu uma balança de seis componentes capaz de caber no “pulso” do braço robótico que consegue realizar medições com elevada precisão devolvendo erros percentuais na casa dos 2,85% e uma sensibilidade dos sensores de 0,50 mV/V.

3. Dimensionamento da balança

Este capítulo apresenta as diversas etapas a considerar durante o processo de dimensionamento de uma balança para aplicação em túnel de vento. O capítulo inicia-se com a definição do sistema de eixos a adotar, o qual servirá de referência para os cálculos teóricos e para a posterior interpretação das medições experimentais.

De seguida, são estabelecidas as condições operacionais previstas para a balança, incluindo as dimensões representativas de um possível túnel de vento, a velocidade expectável do escoamento de ar e os limites geométricos do modelo a ensaiar. Estes parâmetros são definidos de forma a garantir que o corpo de prova não interfere indevidamente com o comportamento do fluido no interior da secção de teste.

Posteriormente, são analisados os coeficientes aerodinâmicos de possíveis modelos que poderão ser selecionados para ensaio, com base nos quais são estimadas as forças exercidas pela interação do escoamento de ar com o corpo. A partir destas estimativas, determina-se a ordem de grandeza das forças que a balança deverá ser capaz de medir com precisão.

Por fim, é apresentada a metodologia para conversão de um momento em força detetável por uma célula de carga. Com base nestes dados, é efetuado o dimensionamento das células de carga a utilizar, assegurando a sua adequação às forças previstas nos ensaios.

3.1. Forças e momento

O túnel de vento no qual esta balança será instalada encontra-se atualmente em fase de desenvolvimento nas instalações do politécnico. Apesar de ainda não existir uma estrutura física finalizada, algumas informações relevantes para o dimensionamento da balança já estão disponíveis. A secção de teste terá aproximadamente 200 mm × 200 mm de área útil, com um comprimento total de 500 mm, sendo prevista uma velocidade máxima de escoamento do ar de 20 m/s.

A definição do sistema de eixos é essencial para garantir coerência e repetibilidade entre diferentes ensaios. Neste projeto, adotou-se um referencial com origem no corpo que será ensaiado. A orientação positiva do eixo X (força horizontal) é definida no sentido oposto ao escoamento do ar, enquanto que o eixo Z (força vertical) assume orientação positiva de cima para baixo. O momento M_Y é considerado positivo segundo o sentido anti-horário, em conformidade com o sistema de referência europeu, tal como descrito por Hufnagel (2022).

A balança foi concebida para medir três grandezas principais: a força de sustentação, representada pela letra L , a força de arrasto aerodinâmico, representada pela letra D , e o momento de cabragem, representado pela letra M .

Os ensaios realizados com o auxílio desta balança poderão envolver uma variedade de modelos, desde veículos terrestres até aeronaves, incluindo também componentes isolados como asas. Por este motivo, é fundamental que o sistema possua uma gama de medição suficientemente ampla para abranger diferentes ordens de grandeza de força. O dimensionamento da balança deve, portanto, considerar os limites máximos de carga esperados para ambos os tipos de modelos, ainda que isso implique, em alguns casos, uma redução na resolução da medição em determinados eixos, em prol de uma maior capacidade de carga dos sensores.

A análise inicia-se com o estudo de asas, sendo necessário selecionar um perfil aerodinâmico já bem caracterizado. Para tal foi utilizada a base de dados *Airfoil Tools*, sendo que o perfil selecionado deverá apresentar elevada sustentação, de modo a fornecer uma estimativa realista para os valores máximos de carga a que a célula poderá ser submetida. Entre os diversos perfis disponíveis, o NACA 4412, representado na Figura 17, foi selecionado como modelo de referência, devido à sua curvatura de 4% localizado a 40% da corda e a uma espessura máxima de 12% do comprimento da corda. Estas características conferem-lhe um bom desempenho aerodinâmico, especialmente em baixos números de Reynolds, como os observados em túneis de vento de pequena escala.

Considerando as dimensões previstas para a secção de teste do túnel de vento, a envergadura da asa, b , foi definida como 200 mm, de modo a ocupar quase toda a largura útil da secção e reduzir a geração de vórtices nas extremidades, um fator que contribui para a manutenção do escoamento laminar sobre o perfil. A corda da asa, c , foi definida com 100 mm, permitindo ao modelo manter-se afastado das paredes da secção de teste mesmo sob ângulos de ataque elevados, minimizando assim interferências nas medições e a geração de ar turbulento.

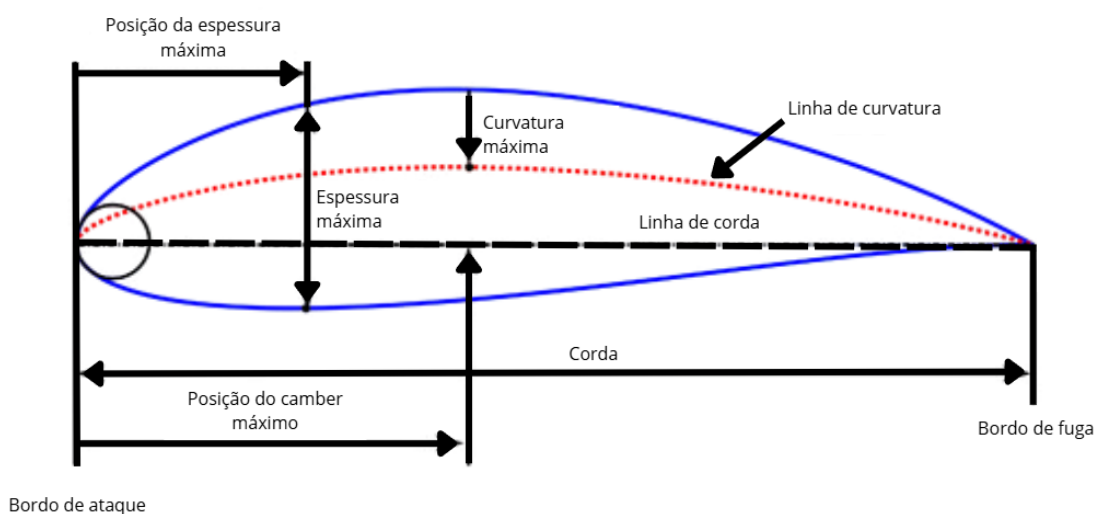


Figura 17 – Esquema do perfil NACA 4412, adaptado de (Agarwal et al., 2024).

Tratando-se de uma asa retangular, a sua área projetada, S , é uma relação entre a envergadura e a corda, equação (6), obtendo um valor para a área a utilizar nos cálculos, $S = 0,02 \text{ m}^2$.

$$S = c \times b \quad (6)$$

Após definidas as dimensões do corpo de ensaio, é necessário estabelecer as condições de análise, nomeadamente a temperatura no interior do túnel de vento, o comprimento de referência do modelo, a viscosidade dinâmica e a massa volúmica do fluido envolvente.

Para os efeitos desta análise, considera-se uma temperatura ambiente de 20°C , correspondente a condições de pressão e temperatura ao nível do mar. Nestes termos, assume-se uma massa volúmica do ar de $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ e uma viscosidade dinâmica de $\mu = 1,8 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$.

O comprimento característico adotado é a corda do perfil aerodinâmico, de valor $c = 0,1 \text{ m}$. Embora o túnel de vento em desenvolvimento esteja projetado para uma velocidade máxima de 20 m/s , nesta análise considera-se uma velocidade do escoamento de ar de $u = 30 \text{ m/s}$. A adoção deste valor superior permite realizar um sobredimensionamento da balança, garantindo assim a sua compatibilidade com outros túneis de vento que operem a velocidades mais elevadas.

O número de Reynolds, Re , determinado pela equação (7), influencia diretamente os coeficientes aerodinâmicos associados ao perfil em análise.

$$Re = \frac{\rho u c}{\mu} \approx 0,2 \times 10^6 \quad (7)$$

Para dar início ao cálculo das forças aerodinâmicas geradas pela interação do perfil NACA 4412 com o fluxo envolvente, é necessário, em primeiro lugar, conhecer os respetivos coeficientes aerodinâmicos para uma determinada gama de ângulos de ataque. A Figura 18 apresenta os valores do coeficiente de sustentação, C_L , do coeficiente de arrasto aerodinâmico, C_D , e do coeficiente de momento de cabragem, C_M , nas condições de pressão e temperatura descritas anteriormente.

Os gráficos polares representados na Figura 18 foram obtidos com base nos dados fornecidos pela base de dados *Airfoil Tools*, e estabelecem a relação entre o ângulo de ataque do perfil, α , e os respetivos coeficientes aerodinâmicos.

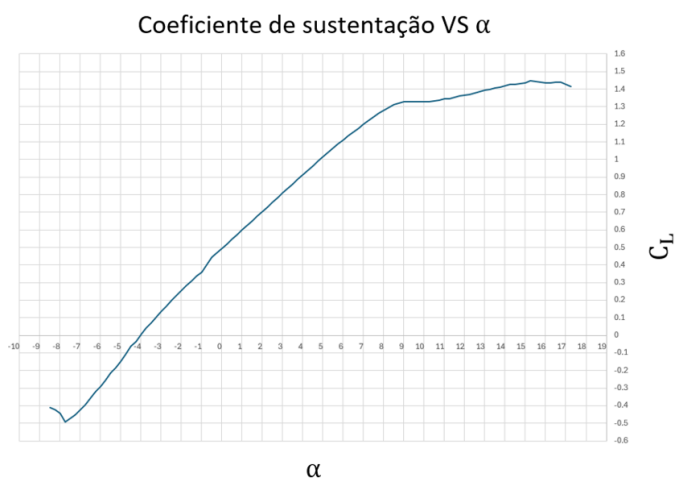
Na Figura 18 (a), o eixo das abcissas representa α , enquanto o eixo das ordenadas indica o valor C_L . A Figura 18 (b) relaciona α com C_D , e a Figura 18 (c) apresenta a variação de C_M em função do mesmo parâmetro.

Pela análise do gráfico da Figura 18 (a), observa-se que o valor de C_L é negativo para $\alpha < -4^\circ$, indicando que o perfil gera sustentação negativa. A partir deste ponto, o valor de C_L cresce de forma aproximadamente linear até aos 9° , momento em que atinge uma zona de estabilização.

Relativamente ao gráfico da Figura 18 (b), observa-se que C_D apresenta um valor mínimo na faixa de 0° a 2° , o que sugere a presença de escoamento laminar. A partir dos 9° , C_D aumenta abruptamente, traduzindo a ocorrência de separação do escoamento e a transição para um regime turbulento.

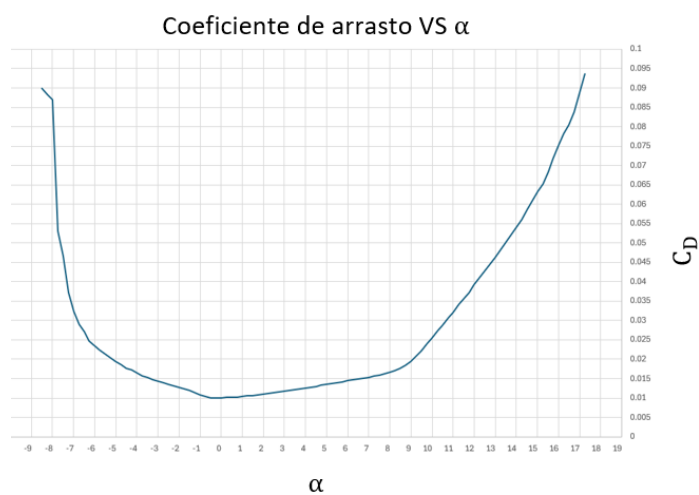
Na Figura 18 (c), o comportamento de C_M revela que o momento aerodinâmico tende a estabilizar quando o ângulo de ataque se aproxima de -4° , sugerindo que, para valores inferiores, ocorre separação do escoamento na superfície do perfil. Adicionalmente, C_M permanece negativo em toda a gama útil de operação, o que indica que o perfil apresenta um comportamento aerodinâmico estável. O facto de C_M nunca atingir zero implica que o perfil está sujeito a um momento constante, cuja intensidade varia pouco ao longo da gama de ângulos considerados. Esta pequena variação exige que a célula de carga responsável pela leitura do momento possua elevada resolução para detetar as flutuações subtis no valor medido.

Com base na análise conjunta dos três gráficos, conclui-se que a zona de operação ideal do perfil NACA 4412 se situa entre os ângulos de ataque de -4° a 9° . Contudo, importa referir que esta faixa não é universal e que outros perfis podem apresentar uma amplitude operacional mais alargada relativamente ao ângulo de ataque admissível.



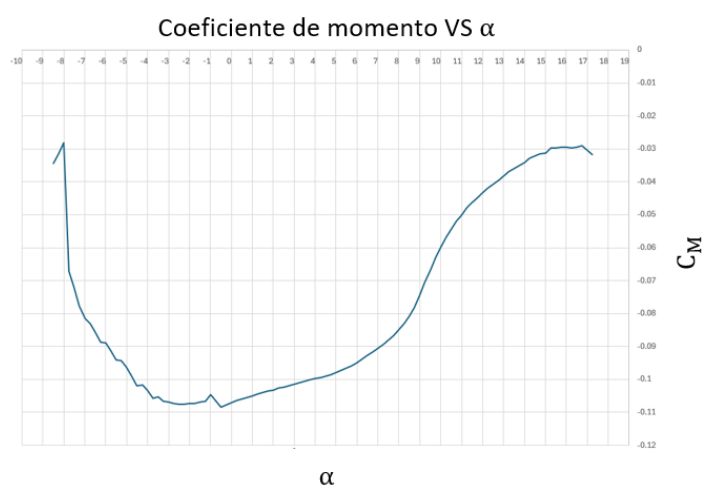
α

(a)



α

(b)



α

(c)

Figura 18 – Gráficos polares do perfil NACA 4412. (a) C_L em função de α . (b) C_D em função de α . (c) C_M em função de α .

Com base na análise dos gráficos polares apresentados na Figura 18, foi possível extrair os coeficientes aerodinâmicos correspondentes a alguns dos ângulos principais. Os respectivos valores de C_L , C_D e C_M encontram-se resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Características do perfil NACA 4412

Ângulo de ataque	C_L	C_D	C_M
0°	0,494	0,010	-0,107
5°	1,016	0,014	-0,098
10°	1,327	0,025	-0,060
15°	1,434	0,064	-0,031

Um corpo de ensaio pode, por exemplo, corresponder a um perfil de asa, com um elevado coeficiente de sustentação, ou a um modelo de automóvel em escala reduzida, caracterizado por um coeficiente de arrasto aerodinâmico relativamente elevado; ou ainda a uma estrutura não aerodinâmica, como um edifício ou uma placa plana.

Entre as várias possibilidades, e considerando a aplicação deste mecanismo em ambiente académico, os casos com maior relevância prática serão os ensaios sobre veículos automóveis e modelos de asas. Uma vez que os perfis alares já impõem elevadas exigências no que respeita ao coeficiente de sustentação, torna-se pertinente complementar o estudo com um modelo que apresente um coeficiente de arrasto significativo, como é o caso de um veículo.

No dimensionamento do modelo automóvel a utilizar, importa respeitar as limitações físicas da secção de ensaio do túnel de vento. De acordo com Katz (2016), a área frontal do modelo não deverá exceder 7% da área da secção de ensaio, de forma a evitar perturbações no fluxo de ar causadas pela proximidade às paredes. No entanto, durante ensaios experimentais, Katz (2016) conclui essa área poderá ser até 10% da área da secção de estudo, para assegurar uma perturbação mínima no escoamento. A razão de bloqueio, BR, é definida pela equação (8), onde A_w representa a área frontal do modelo e A_s a área útil da secção de ensaio:

$$BR = \frac{A_w}{A_s} \quad (8)$$

Considerando uma área de secção transversal de 0,04 m² para o túnel, conclui-se que a área frontal máxima admissível do modelo automóvel deverá ser inferior a 0,004 m², de forma a respeitar o limite de bloqueio de 10%.

Os coeficientes aerodinâmicos de veículos automóveis variam significativamente em função da sua geometria, da presença de apêndices aerodinâmicos e de detalhes estruturais que influenciem o escoamento do ar. De forma geral, segundo Hashir et al. (2020), o C_D , situa-se

entre 0,26 e 0,42, resultados obtidos com análises em CFD e com ensaios experimentais em um túnel de vento. Já o C_L é difícil quantificar não existindo valores confirmados por fabricantes de automóveis, ainda assim, através das análises em CFD conduzidas por Dattatray Jathar & Borse (2019), o valor de C_L , para automóveis convencionais, varia entre 0,05 e 0,23, dependendo da eventual utilização de dispositivos como asas, difusores ou extratores, que têm por objetivo gerar sustentação negativa (*downforce*). Para os cálculos apresentados posteriormente, adotaram-se os valores de referência $C_D = 0,3$ e $C_L = 0,05$, representativos de um veículo genérico desprovido de elementos aerodinâmicos destinados à produção de sustentação.

Estando definidos os modelos a utilizar nos cálculos, é possível determinar as forças aerodinâmicas. A sustentação, L , é calculada recorrendo à equação (9) enquanto que o arrasto aerodinâmico, D , é obtido através da equação (10). No caso de asas ou modelos suspensos, o momento de cabragem, M , é adicionalmente considerado, sendo determinado pela equação (11). Importa referir que, no caso específico dos automóveis, a área a utilizar nas equações (9) e (10) corresponde à área frontal do modelo do automóvel, A_w , em substituição da área projetada usada para asas.

$$L = 0,5 C_L \rho u^2 S \quad (9)$$

$$D = 0,5 C_D \rho u^2 S \quad (10)$$

$$M = 0,5 C_M \rho u^2 S c \quad (11)$$

Na Tabela 2 apresenta-se um resumo das forças e momento obtidos a partir da análise de uma asa baseada no perfil NACA 4412.

Tabela 2 - Forças e momento

α (°)	L (N)	D (N)	M (Nm)
0	5,444	0,111	-0,118
5	11,197	0,149	-0,108
10	14,636	0,282	-0,066
15	15,812	0,698	-0,034

Com base na análise dos resultados apresentados na Tabela 2, estima-se que a força máxima de sustentação a registar será da ordem dos 16 N, o que corresponde aproximadamente a 1,63 kgf. Por outro lado, a força máxima de arrasto aerodinâmico situa-se em torno de 0,7 N, ou cerca de 0,07 kgf.

No caso do modelo do automóvel considerado, os valores das forças aerodinâmicas mantêm-se constantes, uma vez que o modelo se encontra permanentemente paralelo ao solo, não afetando o ângulo de ataque. Para os parâmetros definidos, obteve-se $L = 0,110$ N e $D = 0,661$ N. Comparando estes resultados com os dados da Tabela 2, verifica-se que os valores do arrasto aerodinâmico se encontram na mesma ordem de grandeza dos obtidos para perfis alares, enquanto que a força de sustentação apresenta diferenças significativas. Esta disparidade influencia diretamente a seleção das células de carga, que deverão possuir

capacidade para suportar forças de diferentes magnitudes, mantendo simultaneamente uma resolução suficiente para detetar variações subtis.

Importa salientar que os cálculos apresentados até este ponto abrangem apenas dois casos de estudo (asas e veículos), sendo necessário garantir que a balança possui flexibilidade para se adaptar a uma vasta gama de modelos experimentais. Assim, os valores aqui apresentados têm como principal finalidade estabelecer a ordem de grandeza das forças e momentos que poderão atuar sobre o sistema.

Relativamente ao momento de cabragem, importa referir que as células de carga utilizadas neste projeto são apenas sensíveis a forças. Para determinar M , este deve ser convertido numa força equivalente, F , através da aplicação de um braço, correspondente à distância entre o ponto de aplicação do momento e a célula de carga.

Numa balança exterior de plataforma, não existem restrições geométricas significativas quanto à disposição dos sensores, permitindo posicionar as células de carga de forma estratégica para facilitar a medição de momentos. A conversão de momento em força pode ser implementada ligando o modelo em estudo a uma célula de carga através de um braço rígido com comprimento conhecido, distância “ a ”. Quanto maior for esta distância, menor será a força resultante medida pela célula, de acordo com a relação descrita na equação (12).

$$M = F \cdot a \quad (12)$$

Atendendo aos resultados apresentados na Tabela 2, observa-se que os valores do momento de cabragem se encontram numa ordem de grandeza relativamente baixa. Ao converter este momento numa força equivalente, utilizando um braço com comprimento elevado, a magnitude da força aplicada sobre a célula de carga poderá tornar-se demasiado reduzida, dificultando a sua deteção. Em casos extremos, a variação de carga resultante poderá situar-se abaixo da resolução mínima do sensor, impossibilitando medições fiáveis.

Este cenário torna-se particularmente crítico quando não é viável adquirir células de carga com resolução suficientemente elevada para detetar estas pequenas variações. Por esta razão, o parâmetro geométrico associado ao braço, a distância “ a ”, deve ser cuidadosamente otimizado para não ultrapassar a capacidade nominal da célula de carga, mas garantir que grandeza da força é suficientemente elevada para ser detetada.

Esta abordagem permite melhorar a sensibilidade do sistema na leitura do momento e aumenta a fiabilidade das medições, sem comprometer a integridade das células de carga.

3.2. Escolha das células de carga

Uma das abordagens possíveis consiste na construção de uma balança monolítica, ou seja, a maquinação de um bloco sólido de aço para integrar os extensómetros. Este tipo de configuração, embora tecnicamente exigente, apresenta a vantagem de resultar num mecanismo compacto, rígido e altamente específico. No entanto, a sua conceção requer análises estruturais avançadas, normalmente baseadas em métodos de elementos finitos (MEF), de forma a definir com elevada precisão a geometria da balança e a localização dos extensómetros.

Como alternativa, optou-se neste projeto por uma solução modular e mais simples: a utilização de células de carga. Estas células, embora baseadas no mesmo princípio de deformação controlada das balanças monolíticas, são projetadas para se deformar exclusivamente numa direção, mantendo elevada rigidez nas restantes. Esta característica permite minimizar os efeitos de forças parasitas ou momentos indesejados, garantindo medições mais fiáveis.

As células de carga disponíveis são geralmente acompanhadas de fichas técnicas que descrevem os seus principais parâmetros operacionais, tais como capacidade máxima, resolução e erro de repetibilidade.

Independentemente da configuração adotada para o desenho da balança exterior, a célula de carga responsável pela medição da força de sustentação terá de estar obrigatoriamente instalada na plataforma que suporta o modelo. Esta condição estrutural implica que a célula destinada à medição da sustentação esteja permanentemente sujeita à massa da plataforma. Consequentemente, se o tabuleiro possuir uma massa elevada, será necessário recorrer a células de carga com maior capacidade nominal, o que, por sua vez, compromete a resolução do sistema, podendo dificultar a deteção de forças aerodinâmicas de pequena magnitude.

A equação (13) apresenta o cálculo da resolução de uma célula de carga, Res , estabelecendo a relação entre a sua capacidade nominal, C , e o erro de repetibilidade, ER , expresso em percentagem. Para o cálculo, ER deve ser convertido para forma decimal, dividindo por 100.

$$Res = C \times \left(\frac{ER}{100} \right) \quad (13)$$

A Tabela 3 apresenta uma seleção de células de carga disponibilizadas por um fabricante, com vista a apoiar o processo de escolha dos sensores mais adequados às exigências deste projeto. O catálogo completo, bem como as respetivas fichas técnicas detalhadas, encontra-se disponível para consulta no Anexo A.

Tabela 3 - Características principais das células de carga

Capacidade (kgf)	Erro de repetibilidade (%)	Resolução (kgf)
0,3	0,05	0,00015
0,5	0,05	0,00025
0,75	0,05	0,00037
1	0,05	0,00050
2	0,05	0,00100
3	0,05	0,00150

Para a medição da força de sustentação, a célula de carga mais adequada será a de 2 kgf. Esta escolha justifica-se pelo facto de, além das forças aerodinâmicas geradas pelo modelo, uma parte significativa da capacidade da célula ser utilizada para suportar a massa da estrutura de apoio e do próprio corpo de ensaio. A adoção de uma célula com capacidade inferior poderia comprometer a integridade da medição ou até mesmo levar a sobrecarga do sensor.

No que respeita à medição do arrasto aerodinâmico, a célula de 0,3 kgf seria, em teoria, a mais indicada, tendo em conta a ordem de grandeza das forças previstas. No entanto, durante as operações de montagem e desmontagem do modelo, é comum aplicar forças temporárias superiores às que ocorrem em ensaio, o que pode facilmente ultrapassar a capacidade nominal do sensor. Ainda que o fabricante especifique uma margem de segurança (*ultimate overload*) de 150% da carga nominal, o que permitiria suportar até 0,45 kgf sem deformação permanente, esta margem não deve ser considerada como base de operação regular. Por esse motivo, foi selecionada a célula de 1 kgf, que oferece uma resolução aceitável para a gama de forças prevista nesta direção, além de maior robustez durante o manuseamento do sistema.

Relativamente ao momento de cabragem, uma vez que este não pode ser medido diretamente por uma célula de carga, recorre-se à conversão de momento em força através da equação (12). Como a magnitude dos momentos gerados é baixa, a escolha da célula para esta medição deve privilegiar a maior resolução possível, de forma a minimizar os erros associados. Para isso, o desenho da balança deverá assegurar uma distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação que maximize a sensibilidade da medição sem exceder a capacidade nominal da célula.

4. Projeto da balança

Neste capítulo descreve-se o processo de concepção de uma balança de três eixos destinada à utilização em ambiente académico. A exposição tem início com a análise de uma proposta preliminar do projeto, a qual evoluiu até à configuração final adotada para a construção da balança.

São apresentados os principais critérios a considerar no projeto de uma balança deste tipo, abordando-se tópicos essenciais como a influência das forças de atrito, a sensibilidade a ruídos e interferências nas medições, bem como a importância de isolar corretamente as diferentes componentes de força e momento. Estes fatores são determinantes para garantir a precisão e a fiabilidade dos dados obtidos.

Seguidamente, descreve-se o processo de desenvolvimento do modelo final, iniciando-se pela avaliação da proposta inicial, que teve como principal função consolidar os conhecimentos adquiridos durante a revisão bibliográfica. A partir desta base, foram aprimorados alguns aspetos que culminaram no projeto construído.

O capítulo conclui com a explicação da metodologia adotada para a aquisição e o processamento dos dados fornecidos pelas células de carga, incluindo o tratamento digital dos sinais, a filtragem de ruído e a conversão para unidades físicas relevantes.

4.1. Pontos principais

O objetivo é desenvolver uma balança capaz de medir forças em dois eixos principais, na direção vertical e na direção horizontal, além de ser essencial que o sistema seja capaz de registar o momento resultante da interação entre o modelo de ensaio e o fluido envolvente.

A influência de forças de atrito durante a aquisição de dados representa um fator crítico e não pode ser negligenciada. Por este motivo, o desenho da balança deve minimizar as interações mecânicas entre componentes, evitando articulações ou movimentos relativos que possam introduzir erro nas medições. Neste contexto, as propostas apresentadas ao longo deste capítulo baseiam-se na utilização das próprias células de carga como elementos estruturais, com o intuito de reduzir ao máximo as interferências externas e garantir a rigidez do sistema.

A medição de forças em múltiplas direções levanta desafios adicionais, nomeadamente a necessidade de mitigar o efeito de forças parasitas. Por exemplo, forças laterais ou de atrito não devem induzir deformações significativas nas células de carga que prejudiquem a leitura da força pretendida. A integridade das medições depende, assim, da capacidade de isolar as componentes de força relevantes e de garantir que cada célula é sensível apenas à direção para a qual foi projetada deformar.

Tendo em vista a futura instalação do sistema nas instalações do politécnico, o projeto da balança deve também privilegiar a simplicidade construtiva, a facilidade de operação e a robustez mecânica. Estas características são essenciais para permitir a montagem e desmontagem repetida de modelos sem comprometer a integridade funcional das células de carga.

Dado que, à data da conceção da balança, o túnel de vento se encontra ainda em desenvolvimento, tornou-se necessário garantir que o sistema fosse modular e versátil, capaz de se adaptar a diferentes configurações de ensaio. Para isso, a balança deverá incluir múltiplos pontos de fixação e permitir a sustentação de modelos suspensos, como asas ou aeronaves.

Esta necessidade de versatilidade conduziu ao abandono da abordagem baseada em balanças internas, uma vez que estas são, por norma, integradas diretamente nos modelos de ensaio. Tal implicaria o fabrico de múltiplas balanças para diferentes configurações, contrariando um dos princípios fundamentais deste projeto, a capacidade de adaptação a uma vasta gama de modelos e túneis de vento.

Tendo em consideração os requisitos de modularidade, adaptabilidade e contenção de custos, concluiu-se que a opção mais adequada seria o desenvolvimento de uma balança exterior de plataforma. Esta abordagem elimina restrições geométricas associadas ao espaço interno do túnel e permite a utilização de materiais e processos de fabrico convencionais, contribuindo para a redução dos custos de produção e para a flexibilidade do sistema.

As células de carga utilizadas serão semelhantes à ilustrada na Figura 11, permitindo a medição da força na direção desejada sem a necessidade de recorrer a mecanismos adicionais para restringir os restantes graus de liberdade.

4.2. Primeira proposta

A concepção inicial da balança foi inspirada no trabalho desenvolvido por Tomin et al. (2020), cujo objetivo consistia na utilização de três células de carga: uma dedicada exclusivamente à medição da força de arrasto aerodinâmico e duas para o registro da força de sustentação e do momento gerado em ensaios com asas ou aeronaves.

O primeiro modelo conceitual, representado na Figura 19, é constituído por três células de carga (C1, C2 e C3) e um elemento extensível (E1), cuja função será garantir o paralelismo entre os tabuleiros superior e inferior da estrutura. Nesta configuração, a força de arrasto aerodinâmico, F_3 , é medida diretamente pela célula C3, enquanto que a força de sustentação, L , é obtida a partir da soma das leituras de C1 e C2, ou seja, $L = F_1 + F_2$.

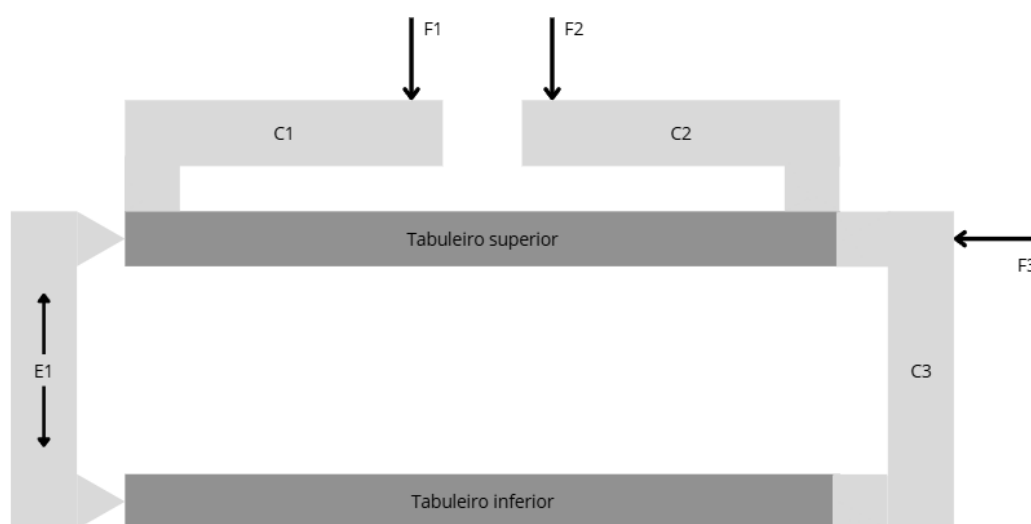


Figura 19 – Primeira proposta para o desenho da balança.

A estrutura da balança baseava-se em duas placas metálicas espessas, os tabuleiros, projetadas de forma a apresentar uma deformação desprezável, minimizando assim eventuais interferências na medição das forças. Todo o sistema seria montado sobre uma caixa metálica, responsável por albergar os componentes eletrónicos. O controlo do ângulo de ataque da asa seria efetuado por meio de duas hastes ajustáveis em comprimento. A inclusão de um elemento extensível tinha como finalidade evitar desalinhamentos estruturais, que poderiam induzir forças parasitas na célula de carga responsável pela medição do arrasto.

A determinação da posição do ponto de aplicação das forças aerodinâmicas, o centro de pressão (CP), seria realizada com base num diagrama de corpo livre, Figura 20, no qual as forças F_1 e F_2 correspondem às reações verticais resultantes da aplicação da força de sustentação sobre as hastes de suporte. CP encontra-se a uma distância “a” de F_1 e “b” de F_2 .

Através da formulação de um sistema com duas equações e duas incógnitas, é possível determinar a posição relativa de CP em relação a um dos pontos de amarração da asa. Uma vez conhecida uma destas distâncias, o momento de cabragem, pode ser calculado efetuando o produto da força num dos pontos de amarração pela distância correspondente, ou seja, $M = F_1 \cdot a$ ou $M = F_2 \cdot b$.

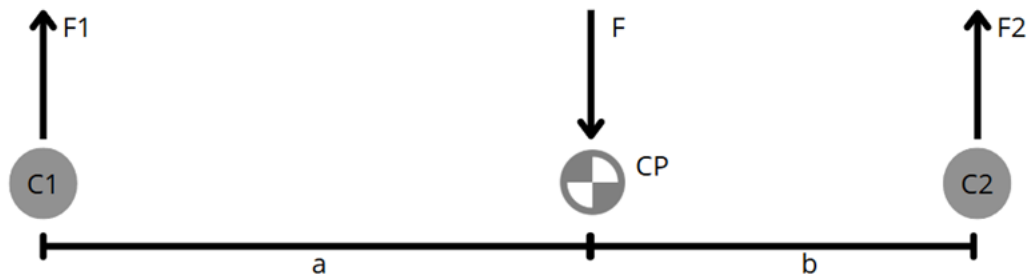


Figura 20 – Diagrama de corpo livre para o centro de pressão.

Apesar da simplicidade do conceito, esta proposta apresentou limitações significativas. O facto de a sustentação ser calculada a partir do somatório de duas medições independentes implica uma suscetibilidade elevada a erros induzidos por diferentes sensibilidades das células de carga. Para além disso, o momento gerado pela asa afetava diretamente as leituras das células associadas à força vertical, impedindo a separação clara entre forças e momentos. Este fator contraria um dos requisitos principais do projeto, a capacidade de isolar e medir individualmente cada grandeza física.

Como resposta a estas limitações, foi desenvolvida uma segunda proposta, com o objetivo de garantir que cada força e momento fosse medido exclusivamente por uma única célula de carga dedicada, eliminando assim erros associados a combinações de leituras e cálculos indiretos.

4.3. Segunda proposta

Com base nas conclusões retiradas do desenvolvimento da primeira proposta, a segunda abordagem centrou-se em eliminar, tanto quanto possível, as interações mecânicas entre componentes e em garantir que cada força é medida diretamente, sem a necessidade de cálculos complexos ou combinações de leituras.

Nesta nova configuração, Figura 21, a disposição das células de carga foi revista. A célula C1, localizada na base do mecanismo, é responsável exclusivamente pela medição da força de sustentação. Por sua vez, a célula C3 está orientada perpendicularmente a C1, sendo sensível apenas à força de arrasto aerodinâmico. Ambas estão rigidamente ligadas por um elemento sólido e indeformável, de modo a evitar deformações estruturais que possam induzir forças parasitas ou comprometer a estabilidade da medição durante o ensaio.

A medição do momento de cabragem é assegurada por uma terceira célula de carga (C2), instalada num mecanismo adicional que pode ser acoplado ou removido da balança conforme a natureza do ensaio. Esta solução modular permite adaptar o sistema consoante se pretenda avaliar asas, aeronaves ou outros modelos em que a componente de momento seja relevante.

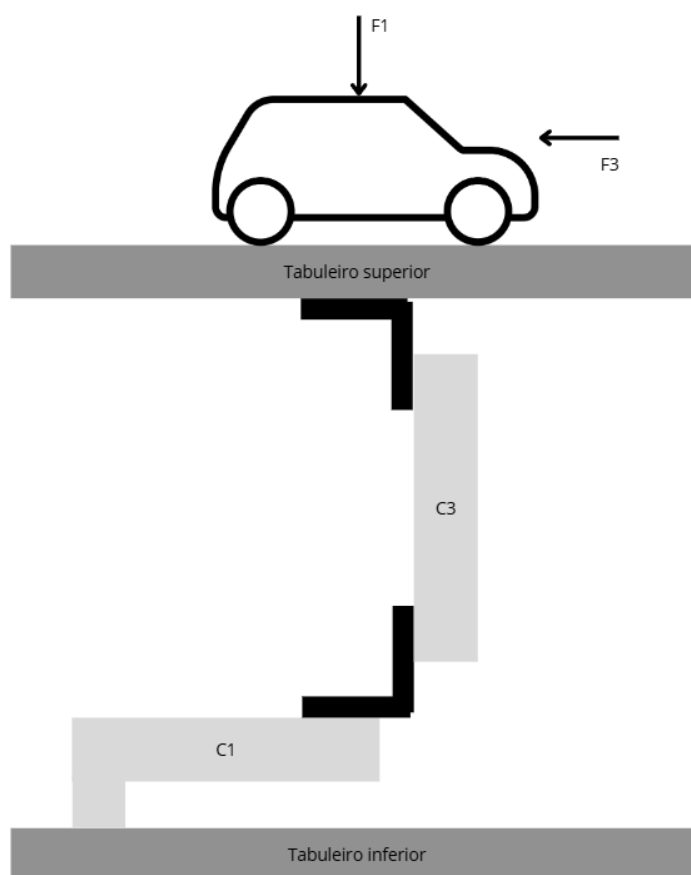


Figura 21 – Segunda proposta para o desenho da balança.

Para a leitura do momento, é utilizado um braço rígido indeformável, que liga diretamente o modelo à célula C2, conforme demonstrado na Figura 22. Assim, o momento é determinado pelo produto de F2, força medida na célula de carga C2, pelo comprimento do braço, previamente estabelecido.

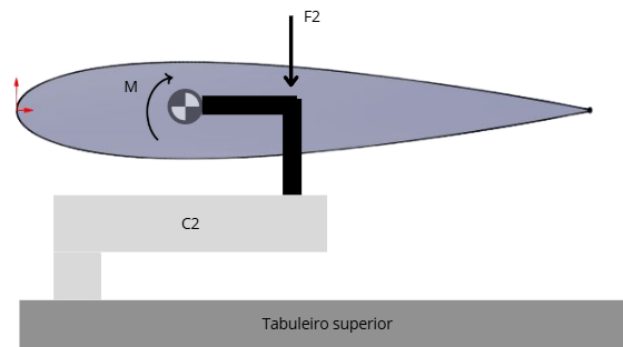


Figura 22 – Esquema da proposta para a medição do momento de cabragem.

Apesar de este mecanismo incluir componentes móveis, o que inevitavelmente gera forças de atrito, este efeito pode ser diminuído com a utilização de rolamentos, os quais reduzem significativamente a resistência ao movimento. No entanto, é importante notar que os rolamentos estão sujeitos à degradação com o tempo e podem requerer substituição periódica, especialmente em ambientes com elevada humidade, onde a oxidação pode comprometer o seu desempenho.

Um dos aspetos críticos no desenvolvimento desta parte da balança consiste em permitir a variação do ângulo de ataque da asa sem comprometer a leitura efetuada pela célula de carga C2.

Para maximizar a sensibilidade na medição do momento, a distância entre o ponto de rotação da asa e o ponto de aplicação da força na célula de carga deve ser tão reduzida quanto possível. Esta configuração resulta num aumento da força transmitida à célula, facilitando a sua deteção. No entanto, forças excessivamente elevadas podem ultrapassar a capacidade nominal da célula de carga, comprometendo a sua integridade. Assim, torna-se necessário estabelecer um compromisso entre a amplificação do sinal e a limitação da carga aplicada, ajustando adequadamente o comprimento do braço.

4.3.1. Tratamento de dados

Com o objetivo de garantir que a balança possa ser operada tanto por docentes como por alunos, o sistema de aquisição e tratamento de dados assume um papel fundamental. Este deve permitir o registo contínuo das forças medidas durante o ensaio, apresentando os dados de forma intuitiva.

Para atingir este objetivo, foram consideradas duas abordagens distintas, a utilização de condicionadores de sinal específicos para a ligação direta de células de carga ou o desenvolvimento de um programa informático dedicado, executado num computador, capaz de armazenar e processar os dados adquiridos.

A primeira opção, baseada em interfaces digitais, apresenta como principal vantagem a simplicidade de integração. A instalação resume-se à ligação dos fios elétricos provenientes das células de carga ao condicionador de sinal, sendo estes dispositivos normalmente pré-configurados e testados de fábrica. Apenas são necessários pequenos ajustes para assegurar a correta calibração da célula de carga.

Apesar da sua operação simplificada e da capacidade de visualização em tempo real, estas interfaces apresentam limitações significativas no que diz respeito à criação de registos históricos, representação gráfica ou armazenamento contínuo de dados. Estas funcionalidades são particularmente relevantes em ensaios aerodinâmicos, como na determinação do gráfico polar dos coeficientes aerodinâmicos.

A segunda abordagem consistiria no desenvolvimento de um programa dedicado para computador, capaz de armazenar e analisar os dados ao longo do tempo. Esta solução permitiria extrair informações detalhadas sobre a evolução das grandezas medidas durante os ensaios. No entanto, a sua implementação implicaria o domínio de técnicas de programação, eletrónica e automação, além da necessidade de equipamento adicional, como amplificadores de sinal e conversores analógico-digitais, para viabilizar a aquisição de dados.

Neste projeto, optou-se pela utilização de interfaces digitais específicas para células de carga. Esta escolha justifica-se pela sua facilidade de integração, fiabilidade operacional e ausência de necessidade de dispositivos auxiliares. Adicionalmente, estas interfaces oferecem funcionalidades úteis, como a programação de alarmes para deteção de condições limite, por exemplo, quando uma célula de carga se aproxima da sua capacidade máxima ou quando é atingido um valor de força pré-determinado. Estas funcionalidades contribuem para a segurança operacional do sistema e simplificam o acompanhamento do ensaio em tempo real.

A utilização de programas dedicados para análise de dados foi descartada. Esta decisão deveu-se, por um lado, à complexidade associada à transmissão dos sinais das células de carga para um computador externo e, por outro, à necessidade de calibrar previamente a balança com elevada precisão para validar o algoritmo. Tal processo implicaria a realização de ensaios experimentais e poderia aumentar substancialmente o tempo e os recursos necessários à implementação do sistema.

5. Processo construtivo

Neste capítulo são apresentadas as soluções adotadas para transformar a segunda proposta, descrita no capítulo anterior, num mecanismo funcional. A secção inicial descreve os materiais selecionados para a construção da balança, com base em critérios de resistência mecânica, disponibilidade e facilidade de maquinação.

Em seguida, é analisada a base da balança, responsável por suportar toda a estrutura, bem como o circuito elétrico a ser implementado no interior de uma caixa metálica. Nesta parte, são destacados alguns parâmetros que visam a segurança do utilizador durante a operação do equipamento.

São também apresentados os diversos componentes mecânicos que integram o sistema, acompanhados de uma descrição sucinta da sua função e das técnicas de fabrico aplicadas. Os desenhos técnicos correspondentes encontram-se incluídos no Apêndice A, para consulta detalhada.

Por fim, é descrito o processo de montagem dos componentes e a metodologia utilizada para a calibração das células de carga, bem como a utilização prática das interfaces digitais. O capítulo encerra com a execução de ensaios experimentais em túnel de vento, com o objetivo de validar o funcionamento da balança em condições reais de operação.

5.1. Materiais utilizados

Os diversos mecanismos utilizados nas balanças devem ser constituídos por componentes rígidos, uma vez que qualquer deformação nestes elementos pode introduzir erros significativos na orientação do modelo em relação ao escoamento do ar.

A escolha dos materiais para os componentes da balança assume, por isso, grande importância. Estes devem aliar elevada rigidez com massa reduzida, de modo a minimizar deformações indesejadas sem retirar demasiada capacidade das células de carga.

O material que constitui a célula de carga é definido pelo fabricante, não sendo, por isso, alvo de seleção. Por sua vez, os restantes componentes da balança foram fabricados.

O processo de seleção de materiais seguiu as seguintes diretrizes; tem de ser leve para não sobrecarregar as células de carga previamente dimensionadas e tem de ser rígido para evitar deformações não intencionais. Além que têm de ser de fácil maquinação para conseguir utilizar processos de fabrico comuns.

A disponibilidade e custo dos materiais é também um critério de escolha.

O aço é um dos materiais mais comuns. Apresenta elevada rigidez, fruto do seu módulo de elasticidade, e possui boa maquinabilidade. A desvantagem do aço é a elevada massa volúmica, que condiciona o seu uso na conceção de estruturas que depositem a sua massa nas células de carga. De facto, o alumínio, é cerca de três vezes mais leve sendo utilizado em diversas indústrias com especial destaque na indústria aeroespacial e automóvel.

O alumínio tem excelente maquinabilidade e é relativamente fácil de adquirir, embora o seu valor de mercado seja consideravelmente mais alto do que o ferro. Uma desvantagem do alumínio é o seu baixo módulo de elasticidade que poderá induzir deformações não intencionais nos componentes da balança.

O uso de polímeros representa uma solução interessante do ponto de vista da prototipagem. A sua utilização permite construir componentes da balança com recurso a impressão 3D, possibilitando uma validação preliminar de conceitos antes da produção em materiais mais resistentes. Todavia, os polímeros possuem um módulo de elasticidade muito reduzido, sendo materiais dúcteis e muito suscetíveis a deformações mesmo com cargas moderadas.

5.2. Circuito elétrico

Começando pelo invólucro que alberga todo o circuito elétrico, este deve ser capaz de acomodar todos os componentes eletrónicos, protegendo-os contra pó, humidade e outros agentes externos que possam comprometer o seu funcionamento. Adicionalmente, o invólucro tem a função de garantir que o operador da balança não estabelece contacto direto com o circuito elétrico, garantindo assim a sua segurança durante a utilização da balança.

Foi selecionada uma caixa metálica concebida especificamente para a instalação de componentes elétricos, já equipada com um ponto de ligação à terra para proteção em caso de descarga elétrica. Esta caixa integra as três interfaces responsáveis pela visualização das forças geradas pela interação do modelo em estudo com o fluido envolvente, bem como um botão para ligar e desligar todo o sistema.

A caixa dispõe ainda duas fichas que estabelecem a ligação entre as interfaces e os cabos provenientes das células de carga. A utilização de fichas, em vez de ligações permanentes, visa tornar o sistema mais versátil, permitindo a sua desmontagem e reconfiguração de forma simples, caso seja necessário adaptá-lo a outras aplicações.

A Figura 23 (a), é a modelação tridimensional da caixa que definiu a posição de todos os elementos culminando posteriormente na construção e fixação dos diversos aparelhos, fichas e botões, Figura 23 (b). O desenho técnico deste componente pode ser consultado no apêndice A.



(a)



(b)

Figura 23 – Quadro elétrico. (a) Modelação em CAD. (b) Componente construído.

Tal como explicado anteriormente no subcapítulo 4.3.1, o tratamento de dados realiza-se através de três interfaces especificamente concebidas para células de carga. Assim, como parte do processo construtivo da balança, foi necessário implementar as ligações elétricas previamente definidas de acordo com o esquema da Figura 24.

Os controladores das células de carga apresentam diversos pinos, dos quais apenas seis são utilizados para o projeto conforme ilustrado na Figura 24. Os pinos 9 e 10 correspondem à alimentação do aparelho, operando em corrente alternada de 100 V a 240 V. Os terminais 5 e 6 fornecem alimentação à célula de carga, enquanto que os pinos 7 e 8 transmitem o sinal negativo e positivo, respetivamente, gerado pela deformação da célula.

O circuito elétrico inclui um disjuntor destinado à proteção do operador e dos componentes eletrónicos. A corrente elétrica flui pelo circuito até chegar a um botão responsável por ligar e desligar toda a balança.

No interior de cada aparelho o sinal é amplificado e convertido em força exibida no visor.

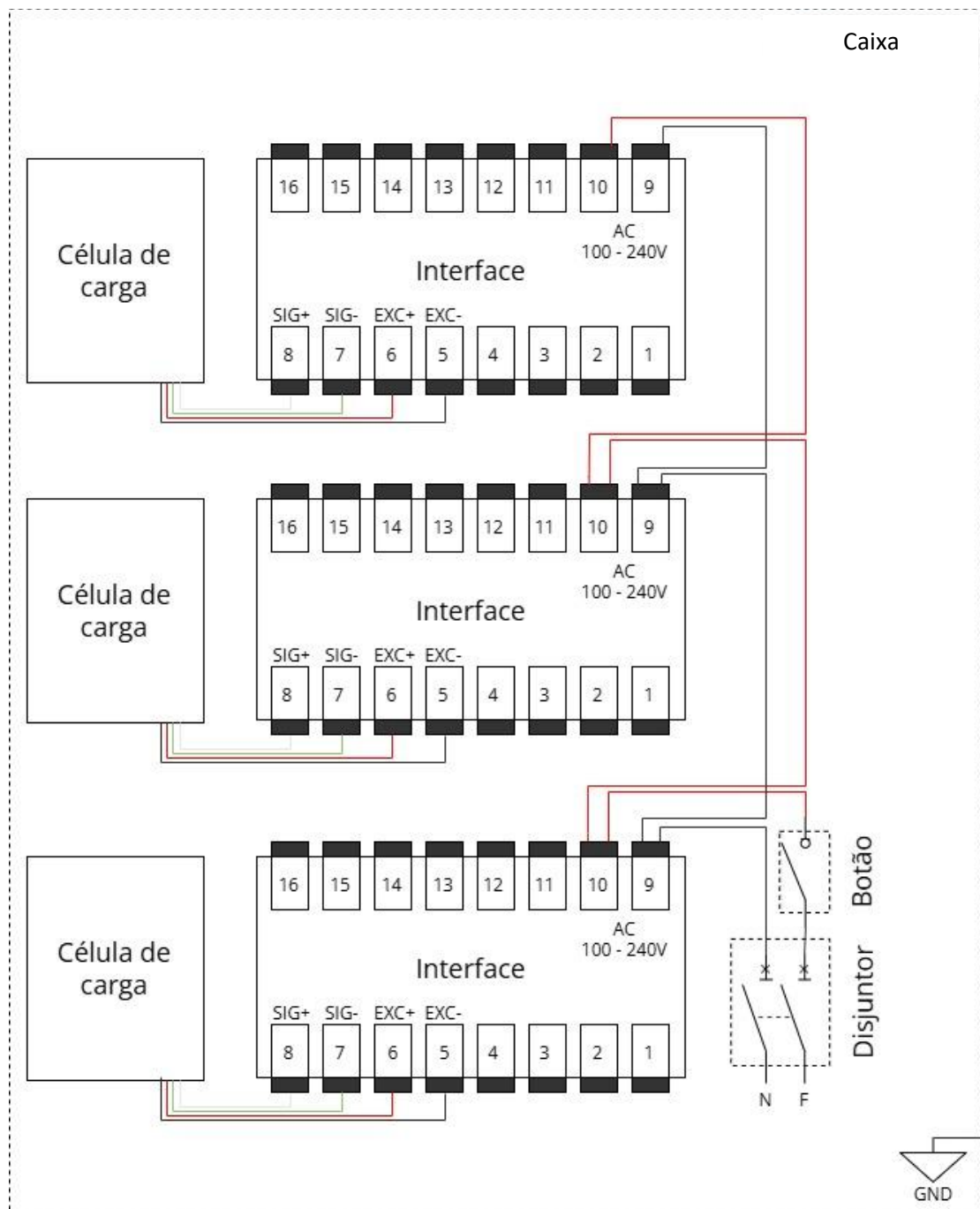


Figura 24 – Esquema do circuito elétrico da balança.

A Figura 25 (a) destaca o disjuntor utilizado, um aparelho do fabricante ABB de classe 6, consegue trabalhar com picos de correntes até 6 kA, interrompendo o circuito elétrico sempre que esse valor é excedido. Na Figura 25 (b), são mostrados os três aparelhos do fabricante ConTronix® responsáveis por controlar e receber os sinais provenientes das células de carga.



(a)



(b)

Figura 25 – Circuito elétrico. (a) Disjuntor. (b) Interfaces.

5.3. Elementos estruturais

As células de carga destinadas à medição da sustentação e do arrasto devem ser posicionadas de forma perpendicular entre si, assegurando que o elemento que as une, Figura 26 (a), seja indeformável e estruturalmente robusto.

Para esse fim, foi utilizada uma cantoneira de aço, que elimina a necessidade de utilizar partes móveis e assim evitar o aparecimento de forças de atrito. Esta solução simplifica o processo de fabrico uma vez que basta cortar a cantoneira e realizar as furações necessárias para a fixação das células de carga.

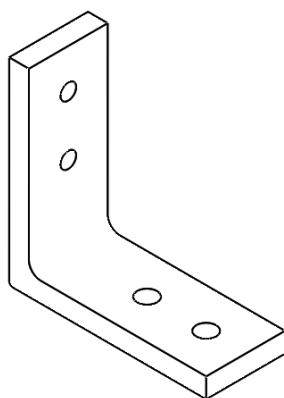
A escolha do aço, entre os vários materiais possíveis, foi motivada pela sua disponibilidade e facilidade de obtenção durante a fase de construção. A elevada rigidez à deformação conferida por este material revelou-se adequada para um dos componentes estruturais essenciais da balança.

Contudo, numa perspetiva de otimização, a utilização de ligas de alumínio de elevada resistência seria preferível. Estas ligas permitem reduzir significativamente a massa do

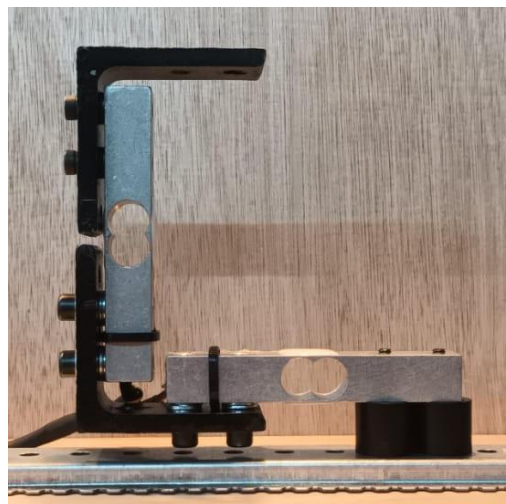
componente, preservando a elevada resistência mecânica e boa maquinabilidade do aço. Considerando a produção em pequena escala, os custos associados à sua fabricação seriam considerados aceitáveis.

Com o objetivo de fazer a balança o mais compacta possível, de forma a assegurar a sua compatibilidade com diferentes configurações de túneis de vento, isto é, garantir o seu funcionamento independentemente do espaço disponível sob a secção de estudo, os furos nas cantoneiras foram posicionados de modo a permitir a montagem compacta das células de carga, mas sem contacto físico entre elas.

Esta configuração, representada na Figura 26 (b), exigiu a utilização de espaçadores, cuja função é garantir que as células de carga permanecem isoladas da estrutura metálica envolvente, nomeadamente da calha perfurada, prevenindo que estas estabeleçam contato quando sujeitas a uma força.



(a)



(b)

Figura 26 – Cantoneira. (a) Modelação em CAD. (b) Fixação das células de carga.

A base da balança, parcialmente destacada na Figura 27 (a), é constituída por um tabuleiro de aço, cuja função é conferir estabilidade ao sistema e fornecer pontos de amarração para a fixação de uma calha de aço perfurada. Esta calha, com múltiplos furos ao longo do seu comprimento, permite ajustar a posição das células de carga em relação à base.

O tabuleiro incorpora quatro parafusos roscados, distribuídos nos seus quatro cantos, conforme destacado na Figura 27 (b). Estes elementos permitem o nivelamento preciso da estrutura, operação essencial para garantir que as medições realizadas pelas células de carga não são influenciadas por inclinações indesejadas da base.

A placa de aço utilizada possui uma espessura de 6 mm, valor escolhido com o objetivo de aumentar a massa do sistema e, conseqüentemente, melhorar a sua estabilidade durante os ensaios. Esta massa adicional contribui para evitar movimentos indesejados da balança

resultante das forças aerodinâmicas aplicadas ao modelo. Adicionalmente, a espessura selecionada permite a criação de roscas diretamente na placa, facilitando a fixação dos pernos roscados sem a necessidade de componentes adicionais.

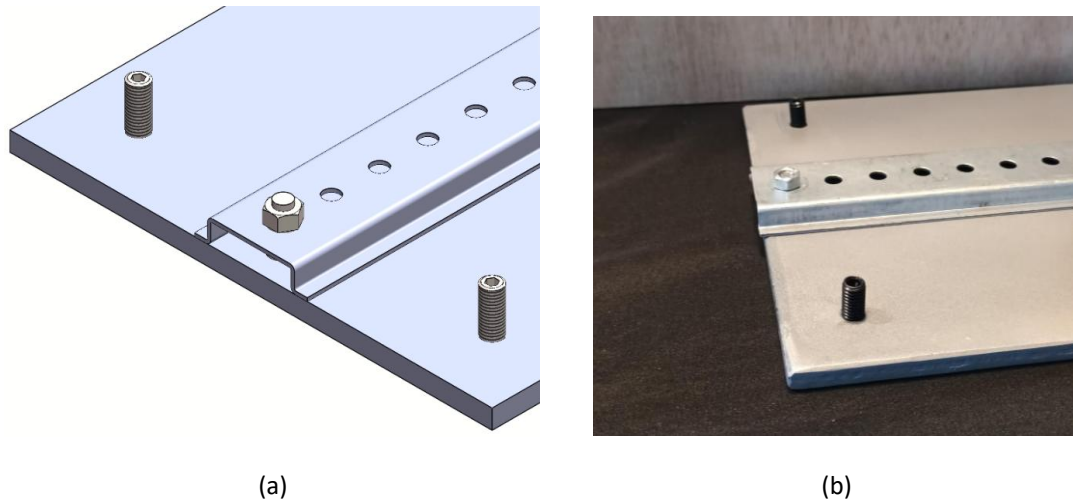


Figura 27 – Base da balança. (a) Modelação em CAD. (b) Construção.

A estrutura adicional representada na Figura 28 (a) é um segundo tabuleiro, também fabricado em aço, altamente resistente à deformação e de fácil maquinagem. Este componente foi produzido a partir de uma chapa de aço galvanizado com 2 mm de espessura, cortada com recurso a guilhotina e posteriormente quinada para aumentar a resistência à torção e oferecer uma superfície adequada à fixação de outros elementos.

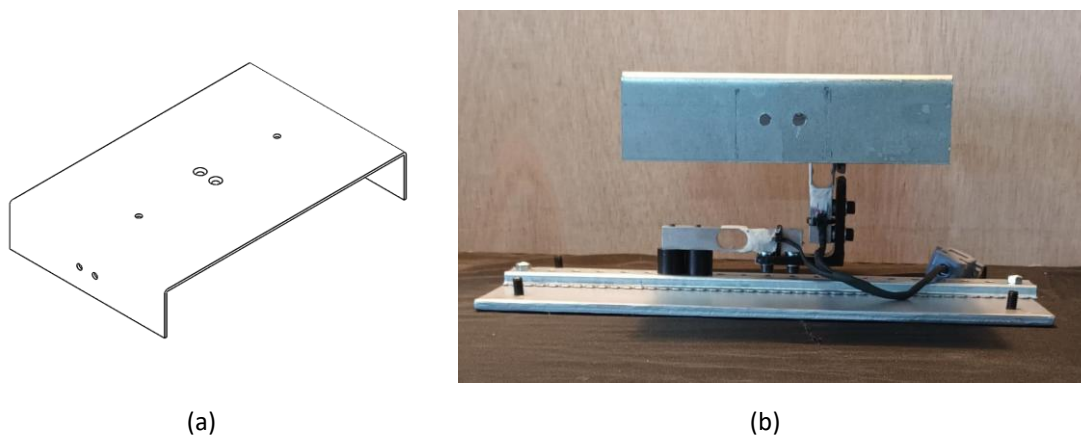


Figura 28 – Tabuleiro superior. (a) Modelação em CAD. (b) Montagem na balança.

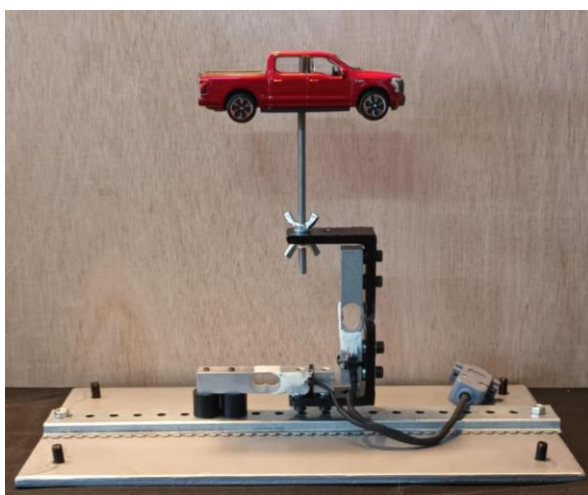
A montagem deste tabuleiro na estrutura da balança é realizada através de dois parafusos com cabeça rebaixada, de modo a garantir uma superfície superior plana, livre para a instalação de modelos.

Na Figura 29 é apresentado um exemplo de fixação de um modelo de automóvel, destinado a ensaios num túnel de vento com secção aberta que tira proveito de uma placa de madeira para simular o solo. Por sua vez, a Figura 30 (a), apresenta uma configuração alternativa, apropriada para ensaios em túneis com secção de estudo fechada.

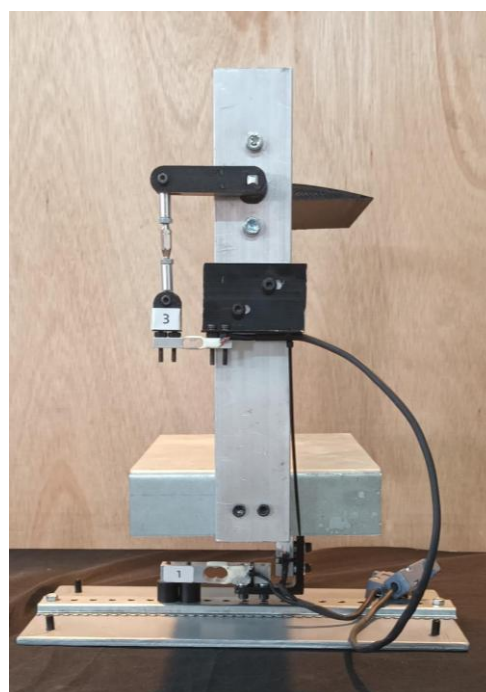
A Figura 30 (b) evidencia ainda a presença de furos nas laterais do tabuleiro, permitindo a amarração de estruturas adicionais, como suportes para ensaios de asas.



Figura 29 – Ensaio a um modelo de automóvel considerando o efeito solo.



(a)



(b)

Figura 30 – Fixação dos modelos para ensaio. (a) Modelo de automóvel sem considerar o efeito solo. (b) Perfil NACA 4412.

5.4. Mecanismo ângulo de ataque

No ensaio de asas, aeronaves ou outros corpos onde o ângulo de ataque seja um parâmetro relevante, é necessário recorrer a um mecanismo que permita não apenas ajustar a posição relativa do modelo face à direção do escoamento do ar, mas também medir o momento gerado.

Tal mecanismo foi desenvolvido com recurso a polímeros, tirando partida das capacidades de prototipagem rápida proporcionadas por uma impressora 3D. Como trabalho futuro, prevê-se a substituição dos componentes poliméricos por peças em aço, fabricadas com o apoio de centros de maquinagem CNC. Esta alteração permitirá melhorar significativamente a rigidez estrutural do conjunto e reduzir potenciais deformações dos componentes durante a realização dos ensaios.

A variação do ângulo de ataque da asa em estudo é realizada por meio de um esticador com rosca esquerda e direita, Figura 31, o que possibilita um ajuste muito preciso. Uma vez definida a posição desejada, esta é fixa através do aperto de duas porcas hexagonais, que imobilizam o modelo na configuração pretendida.

Apesar da sua eficácia, esta solução apresenta limitações. As rótulas esféricas presentes no esticador podem introduzir forças de atrito indesejadas no sistema, afetando a veracidade das medições.



Figura 31 – Esticador.

O momento gerado na asa é convertido em força através de um componente específico, Figura 32 (a), que estabelece a ligação entre o veio e o esticador, proporcionando uma distância conhecida como “a”, com valor de 50 mm, Figura 32 (b). Esta distância é fundamental para otimizar a gama de leitura da célula de carga.

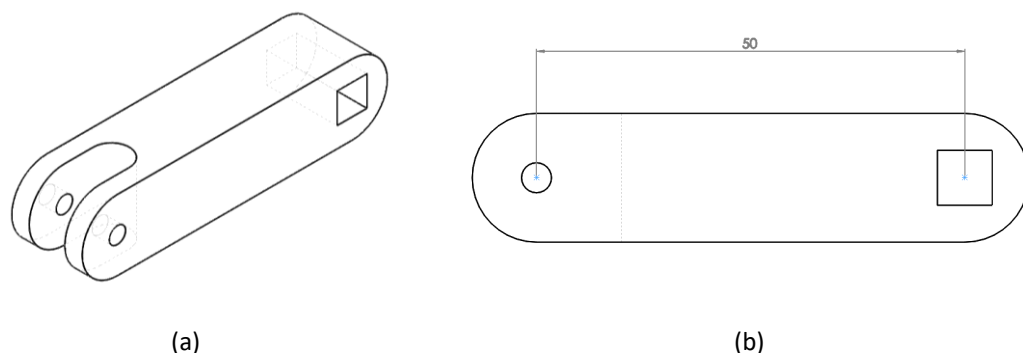


Figura 32 – Conversor de momento. (a) Modelação. (b) Distância “a”.

A célula de carga utilizada para medir a força associada ao momento é fixa à estrutura da balança através de uma cantoneira, Figura 33 (a). Esta cantoneira possui dois rasgos que permitem o ajuste da posição da célula em relação ao esticador, assegurando a perpendicularidade entre os dois elementos quando o ângulo de ataque tem valor zero.

O esticador, por sua vez, interage com a célula de carga por intermédio de um conector, Figura 33 (b).

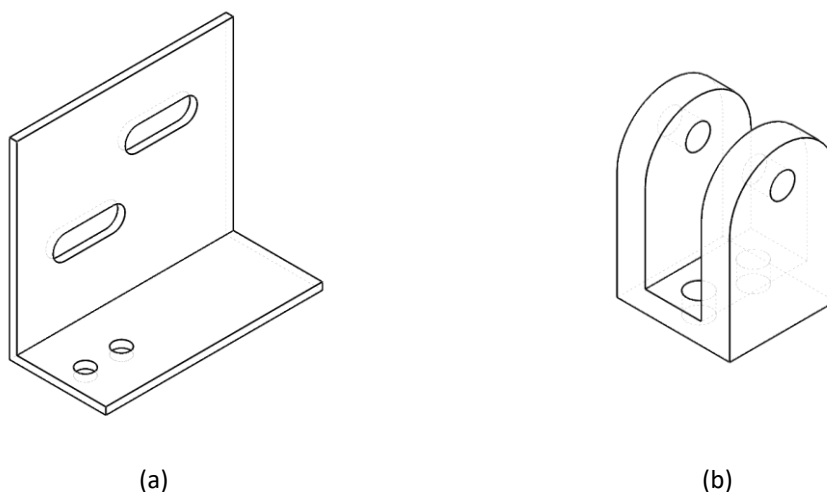


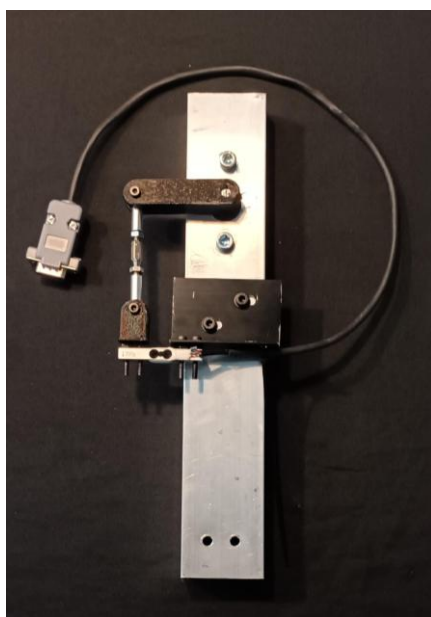
Figura 33 – Componentes para o mecanismo. (a) Cantoneira com rasgos. (b) Conector.

A altura relativa da asa ao tabuleiro superior é definida pelo comprimento de dois tubos retangulares em alumínio, os quais são aparafusados às laterais do tabuleiro. Estes tubos incorporam uma chumaceira no seu interior, responsável por apoiar o veio que interliga o modelo em estudo à célula de carga, bem como fornecer uma base para a fixação da célula destinada a medir momento.

A utilização de chumaceiras garante a livre rotação do veio com atrito mínimo, além de compensar eventuais desalinhamentos resultantes do processo de fabrico do tabuleiro superior.

Dado que a secção do veio é quadrada foi necessário recorrer a um casquilho para acomodar o veio corretamente na chumaceira. Este componente foi fabricado manualmente a partir de um tubo de alumínio, solução que permitiu reduzir significativamente os custos de produção, uma vez que a maquinação do veio em torno ou centro de maquinação representaria um acréscimo considerável no custo do projeto.

A Figura 34 (a) apresenta a montagem completa dos componentes anteriormente descritos, formando o mecanismo que permite ajustar o ângulo de ataque e, em simultâneo, medir o momento gerado no modelo. A Figura 34 (b) demonstra uma versão do mesmo mecanismo sem a célula de carga e sem o esticador, servindo apenas como apoio do modelo na extremidade oposta.



(a)



(b)

Figura 34 – Estruturas para ensaios a asas e perfis aerodinâmicos. (a) Mecanismo para medir momento de cabragem e alterar o ângulo de ataque. (b) Apoio do veio.

O mecanismo atual permite variar o ângulo de ataque entre os -3° e os 10° , estando esta variação limitada geometricamente pela extensão máxima e mínima do esticador.

No entanto, esta solução apresenta uma limitação relacionada com a projeção da distância “a”. Quando o corpo se encontra com um ângulo de ataque de 0° , o momento gerado pode ser calculado diretamente como o produto da força registada pela célula de carga (seta a preto na Figura 35) pela distância “a”.

Contudo, quando $\alpha \neq 0^\circ$ a força gerada pelo momento altera a sua direção e apenas a componente vertical (seta azul na Figura 35) é detetada pela célula de carga. Neste caso, o momento não pode ser calculado diretamente, sendo necessário utilizar apenas a projeção horizontal da distância “a”.

Caso o momento fosse calculado diretamente pelo produto da força registada pela distância “a”, para um qualquer ângulo de ataque, o valor obtido estaria sujeito a um erro devido à variação angular. Para a gama de ângulos de ataque analisada, este erro pode atingir aproximadamente 1,5%. Embora este valor seja reduzido, o erro pode ser eliminado recorrendo à equação (14), onde F representa a força indicada no visor da interface da célula de carga. A projeção da distância “a” é, por sua vez, obtida multiplicando o seu valor pelo cosseno do ângulo de ataque em análise, garantindo assim o cálculo rigoroso do momento para qualquer inclinação considerada.

$$M = F \cdot a \cdot \cos(\alpha) \quad (14)$$

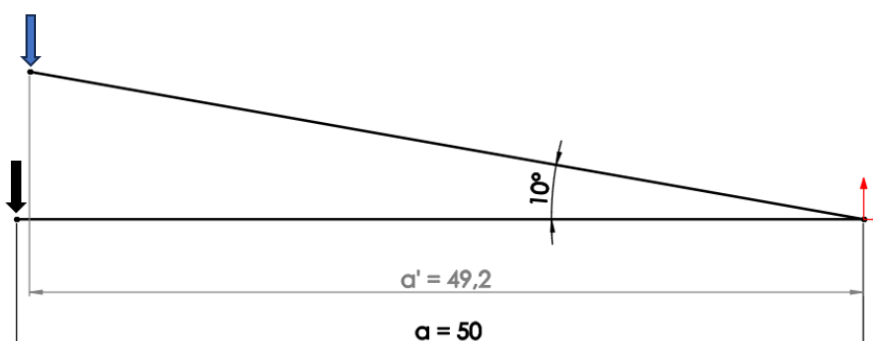


Figura 35 – Projeção da distância “a”.

5.5. Montagem e calibração

Após construção de todos os componentes da balança, procedeu-se à fase de calibração das células de carga. Embora o fabricante indique uma sensibilidade nominal para o sensor, existem sempre pequenas diferenças entre as células. Adicionalmente, as interfaces requerem a configuração de parâmetros como a capacidade da célula de carga, a unidade de medida a ser exibida e a posição do separador decimal.

Este processo de configuração das interfaces pode ser consultado detalhadamente no manual do fabricante dos aparelhos, anexo B.

A calibração em si é relativamente simples de realizar, a célula é fixa a uma base indeformável que assegura estabilidade durante o processo, em seguida são colocadas massas calibradas

sobre a célula enquanto se verifica o valor apresentado na interface, Figura 36 (b). Caso o valor indicado não corresponda à massa aplicada, acede-se ao menu do dispositivo e ajusta-se ligeiramente o parâmetro da sensibilidade até a leitura coincidir com o valor da massa calibrada.

As massas calibradas disponíveis para este processo de calibração, Figura 36 (a), incluem blocos com 100, 50, 20, 10, 5, 2 e 1 grama.



(a)



(b)

Figura 36 – Processo de calibração. (a) Massas calibradas. (b) Calibração da célula.

Com todas as células devidamente calibradas, segue-se a fase de montagem dos corpos a ensaiar. A Figura 37 (a) demonstra como pode ser ensaiado um modelo de automóvel enquanto que a Figura 37 (b) representa a preparação de um ensaio a asas.

Antes de iniciar a realização dos ensaios, é essencial garantir que a balança se encontra corretamente calibrada, ou seja, o valor indicado no visor da interface tem de ser zero. Este processo é geralmente automático aquando do arranque do sistema. No entanto, caso necessário, pode ser realizado manualmente através de um botão presente nas interfaces das células de carga, assinalado por um círculo a verde na Figura 38. Este procedimento assegura que a massa do suporte e do modelo em estudo seja desconsiderada, permitindo que as medições reflitam unicamente as forças geradas durante o ensaio.

Cada interface pode ser configurada para apresentar diferentes unidades de medida (quilonewtons, gramas, quilogramas ou toneladas). Assim, ao realizar um ensaio, é fundamental verificar a unidade selecionada, indicada pela posição da luz vermelha destacada no retângulo azul da Figura 38.

A configuração de alarmes durante a realização dos ensaios pode ser efetuada diretamente na interface da balança. Para aceder ao modo de configuração, deve-se pressionar durante aproximadamente dois segundos o botão identificado com um círculo laranja na Figura 38. Utilizando esse mesmo botão, é possível navegar pelos menus da interface até localizar as opções “OUT 1” e “OUT 2”, correspondentes a dois alarmes distintos que podem ser configurados de forma independente.

Para editar os parâmetros de cada alarme e definir o valor de referência, deve-se pressionar o botão assinalado com um círculo verde na Figura 38. A alteração do valor é realizada através dos dois botões com setas direcionais ($\uparrow/\downarrow$), que permitem incrementar ou decrementar o valor apresentado no visor. Após selecionar o valor pretendido, a confirmação é feita pressionando novamente o botão identificado com o círculo laranja.

Uma vez atingido o valor definido, a interface sinaliza a ocorrência do alarme por meio do acendimento de um LED vermelho e da emissão de um sinal analógico. Este sinal pode ser utilizado para ativar um dispositivo externo, como por exemplo um sistema sonoro.



(a)



(b)

Figura 37 – Preparação da balança. (a) Para ensaio a um modelo de automóvel. (b) Para ensaio a perfis de asas.



Figura 38 – Botões para configuração da interface digital (círculos laranja e verde) e zona de indicação da unidade (retângulo azul).

O custo total de produção da balança é de aproximadamente 330€, sendo o principal investimento associado ao material eletrónico, nomeadamente as células de carga, 20€ cada, e as interfaces digitais, 60€ cada. O quadro elétrico foi adquirido por cerca de 110€ enquanto que as despesas remanescentes correspondem a materiais de construção e elementos de fixação.

5.5.1. Ensaios em túnel de vento

Embora o túnel de vento ainda se encontre em fase de construção nas instalações do ISEP, foi possível realizar ensaios com uma asa baseada no perfil NACA4412 com 100 mm de corda e 200 mm de envergadura, tal como demonstrado na Figura 39. Foram efetuados um total de 15 ensaios com este modelo sendo que em todos eles a velocidade do escoamento do ar foi de 18,1 m/s, medido à temperatura ambiente de 20 °C com um manómetro de pressão diferencial digital em conjunto com um tubo de *Pitot* estático (KIMO Instruments, 2005). Dadas as condições em que ocorreram os ensaios, e o facto de estes terem sido realizados praticamente ao nível do mar, foi assumido o valor da massa volúmica para o ar como $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.



Figura 39 – Perfil de asa utilizado nos ensaios

Com base nos dados disponibilizados pela base de dados *Airfoil Tools* e considerando as condições de ensaio, obteve-se para a asa um C_L de 0,467 e um C_D de 0,014. O C_M , por sua vez, é de $-0,108$. A partir destes valores, e aplicando as equações que permitem calcular as forças (equações 9 a 12), estimaram-se as leituras esperadas nas células de carga, sendo elas 0,191 kgf para a sustentação, 0,006 kgf para o arrasto aerodinâmico e $-0,088$ kgf para o momento.

A preparação do ensaio iniciou com o nivelamento da base recorrendo a um nível de bolha, de forma a garantir que a inclinação da mesa não comprometia as medições. De seguida, procedeu-se à colocação do modelo em estudo, neste caso a asa, e ao ajuste do ângulo de ataque. Como a balança não dispõe de um sistema para medir o ângulo de ataque, os ensaios foram realizados com $\alpha = 0^\circ$, assegurado igualmente com o auxílio do nível de bolha.

O ensaio realizado à asa, Figura 40, reparte-se em três fases distintas, o instante inicial em que o ventilador do túnel de vento é ligado e o escoamento de ar está a estabilizar, seguido de um período de tempo em que se observa a flutuação dos valores procedendo ao registo dos mesmos quando estabilizam, e uma fase final em que o ventilador é desligado e é observado o comportamento da balança, no caso, se esta volta a zero automaticamente.

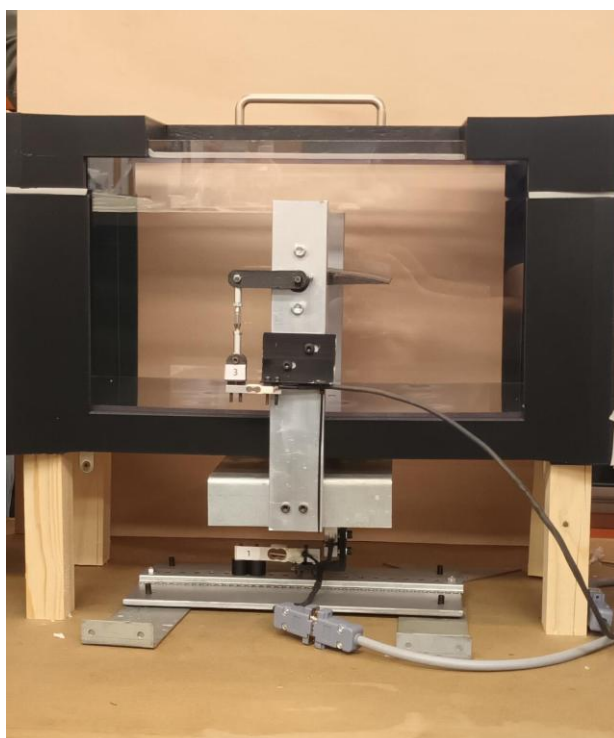


Figura 40 – Ensaio em túnel de vento

Os valores registados nos diversos ensaios encontram-se presentes na Tabela 4 sendo que os valores médios para a sustentação, arrasto aerodinâmico e momento são de $-0,123 \text{ kgf}$, $-0,011 \text{ kgf}$ e $-0,0754 \text{ kgf}$, respetivamente.

Tabela 4 - Registos dos ensaios experimentais

Ensaio	Sustentação (kgf)	Arrasto (kgf)	Momento (kgf)
1	- 0,124	- 0,011	- 0,0760
2	- 0,124	- 0,011	- 0,0752
3	- 0,124	- 0,011	- 0,0765
4	- 0,124	- 0,011	- 0,0748
5	- 0,123	- 0,011	- 0,0751
6	- 0,123	- 0,011	- 0,0750
7	- 0,126	- 0,011	- 0,0750
8	- 0,123	- 0,011	- 0,0757
9	- 0,123	- 0,011	- 0,0748
10	- 0,123	- 0,010	- 0,0759
11	- 0,123	- 0,011	- 0,0748
12	- 0,123	- 0,011	- 0,0751
13	- 0,122	- 0,010	- 0,0753
14	- 0,123	- 0,011	- 0,0752
15	- 0,123	- 0,011	- 0,0763

Após análise aos resultados obtidos, é possível verificar que a balança apresentou medições consistentes, ainda que com pequenas flutuações. Contudo, observou-se uma discrepância significativa entre os valores experimentais e os valores teóricos previstos, a qual poderá estar associada a erros experimentais relacionados com o ângulo de ataque da asa, bem como à ocorrência de forças parasitas, nomeadamente o atrito entre o modelo e as paredes da secção de estudo. Adicionalmente, o facto de o modelo ensaiado ter sido fabricado numa impressora 3D, introduz rugosidade superficial, que poderá alterar de forma significativa o comportamento do escoamento de ar em torno da asa.

A hipótese de incorreta calibração da balança foi descartada, uma vez que, após a realização dos ensaios, massas calibradas foram aplicadas nos sensores e os valores registados corresponderam aos valores de referência.

O facto de os valores serem negativos advém do referencial em uso que define o sentido positivo da sustentação de cima para baixo e o sentido positivo do arrasto aerodinâmico contrário à direção do escoamento de ar. O momento por sua vez, é positivo no sentido horário.

6. Conclusão

A presente dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma balança de três eixos para ensaios em túnel de vento, com aplicação em contexto académico. Após a revisão bibliográfica e análise das soluções existentes, verificou-se que, embora existam diversos tipos de balanças desenvolvidas para fins semelhantes, a informação técnica específica sobre balanças de precisão de três eixos continua escassa. A maioria dos projetos encontrados tem origem em iniciativas de estudantes ou docentes que visam enriquecer a infraestrutura laboratorial das instituições a que pertencem.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, ficou evidente que o processo de conceção de uma balança para túnel de vento não possui uma abordagem única ou universal. Pelo contrário, deve ser adaptado às condições operacionais e aos requisitos experimentais específicos do ambiente onde será utilizada. Neste contexto, foi possível desenhar, construir e calibrar uma balança de três eixos funcional que evita partes móveis e minimiza as interferências mecânicas, recorrendo a três células de carga para registar as forças aerodinâmicas e momento segundo um eixo. Esta abordagem permitiu garantir uma leitura direta e fiável das grandezas físicas envolvidas.

As células de carga selecionadas são utilizadas para medir sustentação, arrasto e momento de cabragem, com capacidades nominais aproximadas de 19,6 N, 9,8 N e 2,9 N, respetivamente. A resolução das células é cerca de 0,0098 N para a sustentação, 0,0049 N para o arrasto e 0,0015 N para o momento, valores que determinam a carga mínima detetável por cada célula.

Apesar dos avanços alcançados, não foi possível realizar uma validação completa da balança, uma vez que esta não possui um sistema de medir o ângulo de ataque. Foram, contudo, realizados testes preliminares com uma asa a 0° , os quais demonstraram coerência e repetibilidade entre os valores registados. No entanto, verificou-se uma discrepância quando comparado aos valores teóricos. Esta diferença pode ser justificada pela rugosidade superficial do modelo utilizado, pela ausência de um sistema de medição do ângulo de ataque e pelo possível aparecimento de forças parasitas, como o atrito resultante da interação do modelo com as paredes da secção de estudo.

Em perspetiva futura, recomenda-se a substituição de componentes críticos, atualmente fabricados em polímeros por impressão 3D, por elementos metálicos com maior rigidez estrutural e menos propensos a deformações. Esta alteração aumentará a durabilidade, estabilidade dimensional e repetibilidade dos resultados, especialmente em ensaios que envolvam a medição do momento. A implementação de um sensor capaz de medir o ângulo de ataque da asa ou a utilização de uma escala calibrada será também uma necessidade futura.

Finalmente, a arquitetura modular da balança concebida assegura a sua adaptabilidade a diferentes configurações de túneis de vento e a uma ampla variedade de corpos de ensaio, garantindo a versatilidade necessária para suportar atividades de investigação científica e o ensino prático no domínio da engenharia.

7. Referências

- Agarwal, K., Vijaykrishnan, V., Mohanty, D., & Murugaiah, M. (2024). A Comprehensive Dataset of the Aerodynamic and Geometric Coefficients of Airfoils in the Public Domain. *Data*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/data9050064>
- American National Standards Institute. (1992). *Recommended Practice for Atmospheric and Space Flight Vehicle Coordinate Systems* (AIAA, Ed.). American Institute of Aeronautics & Astronautics. ISBN 0930403827
- Ball, G. A., & Morey, W. W. (1992). Continuously tunable single-mode erbium fiber laser. In *OPTICS LETTERS* (Vol. 17, Issue 6). <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/OL.17.000420>
- Barlow, J. B. ., Rae, W. H. ., & Pope, Alan. (1999). *Low-speed wind tunnel testing*. John Wiley & sons. ISBN 0471557749
- Barr, A. D., Clarke, S. D., Tyas, A., & Warren, J. A. (2017). Electromagnetic Interference in Measurements of Radial Stress During Split Hopkinson Pressure Bar Experiments. *Experimental Mechanics*, 57(5), 813–817. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0280-4>
- Bjerkkan, L., Hjelme, D. R., & Johannessen, K. (1996). Bragg Grating Sensor Demodulation Scheme using a Semiconductor Laser for measuring Slamming Forces of Marine Vehicle Models. *Optical Fiber Sensors*, We316. <https://doi.org/10.1364/OFS.1996.We316>
- Burns, D. E., & Parker, P. A. (2020). Additively manufactured wind-tunnel balance. *Journal of Aircraft*, 57(5), 958–963. <https://doi.org/10.2514/1.C035889>
- Burns, D. E., & Parker, P. A. (2023, January 23). A Single-Piece Wind Tunnel Balance with a Universal Metric End. *AIAA SCITECH 2023 Forum*. <https://doi.org/10.2514/6.2023-2339>
- Burns, D. E., Parker, P. A., Phillips, B. D., Webb, T. L., & Landman, D. (2020). *Wind Tunnel Balance Design: A NASA Langley Perspective*. ID 20200002944
- Calautit, J. K., Chaudhry, H. N., Hughes, B. R., & Sim, L. F. (2014). A validated design methodology for a closed-loop subsonic wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 125, 180–194. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.12.010>
- Cattafesta, L., Bahr, C., & Mathew, J. (2010). Fundamentals of Wind-Tunnel Design. In *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae532>
- Chanetz, B. (2017). A century of wind tunnels since Eiffel. In *Comptes Rendus - Mecanique* (Vol. 345, Issue 8, pp. 581–594). Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2017.05.012>
- Cummings, R. M., & Schütte, A. (2014). The NATO STO task group AVT-201 on “extended assessment of stability and control prediction methods for NATO air vehicles.” *32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2014-2000>
- Curry, E. J., Ke, K., Chorsi, M. T., Wrobel, K. S., Miller, A. N., Patel, A., Kim, I., Feng, J., Yue, L., Wu, Q., Kuo, C. L., Lo, K. W. H., Laurencin, C. T., Ilies, H., Purohit, P. K., & Nguyen, T. D. (2018). Biodegradable piezoelectric force sensor. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(5), 909–914. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710874115>

- Dattatray Jathar, L., & Borse, S. (2019). Determination of Coefficient of Lift And Lift Force on Sedan Car Body by Changing Different Parameters Using Open Foam. *International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering (IJRMEE)*, 1(5), 10–18. <http://www.ijrmee.org>
- de Almeida, O., de Miranda, F. C., Ferreira Neto, O., & Saad, F. G. (2018). Low subsonic wind tunnel - Design and construction. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 10. <https://doi.org/10.5028/jatm.v10.716>
- Douglas L, M., & William F, M. (1995). *RACE CAR VEHICLE DYNAMICS*. SAE International. ISBN 9781560915263
- Etkin, B., & Duff Reid, L. (1995). *Dynamics of Flight: Stability and Control* (Wiley, Ed.; 3ª Edição). ISBN 0471034185
- Ewald, B. F. R. (2000). in the UK Multi-component force balances for conventional and cryogenic wind tunnels. In *Meas. Sci. Technol* (Vol. 11). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/6/201>
- Ewald, B., & Hufnagel, K. (1997). The Development of Advanced Internal Balances for Cryogenic and Conventional Tunnels. In *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics* (Vol. 60, pp. 36–47). https://doi.org/10.1007/978-3-322-86573-1_5
- Farries, M. C., Ragdale, C. M., & Reid, D. C. J. (1992). Broadband chirped fibre Bragg filters for pump rejection and recycling in erbium doped fibre amplifiers. *Electronics Letters*, 28(5), 487–489. <https://doi.org/10.1049/el:19920307>
- Foot, P. D., Read, I. J., Slack, T. J., Ball, A., Jackson, P., Rao, Y. J., & Zhang, L. (1996). Optical fibre Bragg sensors systems: a basis for aircraft health and usage monitoring. *J. Smart Mater.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1117/12.887318>
- Hashir, S., Shah Banuri, A., Qureshi, K. R., Qayyum, U., & Ahmed, A. (2020). *Investigation of Drag Coefficients for Various Car Models*. <https://doi.org/10.1109/IBCAST47879.2020.9044503>
- Hufnagel, K. (2022). *Experimental Fluid Mechanics Wind Tunnel Balances*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-97766-5>
- Iwakawa, A., Osuka, T., Shoda, T., Sasoh, A., & Kawazoe, H. (2015). Ring-Force Balance System for Small Wind Tunnels. In *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* (Vol. 13). <https://doi.org/10.2322/tastj.13.51>
- Jeffery, W. (2016, March 30). *How to Improve Aerodynamics with our Single Point Load Cells and Digital Indicators*. Applied Measurements.
- Kara, E., & Öztürk, K. (2024). Numerical analysis of a mini wind tunnel and experimental investigation of the mini wind tunnel utilizing a portable, three-axis load/balance measurement system. *Gumushane Universitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(2), 623–638. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1418085>
- Katz, J. (2016). *AUTOMOTIVE AERODYNAMICS* (T. Kurfess, Ed.). Wiley.
- Kersey, A. D., & Marrone, M. J. (1994). *Fiber Bragg grating high-magnetic-field probe*. 53. <https://doi.org/10.1117/12.184991>
- Kim, G. S. (2007). Design of a six-axis wrist force/moment sensor using FEM and its fabrication for an intelligent robot. In *Sensors and Actuators, A: Physical* (Vol. 133, Issue 1, pp. 27–34). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.03.038>
- Kim, K., Kim, J., Jiang, X., & Kim, T. (2021). Static Force Measurement Using Piezoelectric Sensors. In *Journal of Sensors* (Vol. 2021). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2021/6664200>
- KIMO Instruments. (2005). *Smart Multi-Functions Devices AMI 300 and 300 STD*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.15984345>
- Limited, T. (2024). *Subsonic Wind Tunnel 600mm*. <https://www.tequipment.com/>

- Lv, P., Mohd-Zawawi, F., Benard, E., Prothin, S., Moschetta, J.-M., & Morlier, J. (2013). Adaptive proprotors as applied to convertible MAVs optimum twist of MAVion proprotor. *International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (IMAV2013)*.
- Maltauro, M., Concheri, G., & Meneghello, R. (2025). Functional geometric characterization of lifting airfoil: An ICP based metrological approach. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117666>
- Mattuella, J. M. L., Loredou-Souza, A. M., Oliveira, M. G. K., & Petry, A. P. (2016). Wind tunnel experimental analysis of a complex terrain microsite. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 54, pp. 110–119). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.088>
- Min, Y., Zhao, G., Pan, D., & Shao, X. (2023). Aspect Ratio Effects on the Aerodynamic Performance of a Biomimetic Hummingbird Wing in Flapping. *Biomimetics*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/biomimetics8020216>
- Mizrahi, V. (1993). Components and devices for optical communications based on UV-written-fiber phase gratings. *Conference on Optical Fiber Communication/International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication*, FA8. <https://doi.org/10.1364/OFC.1993.FA8>
- Muller, I., Machado De Brito, R., Pereira, C. E., & Brusamarello, V. (2010). Title Byline Load Cells in Force Sensing Analysis-Theory and a Novel Application A Ring-type Load Cell. <https://doi.org/10.1109/MIM.2010.5399212>
- Ouellette, F. (1991). All-fiber filter for efficient dispersion compensation. *Optics Letters*, 16(5), 303. <https://doi.org/10.1364/OL.16.000303>
- Pieterse, F. F. (2010). *The application of optical fibre Bragg grating sensors to an internal wind tunnel balance*.
- Rao, Y. J., Webb, D. J., Jackson, D. A., Zhang, L., & Bennion, I. (1996). High-resolution, wavelength-division-multiplexed-in-fibre Bragg grating sensor system. *Electronics Letters*, 32(10), 924–926. <https://doi.org/10.1049/el:19960589>
- Rao, Y.-J. (1997). In-fibre Bragg grating sensors. In *Meas. Sci. Technol* (Vol. 8). <http://iopscience.iop.org/0957-0233/8/4/002>
- Society of Automotive Engineers. (1994). *Vehicle Aerodynamics Terminology*. SAE International. https://doi.org/10.4271/J1594_199412
- Tavakolpour-Saleh, A. R., & Sadeghzadeh, M. R. (2014). Design and development of a three-component force/moment sensor for underwater hydrodynamic tests. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 216, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.05.001>
- Tavakolpour-Saleh, A. R., Setoodeh, A. R., & Gholamzadeh, M. (2016). A novel multi-component strain-gauge external balance for wind tunnel tests: Simulation and experiment. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 247, 172–186. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.05.035>
- TecQuipment. (2020). *Computer Controlled Subsonic Wind Tunnel-C15*. <http://www.armfield.co.uk/c15>
- Thériault, S., Hill, K. O., Bilodeau, F., Johnson, D. C., Albert, J., Drouin, G., & Béliveau, A. (1997). High-g accelerometer based on an in-fiber bragg grating sensor. *Optical Review*, 4(1), A145–A147. <https://doi.org/10.1007/BF02936013>
- Tomin, M., Scipioni, M., & Gatti, B. (2020). Design, Construction and Testing of a 3-Component Force Balance for Educational Wind Tunnels in Undergraduate Aerodynamics. *Journal of Aviation/Aerospace Education & Research*. <https://doi.org/10.15394/jaaer.2020.1809>
- Wan, L., Negri, S., Spadacini, G., Grassi, F., & Pignari, S. A. (2022). Enhanced Impedance Measurement to Predict Electromagnetic Interference Attenuation Provided by EMI

- Filters in Systems with AC/DC Converters. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(23).
<https://doi.org/10.3390/app122312497>
- Webb, D. J., Surowiec, J., Sweeney, M., Jackson, D. A., Gavrilov, L. R., Hand, J. W., Zhang, L., & Bennion, I. (1996). *Miniature fiber optic ultrasonic probe* (R. P. DePaula & J. W. Berthold III, Eds.; pp. 76–80). <https://doi.org/10.1117/12.255383>
- Williams, J. A. R., Bennion, I., Sugden, K., & Doran, N. J. (1994). Fibre dispersion compensation using a chirped-in-fibre Bragg grating. *Electronics Letters*, 30(12), 985–987.
<https://doi.org/10.1049/el:19940661>
- Yu, P., Liu, W., Gu, C., Cheng, X., & Fu, X. (2016). Flexible piezoelectric tactile sensor array for dynamic three-axis force measurement. *Sensors (Switzerland)*, 16(6).
<https://doi.org/10.3390/s16060819>
- Zhao, Y., Liu, Y., Li, Y., & Hao, Q. (2020). Development and application of resistance strain force sensors. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 20, Issue 20, pp. 1–18). MDPI AG.
<https://doi.org/10.3390/s20205826>

Declaração de Integridade

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração. Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim. Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO. ISEP,

NOME: Gonçalo Luís Couto Campos

Porto, 19 de setembro de 2025

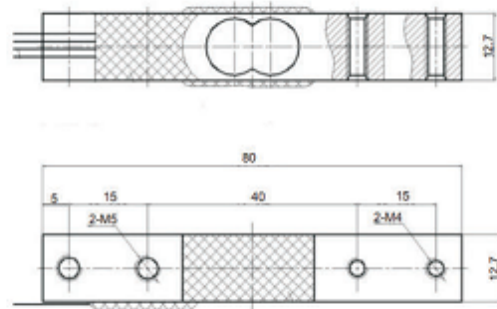
Anexo A

Ficha técnica das células de carga

Micro Load Cell



GML611



FEATURES

- Aluminum alloy, surface anodic oxidation treatment;
- Application: Postal scale, kitchen scale and other miniature electronic weighing equipment.

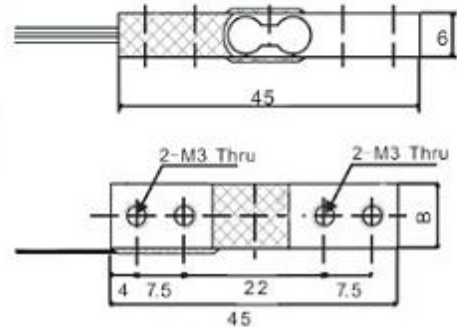
SPECIFICATION

Rated Load	1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50(kg)		
Comprehensive Error	$\pm 0.05\% \text{F.S}$	Operating Temp. Range	$-10 \sim +40^{\circ}\text{C}$
Rated Output	$1.0 \pm 0.15 \text{mV/V}$	Excitation, Recommended	5VDC
Zero Balance	$\pm 0.3 \text{mV/V}$	Excitation, Maximum	3~10VDC
Linearity Error	$\pm 0.05\% \text{F.S}$	Safe Overload	120%F.S
Repeatability Error	$\pm 0.05\% \text{F.S}$	Ultimate Overload	150%F.S
Hysteresis Error	$\pm 0.05\% \text{F.S}$	Insulation Resistance	$\geq 2000 \text{M}\Omega (50 \text{VDC})$
Creep	$\pm 0.05\% \text{F.S/3min}$	Cable	4 Color PVC Wires
Input Resistance	$1000 \pm 50 \Omega$	Cable Length	$\phi 0.8 \times 240 \text{mm}$
Output Resistance	$1000 \pm 10 \Omega$	Ingress Protection	IP65
Temp. Effect on Output	$\pm 0.05\% \text{F.S/10}^{\circ}\text{C}$	Wiring Definitions	Exc+: Red Exc-: Black
Temp. Effect on Zero	$\pm 0.2\% \text{F.S/10}^{\circ}\text{C}$		Sig+: Green Sig-: White

Micro Load Cell



GML616



Rated Load(g)	300	500	750
B(mm)	8	9/9.3	

FEATURES

- Aluminum alloy material, silicone seal, surface anodized treatment;
- Application: Pocket electronic scales, portable electronic scales, kitchen scales, postal scales and other electronic weighing equipment.

SPECIFICATION

Rated Load	300,500,750(g)		
Comprehensive Error	$\pm 0.05\% \text{F.S}$	Operating Temp.Range	$+10 \sim +40^{\circ}\text{C}$
Rated Output	$0.7 \pm 0.15 \text{mV/V}$	Excitation,Recommended	5VDC
Zero Balance	$\pm 0.1 \text{mV/V}$	Excitation,Maximum	3~10VDC
Linearity Error	$\pm 0.05\% \text{F.S}$	Safe Overload	120%F.S
Repeatability Error	$\pm 0.05\% \text{F.S}$	Ultimate Overload	150%F.S
Hysteresis Error	$\pm 0.05\% \text{F.S}$	Insulation Resistance	$\geq 2000 \text{M}\Omega (50 \text{VDC})$
Creep	$\pm 0.1\% \text{F.S}/3 \text{min}$	Cable	4 Color PVC Wires
Input Resistance	$1050 \pm 15 \Omega$	Cable Length	$\varnothing 0.6 \times 110 \text{mm}$
Output Resistance	$1000 \pm 10 \Omega$	Ingress Protection	IP65
Temp. Effect on Output	$\pm 0.05\% \text{F.S}/10^{\circ}\text{C}$	Wiring Definitions	Exc+: Red Exc-: Black
Temp. Effect on Zero	$\pm 2\% \text{F.S}/10^{\circ}\text{C}$		Sig+: Green Sig-: White

Anexo B

Ficha técnica das interfaces para as células de carga

CB92X load cell indicator

Be sure to observe the following precautions clauses which described in the product specification. If you do not comply with the precautions for use, there is a significant risk of resulting in injury or accidents.

Do,

- Do not use at atomic energy equipment medical equipment, etc.,
- The instrument has no power fuses, circuit breakers and other safety fuse. Please prepare the fuses or other safety circuit switch.
- Do not use this product outside of the specifications provided.
- Do not use in explosive places.
- Avoid installing directly over the heat capacity of the instrument (heaters, transformers, high-power resistance).
- If ambient temperature is above 50 °C, please use forced cooling fan or cooler, but do not let the cooling air directly blowing the instrument.
- For panel mounted instruments, in order to prevent users from near high-voltage power supply terminal section, please take the necessary measures in the final device.
- The product installation, commissioning and maintenance by qualified engineering and technical personnel.
- If the fault of the product or abnormal system may cause a major accident, set the appropriate protection circuit outside, in order to prevent accidents.
- The Company does not assume any direct or indirect loss except for the product itself.
- The Company reserves the right to change, without notice to the product specification.

1. General Description

1.YBB is a economical load cell indicator which have Gross, net, peak, valley display function and can be switched at any time.

2.2-way comparison output

3. Six kinds of alarm mode

Peaks and valleys using two comparison values as the threshold. When the real weight exceeds the peak threshold, it make comparison. Conducted comparing the valley below the valley when the real weight is lower than threshold value.

Automatic zero tracking function has sentenced stable function, boot automatically cleared function.

Indicator Definition: 12 lights, alarm 1 and alarm 2, stable.

2. Model Specifications

Model: YBB

Dimensions: Horizontal type 160(W)×80(H)×125(L)

Display mode: Red LED Single window displays 5 digits

Input signal: $\pm 25\text{mV}$ signal

Control output: 2 points

External power supply: 10V / 150 mA

Power source: 220V AC

3. Technical Specifications

Power supply: 85-265VAC, 50Hz, 7.5W

Working environment: 0-50 °C 10-85% RH (No condensation)

Digital Display: 5 digits Red LED

Display range: -19999~45000, When Overload, show o.L

The decimal point position: 5 different positions selectable

Sensor voltage: 10V/150mA

Input signal: 0-±25mV

Sampling rate: 10 times / sec.

Max division display: 10000

countdown from 9 to 0 when the power start-up screen

Power is automatically cleared; Automatically cleared range depends Error Range of parameters.

Comparison of control output: 6 kinds of comparison method, By setting selection

-HH-: the total value of > setpoint output

-LL-: the total value of < setpoint output

HP-S: the gross and given value R_U > positive deviation > set point output

LP-S: the gross and given value R_U < negative deviation > setpoint output

HLP5: the gross and given value R_U of the absolute values of deviations > set value output

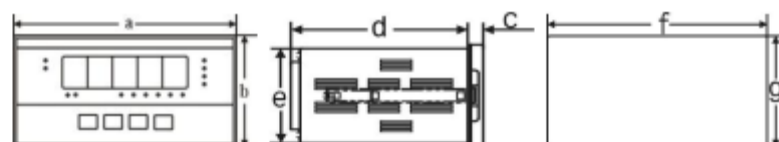
n-HL: the gross and given value R_U of the absolute values of deviations < set value output

4. Installation and wiring

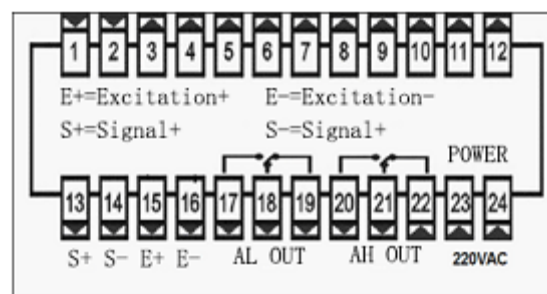
Dimensions Terminal diagram:

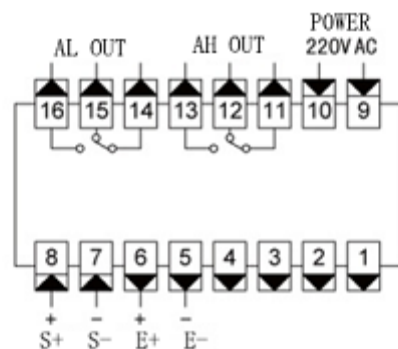
外形尺寸图:

开孔尺寸图:



规格	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	g (mm)
160 × 20	160	80	10	115	75	152.4	76.4
96 × 42	96	48	12	100	43	92.4	45.4



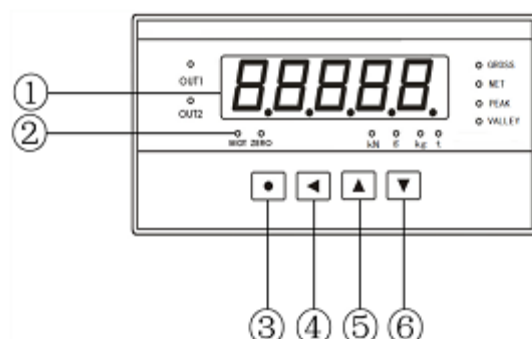


5. Parameter List

The first groupParameters				
Symbol	Name	Content	Ranges	Explanation
out1	OUT1	first comparison value comparison control output	-19999~ 45000	?
out2	OUT2	Second comparison value comparison control output	-19999~ 45000	?
Ru	Au	Compare control output target	-19999~ 45000	?
oR	oA	Password	0~9999	6.4
RLo1	ALo1	The first method of Comparison to control the output	6 kinds	?
RLo2	ALo2	The second method of Comparison to control the output	6 kinds	?
HYR1	HYA1	The sensitivity of first Comparison control output	0~19999	?
HYR2	HYA2	The sensitivity of second Comparison control output	0~19999	?
RHH	AHH	Peak judgment threshold	-19999~ 45000	?
RLL	ALL	Valley judgment threshold	-19999~ 45000	?

The second GroupParameters				
Fi	Fi	Coefficient	0.5000~3.0000	0.1
F-r	F-r	Range	100~45000	0.2
in-b	in-b	Zero	-19999~45000	0.3
mv-u	mv	Sensor sensitivity	0.8000~3.0000	0.4
in-d	in-d	Decimal point position	5 kinds	0.5
Stro	Stro	Power automatically cleared selection	oFF / oN	0.6
Er-r	Er-r	Zero range	0~10000	0.7
Filtr	Filtr	Digital filtering	1~20	0.8
unit	unit	Unit	0~3	0.9
Std	Std	Sentenced stable range	1~100	0.10
tr-d	tr-d	Zero tracking range	0~4	0.11
oR!	oAl	Alarm setpoints password control options	oFF / oN	0.12

6. Operating



6.1 Panel and Button Description

Name		Description
① Display window		Display of measured values, Gross,Net,Peak, valley
② Instruction Light		1) out1, out2 comparison output Instruction Light 2) MOT When lights Indicates the measured values are subject to change 3) ZERO When lights Indicates the measured value is zero 4) GROSS When lights Display gross 5) NET When lights Indicate that the Net worth 6) PEAK When lights Display Peak 7) VALLEY When lights Display valley 8) kg, g, kg, t Is the unit of measurement Indicator
Operation keys	③ Set key 	1) Hold down without releasing, 2 seconds after entering the set state 2) Hold down then release, Within 2 seconds press  Does not release, 2 seconds later entering the calibration status, display cAL 3) Hold down then release, Within 2 seconds press  Does not release, 2 seconds later clearing the peak value.
	④ Left key 	1) When Weight does not fluctuate, r pressing this key At this point the total value As the value of the net deduction, and turn into Ne Valuet display 2) Modify settings change location 3) When setting parameters, Into the parameter modification
⑤ Increase Push button 		1) When in the measurement mode , switch the gross, net, peak, valley display 2) When setting increase the value

⑥ Decreases Push button 	1) If the total value does not exceed the range set is cleared, and the measured value does not change, press the button for 2 seconds to return to zero 2) When set, reducing the modified bit value
--	---

6.2 Parameter settings Explanation

Instrument parameters are divided into two groups. Each parameter where the group is listed in Chapter 5, "Parameter List" in.

★ Group 1: The following parameters and a second set of parameters are password-controlled. If no password was set when not enter.

★ out1, out2, Au: Whether the parameter can be controlled by password or parameter selection.

or: When set to OFF, not password control; When set to ON, if you do not set a password, Although you can enter, Modification, But can not store.

After entering the parameter setting state, if more than one minute without key operation, the instrument will automatically exit the setting mode.

6.3 How to set the compare value at comparison control output

When the comparison value are in first group

① Press 2S without releasing, Enter the set state, display out1

② Single press can choose the other parameters in this group

③ press the parameters of the current value of the original set, flashing bits is correction bits

④ change the correction bit, increase, decrease, change parameter to the desired value

⑤ press Saved the edited parameters, Automatically go to the next parameter. If it is the last parameter of this group, press to go to the first parameter of this group repeat② - ⑤, You can set other parameters in this group.

★ Parameters can not be saved if the modified, it is because of or is ON, This parameter is password controlled, Should set a password firstly.

6.4 Password setting method

When the instrument is measuring the state, can be password settings.

① Press without releasing until out1

② Continuous Press, switch into or

③ Press Enter modification status, use, , to change it to 01111

④ Press, Password setup is complete

★ when the meter is no key operation or electricity more than 1min, password will be automatically cleared.

6.5 Other parameters setting method

① First setting a password according to 6.4

② In the first group, the parameter after or need to set after password setting, press to select

③ Other groups Parameters, Press $\odot$ without releasing, enter the parameters set one by one, Meter display the first parameter symbols in this group.

④ When enter in to the group which need to be set parameter, press $\odot$ to choose the parameter you want to set

⑤ press $\odot$ to find the original set value of the current value, Blinking bit is modified bit

⑥ press $\odot$ to change modified bit, $\odot$ increasing, $\odot$ decreasing, to change the parameter to the one you want

★ If the parameter is in symbolic form, when modified, flashing should be in the last position.

⑦ press $\odot$ Saved the edited parameters and go to the next parameter

Repeat④ - ⑦, You can set other parameters in this group.

Exit Settings: When displaying the parameter symbol, hold down $\odot$ without releasing, Until you exit the parameter setting mode.

7. Control output comparison value Parameter Description

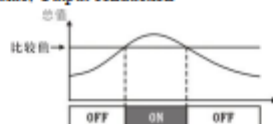
Each control output comparison value has three parameters are used to control the output comparison value, select comparison method and compare the value sensitivity.

out 1, out2 the first and second control output comparison value.

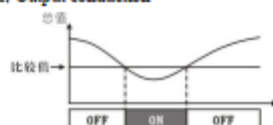
Ru The target value of compare output

RLo1 ~ RLo2 two compare way.

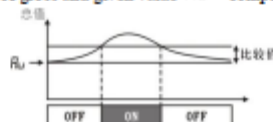
- ▶ All comparison value are to the gross value
- ▶ Every comparison control output point is related with out, RLo, HYS
- ▶ If you choose the 3rd and the 6th comparison method, it related with Ru too.
- ▶ out 1, out2 : Setting The 1st, 2nd comparison control output
- ▶ RLo1, RLo2 : Comparison method setting for the 1st and 2nd comparison output
- ▶ -HH- Gross > comparison value, Output conduction



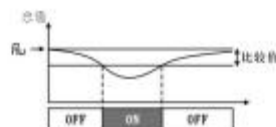
-LL- Gross < comparison value, Output conduction



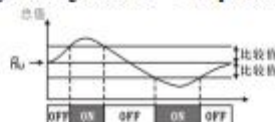
HP-S Positive deviation of gross and given value $Ru > \text{comparison value}$, Output conduction



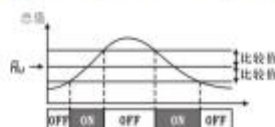
LP-S Negative deviation of gross and given value $Ru > \text{comparison value}$, Output conduction



HLP5 Absolute value deviation of gross and given value > comparison value. Output conduction



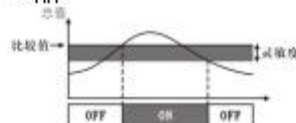
n-HL Absolute value deviation of gross and given value < comparison value. Output conduction



HYR1, HYR2 Comparison output Sensitivity setting for 1st and 2nd point

- sensitivity is based on epitaxial region need to set output recovery, resulting in gross output to prevent the frequent fluctuations in the vicinity of the comparison value ON,OFF.

Example: when comparison method is -HH-



- HHH

When the real weight exceeds peak threshold, new peak comparison. Keep the new peak value until the real weight exceed the peak threshold.

- LLL

- When the real weight below peak threshold, new peak comparison. Keep the new peak value until the real weight below the peak threshold

8. Parameter Description

8.1 F_c Coefficient

Coefficient is full-scale calibration coefficients, factory calibrated. If the user does not modify, even there is no weight, it can be calibrated.

8.2 F_r Range

Sensor range is the sum of many sensor ranges; this parameter is set by the user according to the actual range. F_r is sensor range. Factory setting is 10000.

8.3 z_n Zero

Zero range is -19999-45000, factory setting is 0.

8.4 μ_u Sensor sensitivity

Unit of sensor sensitivity is mv/v, factory setting is 2.0000.

8.5 u_n decimal point position

There are five kinds of decimal point position, 00000., 0000.0, 000.00, 00.000, 0.0000.
Factory setting is 00000.

8.6 **Zero Automatically cleared function**

If power parameter is automatically cleared. When S_{ZRO} = ON, Automatically cleared valid; when S_{ZRO} = OFF, Cleared automatically invalid. Factory setting is ON.

8.7 **Zero Range**

In the measurement mode, the measured value is within the zero range, keep pressing $\odot$ 2 seconds, the displayed value can be zero. Factory setting is 1000

8.8 **Filter Digital filtering**

Force measuring device is affected by its own natural frequency of vibration and external conduction will produce random vibration, so that the display is unstable instrument. When the vibrations is Visual, select the appropriate size digital filtering, the display is stable. When Vibration is small selecting a smaller digital filtering, choose a larger number when vibration is large

Selecting range 1~20. Factory setting is 1.

8.9 **Unit Selection**

0 - t, 1 - kg, 2 - g, 3 - kN

8.10 **Set Sentenced stable range**

When the measured value exceed the setted S_{SD} within 1s, Meter think the force value changes, Mot light is on.

8.11 **Zero tracking range**

If zero force value within the tracking range above or equal to 1s, the reading will be tracked to zero. Zero tracking range from 0 to 4 display division. There is no tracking when it is 0.

8.12 **OFF Password Control Setting**

This parameter determines whether the comparison output set password control:

ON - Comparison output setting is password controlled

OFF - Compare output setting is not password control

9. Calibration instructions

Notice: Close S_{ZRO} Zero tracking before calibration. Do not press ZERO Key to clear. Please Set S_{ZRO} to off. Then you can power the meter to calibrate.

9.1 Automatic calibration

The factory set parameters F_{FC} = 10000 $\bar{N}$ $\bar{U}$ = 2.0000

9.1.1 Automatic zero calibration:

Press $\odot$ then releasing, keep $\odot$ 2s without releasing, goes into calibration status after 2s, when display CAL , press $\odot$, goes into Zero Calibration. After completion of the zero calibration, display 00000, last digital flashing

If only the zero adjustment, no adjustment range, press $\odot$ exit calibration, Return to normal measurement.

9.1.2 Automatic Range calibration

Press $\odot$ releasing, keep pressing $\odot$ without releasing within 2s, goes into calibration status, display CAL .
① Press $\odot$, goes into Zero Calibration. After completion of the zero calibration, display 00000, last digital flashing. Goes in to range calibration.

② Put the standard weight on the measured device, Through $\odot$, $\odot$ and $\odot$ key to set the display value to the standard weight, press $\odot$ to finish calibration.

③ If no need zero calibration, when display CAL press $\odot$ goes in to range calibration, press $\odot$ goes into value modification. Through $\odot$, $\odot$ and $\odot$ to set the display value to the standard weight, after modification press $\odot$ to exit.

★ press $\odot$ before exiting, ensure MOT light is closed.

9.2 No standard weight to calibrate

When the meter leave factory, it has been by the sensitivity and span calibration is complete, users simply set using the sensitivity of the sensor can be used to display the decimal point and range, and then make sure that the correct range and sensitivity of the input conditions, no calibration range.

Example: sensor's sensitivity is 2.002 mv/v, 4 sensor range is 1t, total range is 4t

No standard weight to calibration:

F_{-r}	range	40000
n_{u-u}	Sensor sensitivity	2.0020
ζ_{n-d}	Decimal point position	0.0000

9.3 Manual tuning

Generally when weighing material has been filled, it can not calibrate. We can calibrate by zero and coefficient tuning.

Notice: Please record the ζ_{n-b} and F_{-r} value, because it can not recover after calibration.

9.3.1 Fine tuning Zero

Example:

There is a large storage tank, due to structural or mechanical force sensor status changes which lead to zero great changes. Showing weight not correct. When the tank can not be clear to empty to re-calibrated zero. You can enter zero adjustment methods to calibrate manually.

料罐装有物料, 按照容积估算有 20000kg, 可实际显示有 21000kg, 如果继续添加 1000kg 物料, 显示也会同时增加 1000kg, 则说明重量不准是零点变化引起的, 可以修改零点参数 ζ_{n-b} , 将零点调高 1000kg 即可。

There are 20000kg materials in the tank according to the volum. It can display 21000kg. If you add 1000Kg more, the display also adds 1000kg. This means the weight not correct is because of zero changes. You can modify the zero parameter ζ_{n-b} , to adjust the zero 1000kg high.

Zero adjustment formula:

Displayed value after adjustment = Display value before zero calibration - (ζ_{n-b})

9.3.2 Tuning coefficients

For Example:

Assuming the weight of the weighing platform weight 1000kg, instrument display 997kg, the calibration factor is necessary to increase $1000 \div 997$ is approximately equal to 1.00301, the original calibration coefficient = 2.1672, need to expand the coefficient 2.1672 to 1.00301 times

Factor correction formula:

Displayed value after adjustment = Display value before zero calibration $\times F_{-r}$ - (ζ_{n-b})

- ★ Err 1: Automatic calibration range up to 10000 max, if exceed 10000, display Err 1.
- ★ Err 2: when Automatic calibration range, the input signal number values overrun, maybe F_{-r} is to big.
- ★ Err 3: When the zero adjustment, input signal exceeds the total process 50%
- ★ o.l:

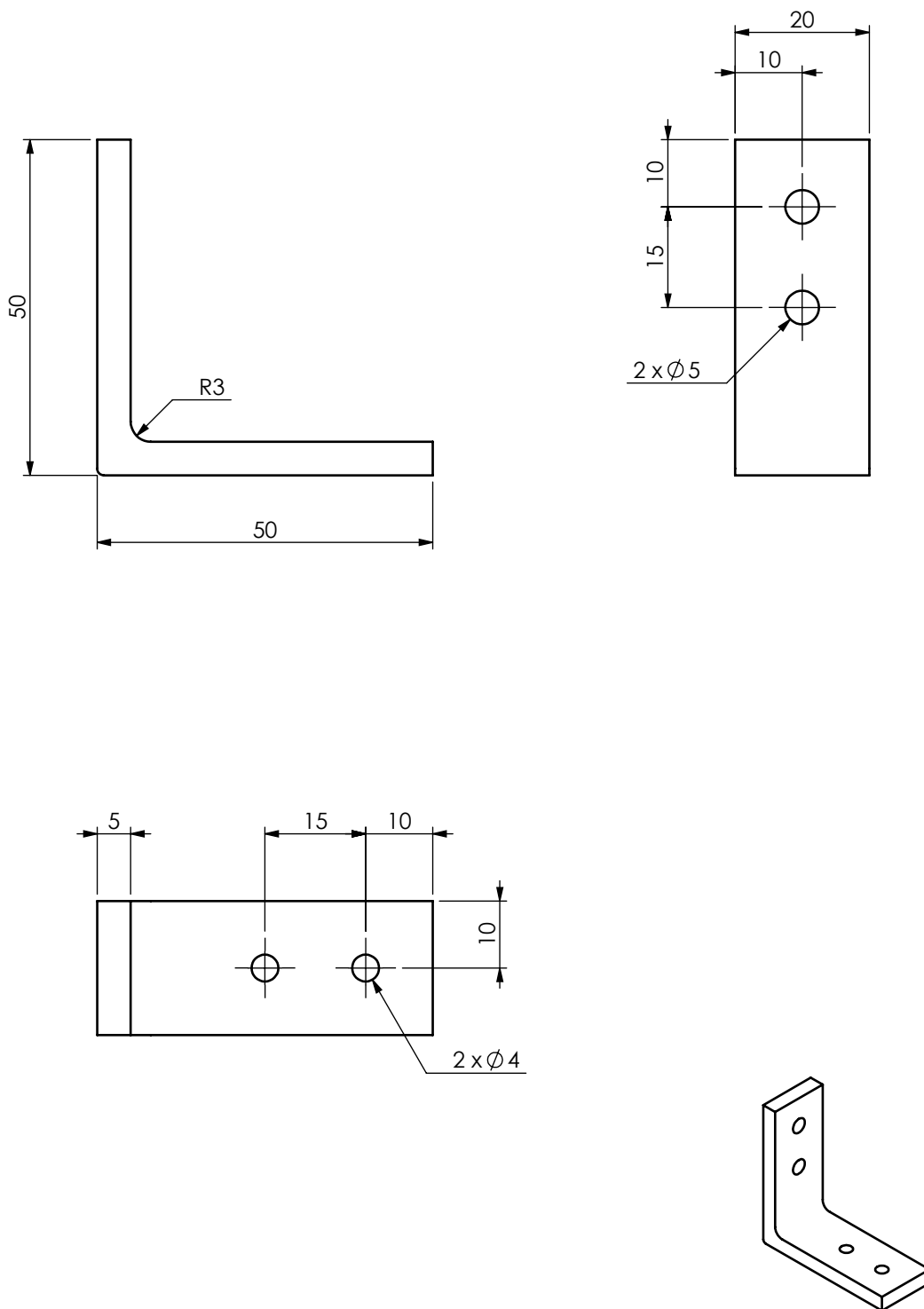
When the instrument input signal, coefficient, range, sensitivity of the product is out of range, display o.l

When measured value is over 45000 or less than -19999, display o.l

When peak or valley, display o.l, clear peak valley, display normally.

Apêndice A

Desenhos técnicos

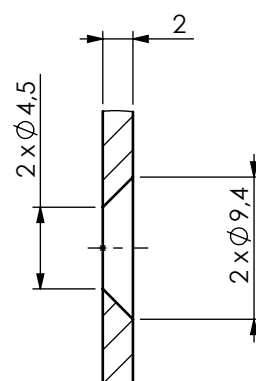
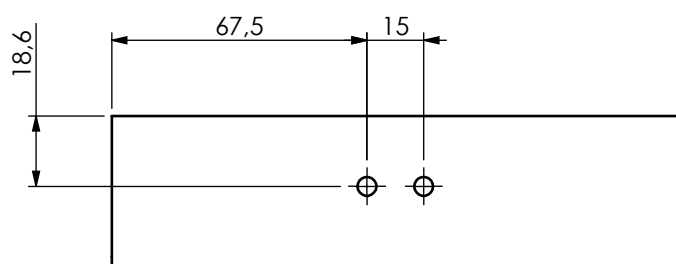
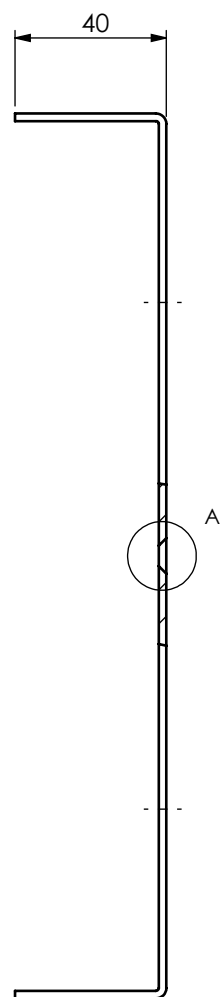
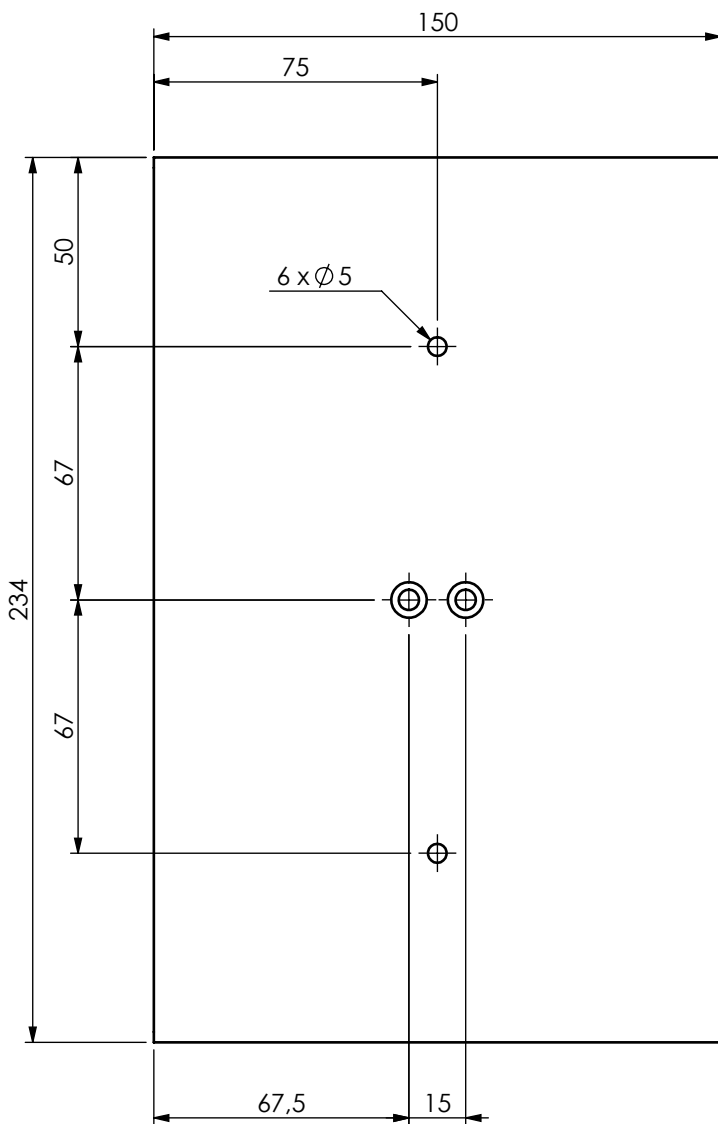


ESCALA
1:1

Material: aço de construção ao carbono

ISO 2768 - mK
ISO 8015
✓ Ra 3,2

Pessoa responsável Gonçalo Campos	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Cantoneira		Número 01_1201248		
				Revisão A	Data de edição 04/06/2025	Língua PT
						Folha 1/1



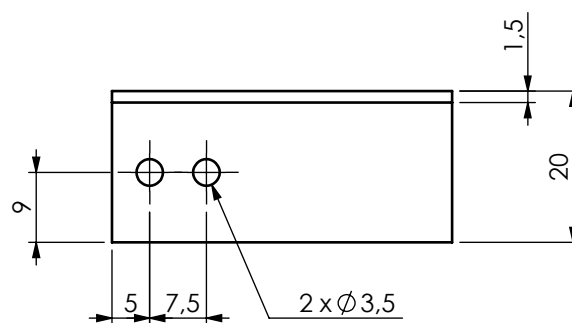
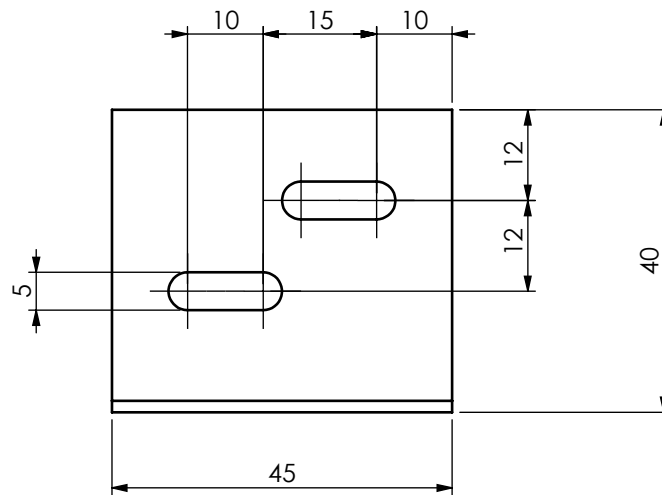
Detalhe A
Escala 2 : 1

ESCALA
1:2

Material: aço de construção ao carbono

ISO 2768 - mK
ISO 8015
√ Ra 3,2

Pessoa responsável Gonçalo Campos	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Chapa quinada		Número 02_1201248		
				Revisão A	Data de edição 04/06/2025	Língua PT
						Folha 1/1

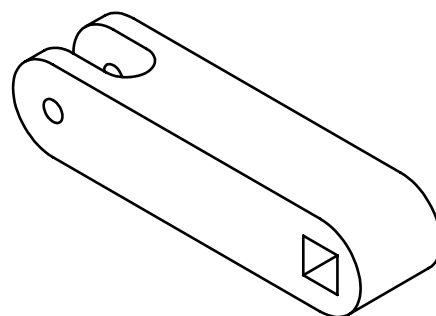
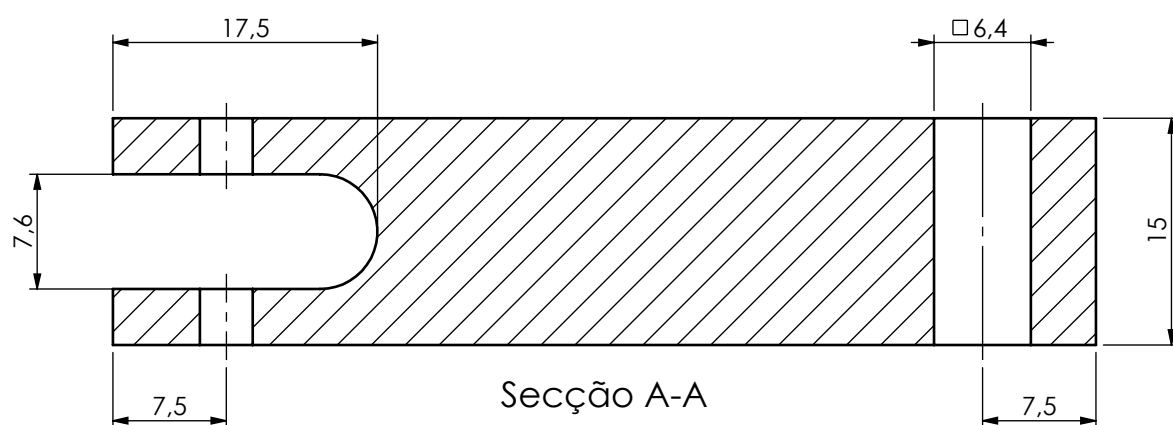
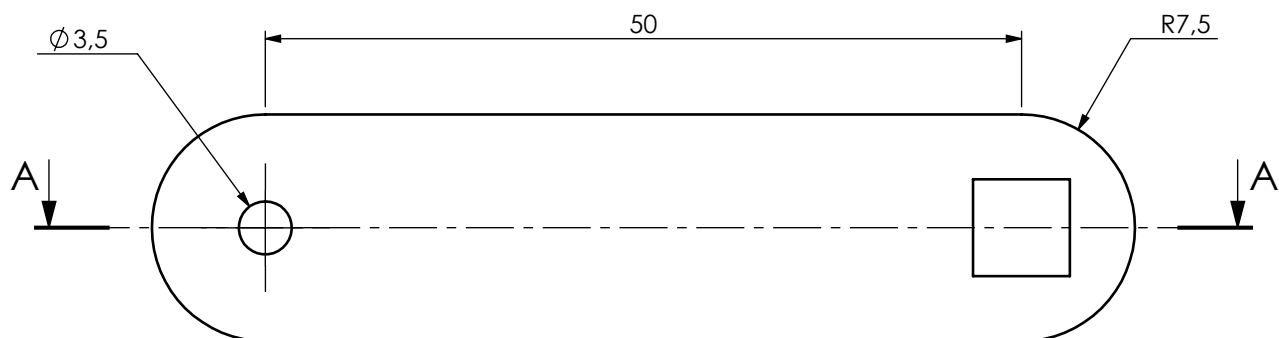


ESCALA
1:1

Material: aço de construção ao carbono

ISO 2768 - mk
ISO 8015
✓ Ra 3.2

Pessoa responsável Gonçalo Campos	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Cantoneira 2		Número 03_1201248		
		Revisão A	Data de edição 08/07/2025	Língua PT	Folha 1/1	

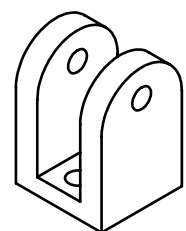
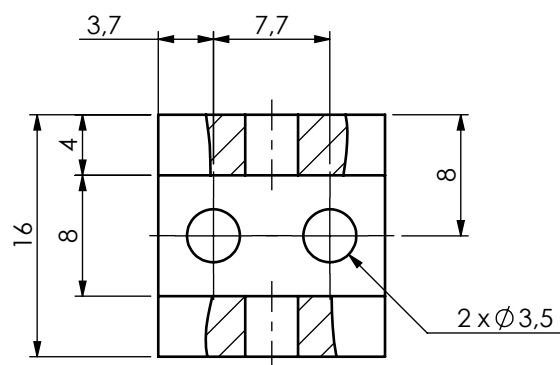
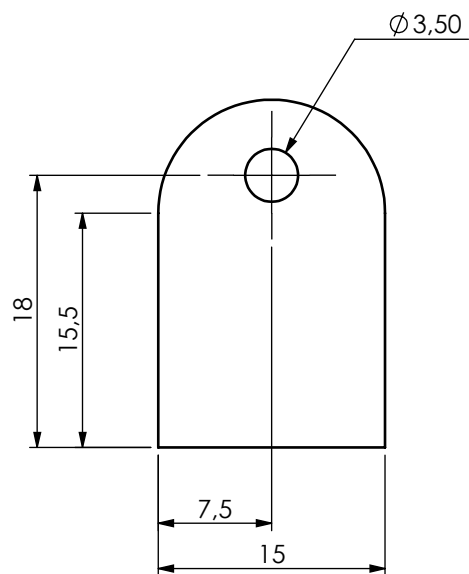


ESCALA
2:1

Material: alumínio

ISO 2768 - mK
ISO 8015
✓ Ra 3,2

Pessoa responsável Gonçalo Campos	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Alavanca		Número 04_1201248		
				Revisão A	Data de edição 08/07/2025	Língua PT
				Folha 1/1		

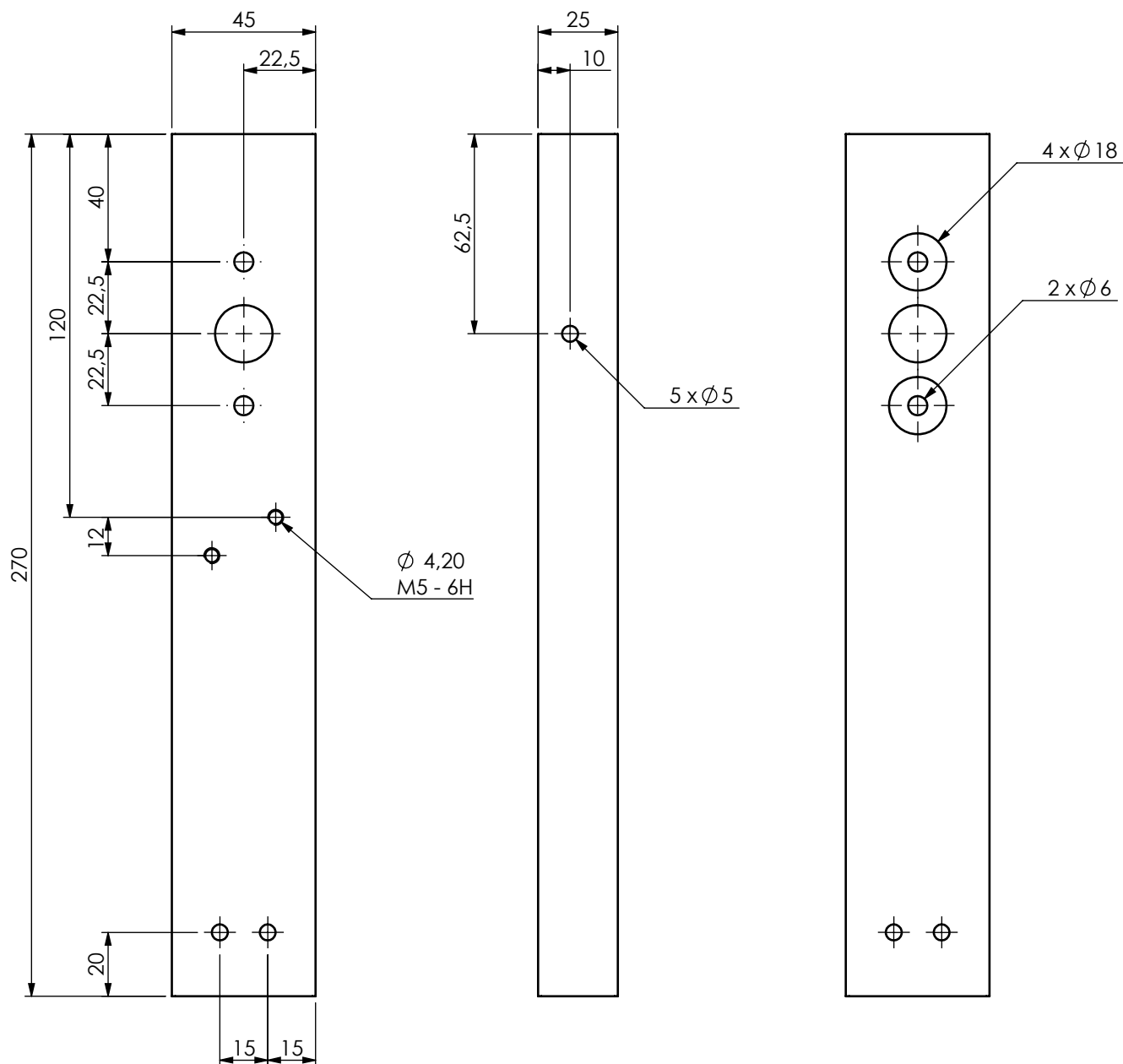


ESCALA
2:1

Material: alumínio

ISO 2768 - mK
ISO 8015
√ Ra 3,2

Pessoa responsável Gonçalo Campos	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Conector		Número 05_1201248		
		Revisão A	Data de edição 08/07/2025	Língua PT	Folha 1/1	

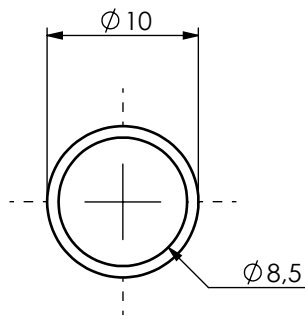


ESCALA
1:2

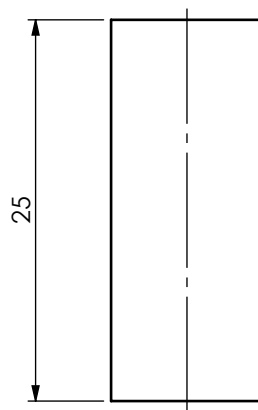
Material: alumínio

ISO 2768 - mk
ISO 8015
√ Ra 3.2

Pessoa responsável Gonçalo Campos	Departamento responsável www.dem.issep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Tubo retangular	Número 09_1201248			
			Revisão A	Data de edição 04/06/2025	Língua PT	Folha 1/1



Raios não cotados: 0,5 mm

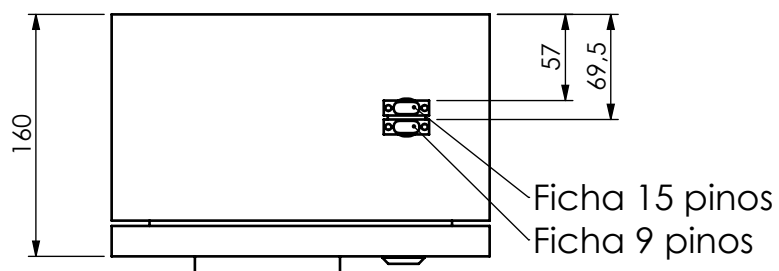
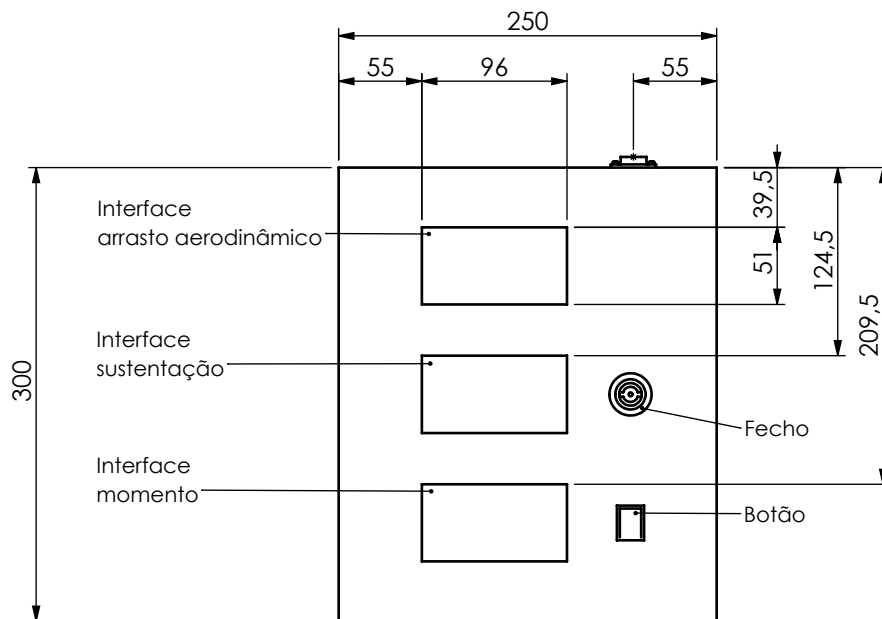


ESCALA
2:1

Material: alumínio

ISO 2768 - mK
ISO 8015
✓ Ra 3,2

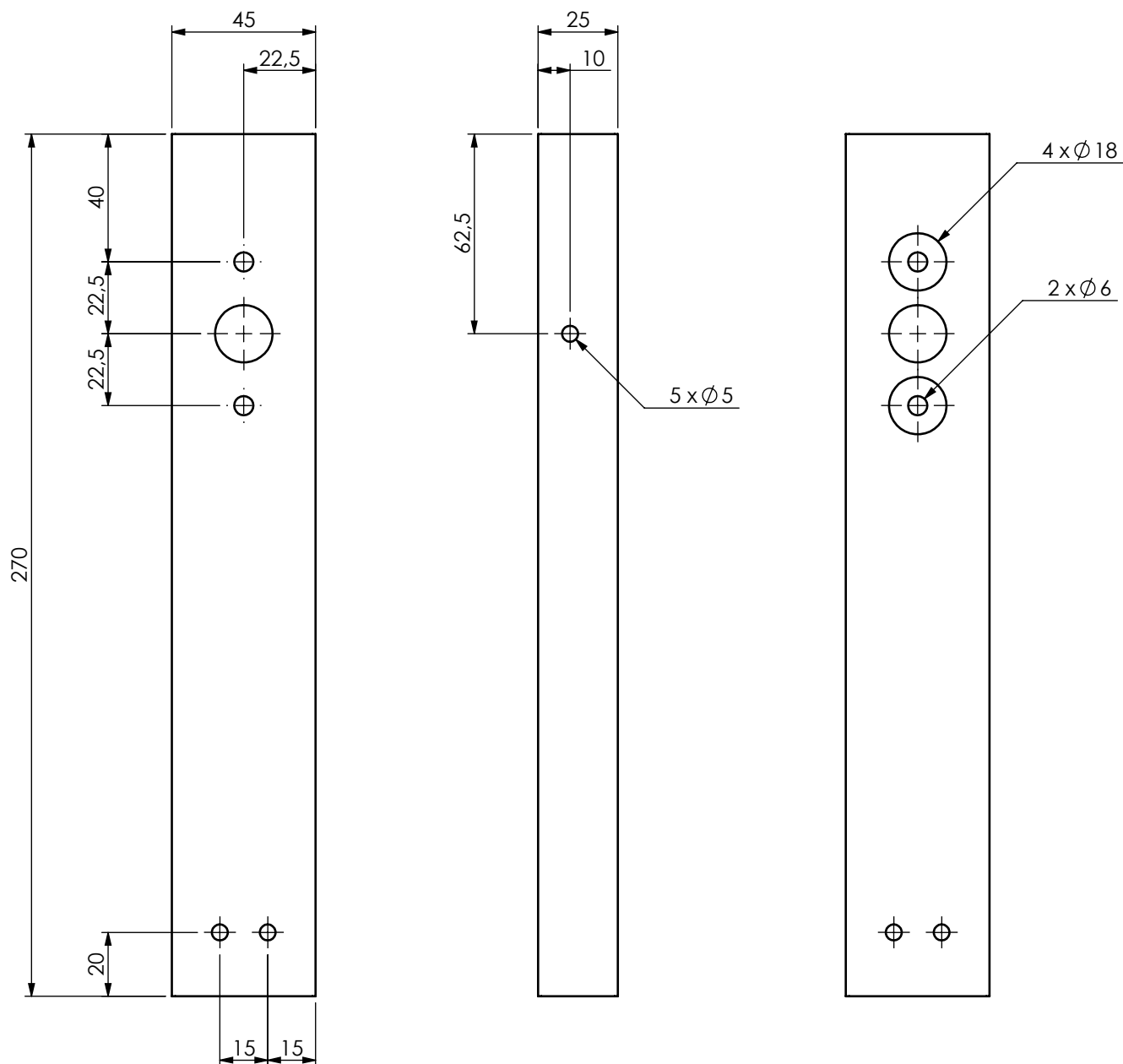
Pessoa responsável Gonçalo Campos	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Casquilho	Número 07_1201248			
			Revisão A	Data de edição 04/06/2025	Língua PT	Folha 1/1



ESCALA
1:5

ISO 2768 - mK
ISO 8015
√ Ra 3,2

Pessoa responsável Gonçalo Campos	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Quadro elétrico		Número 08_1201248		
		Revisão A	Data de edição 04/06/2025	Língua PT	Folha 1/1	

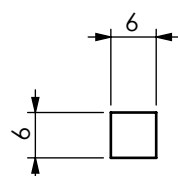
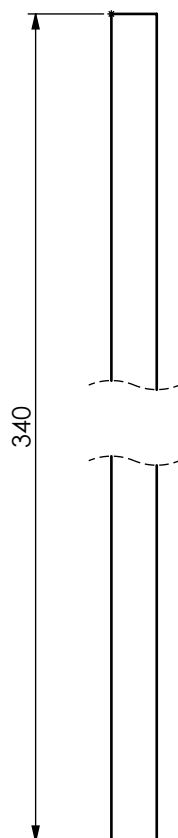


ESCALA
1:2

Material: alumínio

ISO 2768 - mk
ISO 8015
√ Ra 3.2

Pessoa responsável Gonçalo Campos	Departamento responsável www.dem.issep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Tubo retangular - Apoio		Número 06_1201248		
		Revisão A	Data de edição 04/06/2025	Língua PT	Folha 1/1	

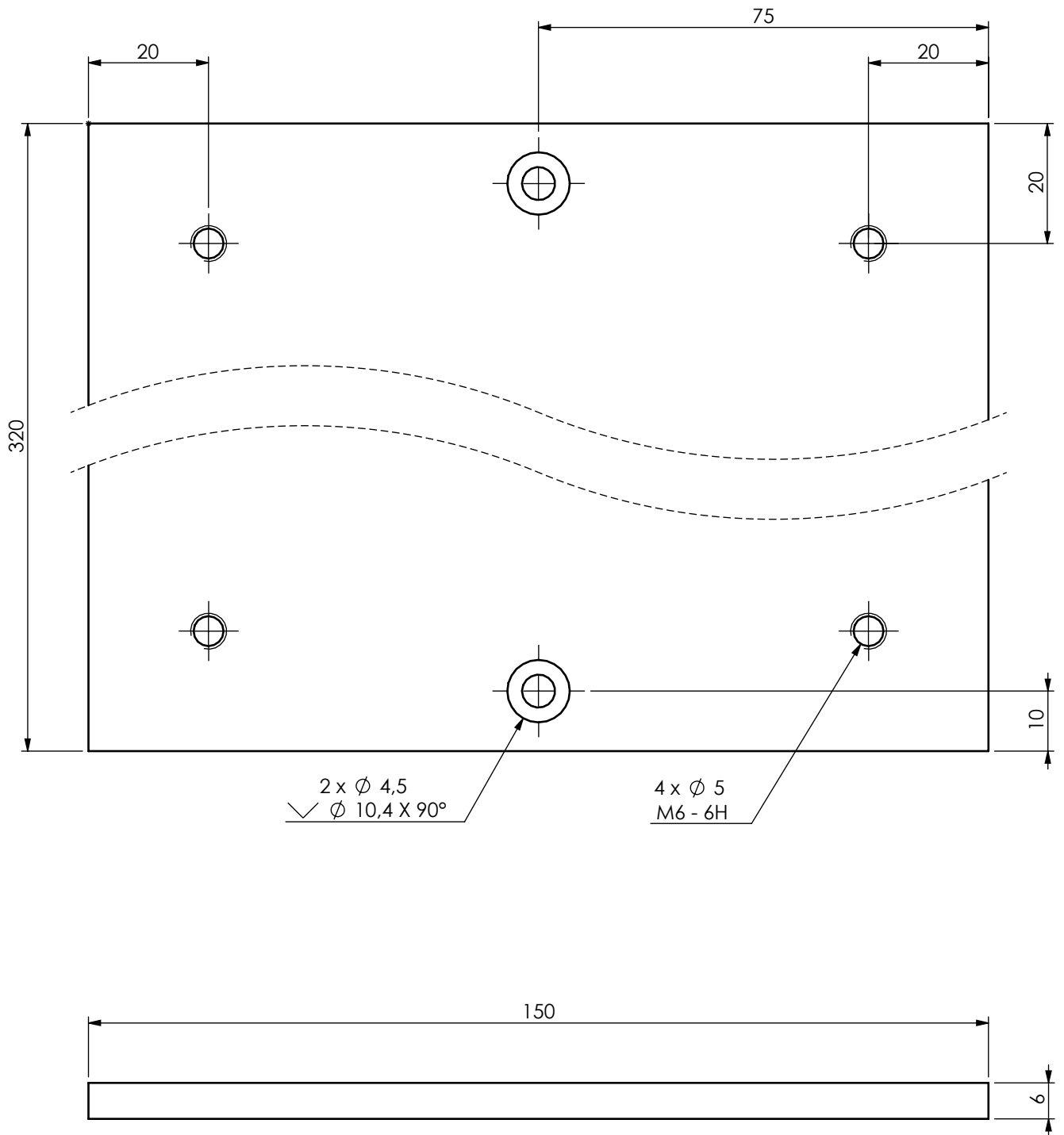


ESCALA
1:1

Material: alumínio

ISO 2768 - mK
ISO 8015
√ Ra 3,2

Pessoa responsável Gonçalo Campos	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Veio		Número 10_1201248		
				Revisão A	Data de edição 04/06/2025	Língua PT
					Folha 1/1	

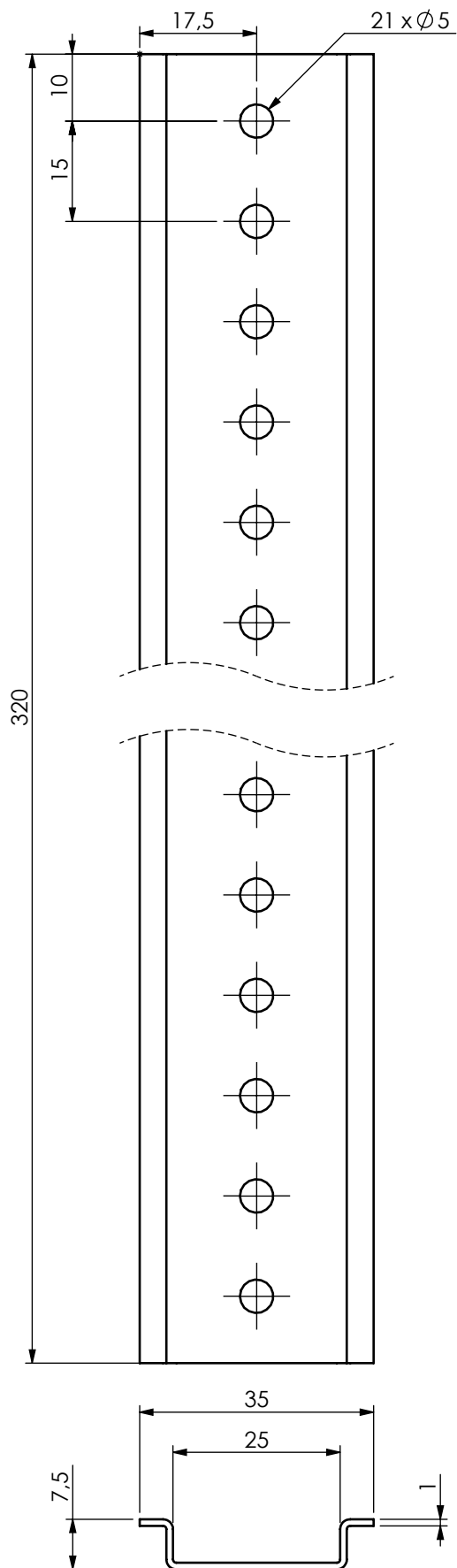


ESCALA
1:1

Material: aço de construção ao carbono

ISO 2768 - mK
ISO 8015
✓ Ra 3,2

Pessoa responsável Gonçalo Campos	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Base		Número 11_1201248		
		Revisão A		Data de edição 23/07/2025	Língua PT	Folha 1/1

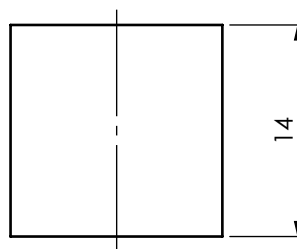
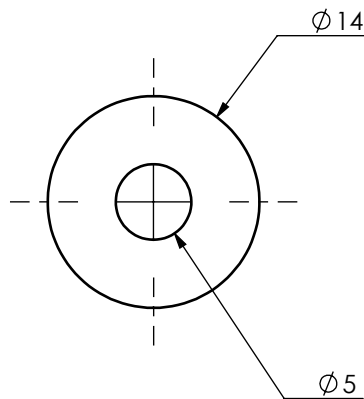


ESCALA
1:1

Raios não cotados: 0,5 mm

ISO 2768 - mK
ISO 8015
√ Ra 3,2

Pessoa responsável Gonçalo Campos	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Calha perfurada		Número 12_1201248		
		Revisão A	Data de edição 23/07/2025	Língua PT	Folha 1/1	



ESCALA
2:1

Material: alumínio

ISO 2768 - mK
ISO 8015
✓ Ra 3,2

Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento	Estado do documento			
Gonçalo Campos	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho de peça	Publicado			
Proprietário legal		Título	Número			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Espaçador	13_1201248			
			Revisão	Data de edição	Língua	Folha
			A	23/07/2025	PT	1/1