

Relatório de Projeto

Gonçalo Ferraz Baptista

Mecânica e Informática Industrial

dez | 2023

GUARDA
POLI
TÉCNICO



POLI TÉCNICO GUARDA

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

CONSTRUÇÃO DE UMA BALANÇA AERODINÂMICA

PROJETO DE FIM DE CURSO
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE LICENCIADO(A) EM MECÂNICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

Gonçalo Ferraz Baptista
Dezembro / 2023

POLI TÉCNICO GUARDA

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

CONSTRUÇÃO DE UMA BALANÇA AERODINÂMICA

PROJETO DE FIM DE CURSO
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE LICENCIADO(A) EM MECÂNICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

Professor Orientador: Rui António Pitarma S. Cunha Ferreira

Gonçalo Ferraz Baptista
Dezembro / 2023

Agradecimentos

Em primeiro quero agradecer ao Instituto Politécnico da Guarda e aos professores do curso Mecânica e Informática Industrial por toda a ajuda e ensinamentos que me deram não só a nível académico como a nível pessoal ao longo destes 3 anos.

Quero agradecer ao meu orientador de projeto, o Dr. Rui Pitarma, pelos seus ensinamentos ao longo do meu percurso académico e por me guiar na execução deste projeto.

Quero por fim agradecer à minha família e amigos que me apoiam sempre e incondicionalmente.

Plano

Este trabalho insere-se na unidade curricular LMII310 – Projeto, pertencente ao segundo semestre do terceiro ano curricular, que visa aplicar os conhecimentos adquiridos nas diversas áreas curriculares do curso.

Elegi como trabalho final de curso desenvolver um projeto prático, que consistiu em desenvolver uma balança aerodinâmica. Insere-se globalmente na área da mecânica, mais concretamente ao ramo da mecânica dos fluídos.

Resumo

Túneis de vento são dispositivos que permitem a investigação e o estudo do comportamento do ar na sua interação com objetos sólidos, encontra a sua essência na delicada dança de forças que governam os corpos. Nos dias de hoje o uso de túneis de vento de baixa velocidade é imprescindível para a constante evolução e desenvolvimento, desde o seu conhecido uso na aeronáutica, até a aplicações que ganham cada vez mais relevância como é o caso da crescente poluição sonora.

Apesar da constante evolução de programas, códigos numéricos, entre outras formas de avaliação das interações de fluidos nos corpos, no desenvolvimento de aeronaves ainda são imprescindíveis milhares de horas de testes em túneis de vento. Indústria automotiva, arquitetura, indústria energética são tudo áreas em que os túneis de vento têm crescente utilização na otimização do design, otimização energética, e ambiental.

A escolha de túnel de vento depende principalmente do objetivo do estudo, e do seu propósito final.

Neste projeto tive como objetivo a pesquisa e estudo dos tipos de estruturas utilizadas nos testes de túnel de vento bem como o desenvolvimento de uma estrutura de um túnel de vento com balança aerodinâmica acoplada, e através das medições nesta balança verificar as cargas aplicadas no modelo.

Palavras-chave

Aerodinâmica, Túnel de vento, Balança aerodinâmica, Lei de Hooke, Aeronáutica.

Abstract

Wind tunnels are devices which enable the investigation and study of air flow over objects, the forces acting on them and their interaction with the flow. Nowadays, the use of low-speed wind tunnels is essential for constant evolution and development, from their well-known use in aeronautics, to applications that are becoming increasingly relevant, such as the case of growing noise pollution.

Despite the constant evolution of programs, numerical codes, and other ways of evaluating fluid interactions in bodies, thousands of hours of wind tunnel tests are still essential in aircraft development. The automotive industry, architecture and the energy industry are all areas in which wind tunnels are increasingly being used to optimize design, energy and the environment.

The choice of wind tunnel depends mainly on the objective of the study, and its ultimate purpose.

The aim of this project was to research and study the types of structures used in wind tunnel testing, as well as developing a wind tunnel structure with a force balance attached and using this balance to check the loads applied to the model.

Keywords

Aerodynamics, Wind tunnel, Force balance, Hooke's law, Aeronautics.

Índice

Agradecimentos	III
Plano	V
Resumo	VI
Abstract.....	VII
Índice de ilustrações	IX
Capítulo 1 – Introdução aos túneis de vento.....	10
1.1 - Regime de velocidade.....	10
1.2 - Geometria	10
1.3 - Fluido de trabalho.....	13
1.4 - Finalidade Específica.....	13
Capítulo 2 - Testes em túneis de vento	16
2.1 - Medir diretamente forças e momentos	17
2.2 - Medir pressões ou velocidade para diagnostico	17
2.3 - Visualização do fluxo para diagnostico	17
Capítulo 3 - Balanças Aerodinâmicas.....	19
3.1 - Eixos de referência	20
3.2 - Medidores de forças	21
3.2.1 - Extensômetros eletrônicos.....	22
3.2.2 - Extensômetros mecânicos	23
Capítulo 4 - Desenvolvimento de uma balança aerodinâmica	25
4.1 - Testagem funcionamento	34
Conclusão e perspectiva de trabalhos futuros	35
Referências bibliográficas	36

Índice de ilustrações

Figura 1: Túnel de vento de circuito aberto [4]	11
Figura 2: Túnel de vento de circuito fechado [15]	11
Figura 3: Configuração túnel de vento blowout [3]	12
Figura 4: Túnel de vento da Ames Research Center, com uma dimensão de 25m largura e 35m altura, equivalente a um prédio de 13 andares [16]	14
Figura 5: A aeronave de espionagem militar Lockheed SR-71 sobrevoava os céus a velocidades de Mach 3.4 (NASA/Jim Ross)	15
Figura 6: Diferenças no design de túneis de vento [3]	16
Figura 7: Teste em túnel de vento de um modelo Lockheed Martin F-35 Lightning II (Air Force/David Housch)	17
Figura 8: Utilização de tinta flow-vis no túnel de vento de baixa velocidade da Airbus em Bremen [17]	18
Figura 9: Teste aerodinâmico "novelo de lã" usado no desenvolvimento do mítico Ford GT40 [18]	18
Figura 10: Balança aerodinâmica interna [3]	19
Figura 11: Balança aerodinâmica externa [3]	20
Figura 12: Representação dos eixos de referência relativos ao vento [5]	21
Figura 13: Funcionamento de um Strain Gage [21]	23
Figura 14: Funcionamento de um extensómetro de mola [3]	24
Figura 15: Vista geral da estrutura da balança aerodinâmica	25
Figura 16: Representação das diferenças de pressão no modelo [19]	26
Figura 17: Perfil asa invertida do Lotus 78 e 79 (Paolo D'Alessio)	27
Figura 18: Carro de F1 Lotus 78, e a funcionalidade dos pods laterais, que são moldados no interior com um perfil de asa negativa [20]	28
Figura 19: Vista geral da balança aerodinâmica	28
Figura 20: Pormenor do mecanismo da balança	29
Figura 21: Interpretação da lei de Hooke [23]	30
Figura 22: Articulações do mecanismo da balança	30
Figura 23: Vista de pormenor da mola de determinação da força de arrasto	31
Figura 24: Vista de pormenor da mola de determinação da força de sustentação	31
Figura 25: Modelo de asa usada nos testes preliminares	33

Capítulo 1 – Introdução aos túneis de vento

Os túneis de vento são concebidos para propósitos e gamas de velocidades específicas. Por conseguinte, existem inúmeros tipos diferentes de túneis de vento e diversas formas de os classificar. Neste capítulo irão ser apresentados vários tipos de túneis de vento e discutidas algumas das características únicas de cada tipo de túnel.

1.1 - Regime de velocidade

Os túneis de vento são frequentemente designados pela velocidade na secção de ensaio em relação à velocidade do som. A razão entre a velocidade do ar e a velocidade do som é designada por número Mach. Os túneis são classificados como subsónicos ($Mach < 0,8$), transónicos ($0,8 < Mach < 1,2$), supersónicos ($1,2 < Mach < 5,0$) ou hipersónicos ($Mach > 5,0$) [3]. A distinção por número de Mach é causada pela importância real dos efeitos de compressibilidade. Para os escoamentos subsónicos, podemos negligenciar os efeitos da compressibilidade; para os escoamentos transónicos e supersónicos, os efeitos da compressibilidade devem ser considerados. Para os escoamentos hipersónicos, é necessário ter em conta o estado químico do gás. Os efeitos de escala do número Mach podem ser derivados teoricamente da conservação do momento do ar no túnel. A compressibilidade condiciona o design da secção de ensaio de um túnel de vento (o design irá ser abordado em maior destaque mais à frente): para os túneis subsónicos, a secção de ensaio tem a área mais pequena da secção transversal do túnel; para os túneis supersónicos, a garganta da tubeira tem a área mais pequena e a área da secção de ensaio é escolhida para atingir um número Mach desejado na secção de ensaio.

No caso deste projeto, o túnel irá ser classificado com subsónico, ou seja, podemos negligenciar os efeitos da compressibilidade.

1.2 - Geometria

Os túneis de vento podem ser classificados quanto à sua geometria em dois grupos: os túneis de circuito aberto e os túneis de circuito fechado. Nos túneis de

circuito aberto (figura 1), não existe recirculação do ar que previamente passou na secção de teste. Uma vez que a entrada e a saída estão expostas à atmosfera, é possível realizar testes que utilizem fumos para visualização do escoamento ou com motores de combustão interna.

A fácil limpeza da instalação e menor custo inicial são algumas das vantagens, porém são mais ruidosos e têm maior custo operacional uma vez que têm maiores perdas de energia cinética nas condutas. Caso o ventilador esteja posicionado na entrada do escoamento, diz-se que o túnel, de secção aberta é de sopro, enquanto se o ventilador estiver à saída do túnel diz-se que o túnel é de aspiração.

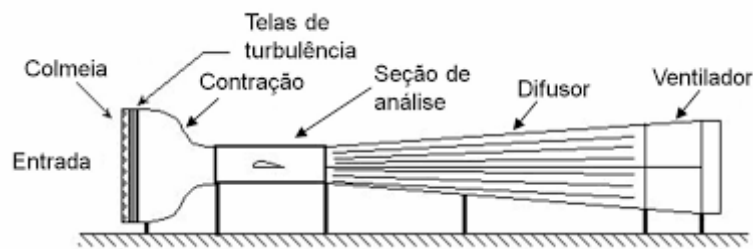


Figura 1: Túnel de vento de circuito aberto [4]

Nos túneis de circuito fechado (figura 2), tal como o nome indica, existe recirculação do ar. São túneis com menores quedas de pressão, consomem por isso menos energia tendo um custo operacional inferior. O facto de ser fechado permite que o controlo das condições do escoamento dependa muito pouco das condições atmosféricas externas. Além disso, o ruído é menor quando comparado com os túneis de circuito aberto. As desvantagens estão relacionadas com o maior custo inicial devido à complexidade dos seus componentes e com a impossibilidade de realizar testes “sujos” (fumos, poeiras, óleos) a menos que equipado com um sistema de purga.

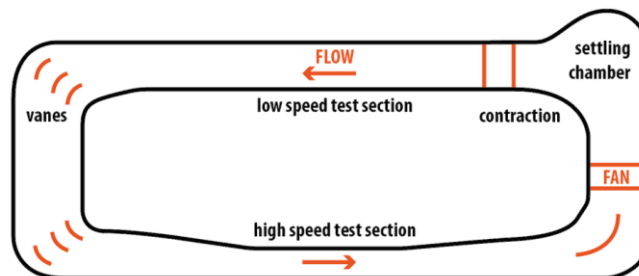


Figura 2: Túnel de vento de circuito fechado [15]

Um túnel de vento de *blowdown* (figura 3) tem um reservatório de alta pressão a montante da secção de ensaio e um reservatório de baixa pressão a jusante da secção de ensaio. Os túneis de *blowdown* são utilizados para ensaios supersónicos.

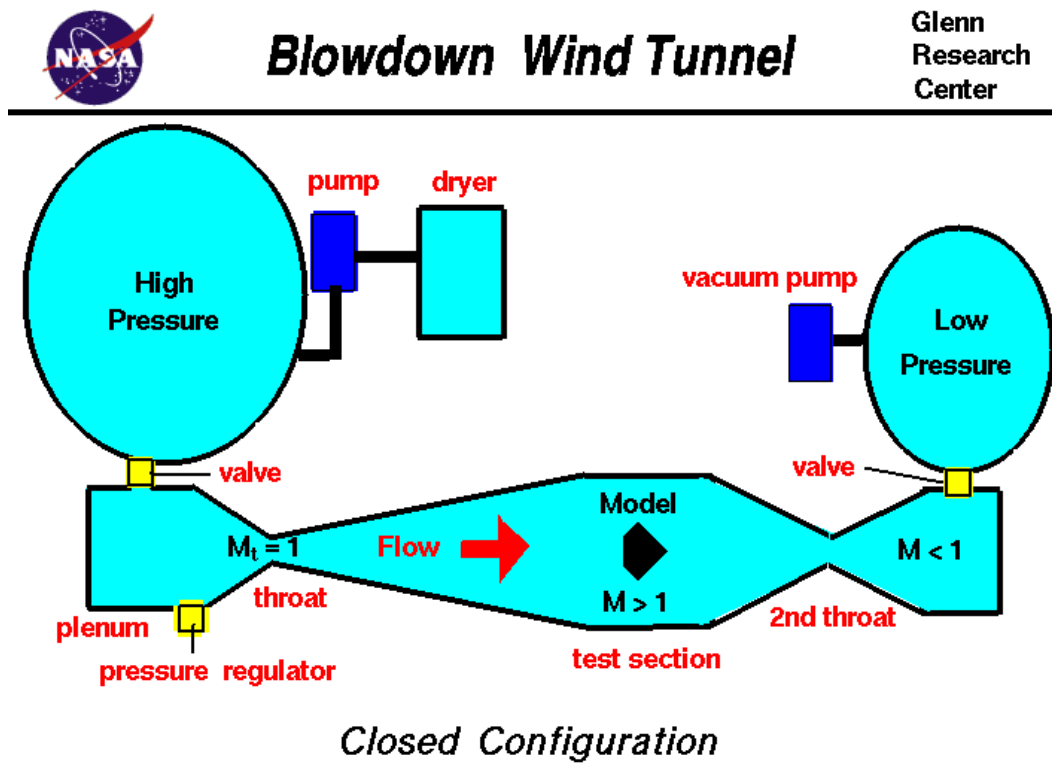


Figura 3: Configuração túnel de vento blowout [3]

Para os ensaios hipersónicos, é frequentemente utilizada uma variante do túnel de *blowdown* designada por tubo de choque. Os tempos de ensaio num túnel de *blowdown* ou num tubo de choque são muito inferiores aos de um túnel de fluxo contínuo.

1.3 - Fluido de trabalho

Os túneis de vento podem ser designados pelo tipo de fluido que é utilizado no túnel. Para a maioria dos ensaios em túneis de vento de baixa velocidade, o ar é movido através do túnel. Para visualizar ondas de choque em aeronaves de alta velocidade, ou para estudar o escoamento em torno de submarinos ou barcos, é utilizada água como fluido de trabalho.

Em algumas instalações hipersônicas, o azoto ou o hélio têm sido utilizados como fluido de trabalho. Do mesmo modo, o azoto criogénico tem sido utilizado para ensaios de escoamentos transônicos com elevado número de Reynolds.

Existem vários túneis de vento em todo o mundo que são utilizados para estudar a formação de gelo em peças de aeronaves, que ocorre a altas altitudes. Estes túneis de gelo incluem dispositivos de refrigeração para arrefecer o ar no túnel e dispositivos de pulverização de água para fornecer gotículas de líquido na secção de ensaio.

1.4 - Finalidade Específica

Os túneis de vento são frequentemente designados pelo objetivo especial para o qual foram concebidos e construídos. Os túneis de vento de propulsão têm requisitos especiais para lidar com os gases de escape de alta temperatura dos motores de turbina ou de foguetão. Os túneis de visualização do fluxo ou de "fumo" também têm de lidar com os contaminantes dos gases de escape que são utilizados no túnel.

Os túneis de vento utilizados para estudar a estabilidade das aeronaves devem permitir que o modelo se mova livremente dentro da secção de ensaio. Algumas instalações de alta temperatura foram concebidas para simular com maior precisão os efeitos de alta temperatura dos fluxos hipersônicos.



Figura 4: Túnel de vento da Ames Research Center, com uma dimensão de 25m largura e 35m altura, equivalente a um prédio de 13 andares [16]

Os aerodinamicistas utilizam túneis de vento para testar os modelos propostos. No túnel, o engenheiro pode controlar cuidadosamente as condições de fluxo que afetam as forças sobre a aeronave, automóvel, etc. Ao efetuar medições cuidadosas das forças no modelo, o engenheiro pode prever as forças no modelo à escala real. E, utilizando técnicas especiais de diagnóstico, o engenheiro pode compreender melhor e melhorar o desempenho do protótipo.

Os túneis de vento são concebidos para um objetivo e uma gama de velocidades específicos e existe uma grande variedade de tipos de túneis de vento e de instrumentos para modelos. O modelo a ensaiar no túnel de vento é colocado na secção de ensaio do túnel. A velocidade na secção de ensaio é determinada pela concepção do túnel. A escolha da gama de velocidades afeta a concepção do túnel de vento devido aos efeitos de compressibilidade.

Para os fluxos subsónicos, a densidade do ar permanece quase constante e a diminuição da área da secção transversal faz com que o fluxo aumente a velocidade e diminua a pressão. Da mesma forma, o aumento da área faz com que a velocidade diminua e a pressão aumente. Pretende-se obter a maior velocidade possível na secção de ensaio. Num túnel de vento subsónico, a secção de ensaio é colocada no final da secção de contração e a montante do difusor. A partir do conhecimento da conservação da massa para escoamentos subsónicos, podemos conceber a secção de ensaio para

produzir uma velocidade ou número Mach desejado, uma vez que a velocidade é uma função da área da secção transversal. Na figura, observam-se as alterações do número de Mach, da velocidade e da pressão através da conceção de um túnel de vento subsónico. O *plenum* é a câmara de decantação num túnel de retorno fechado, ou a sala aberta numa conceção de retorno aberto.

Para fluxos supersónicos, a densidade do ar muda no túnel devido à compressibilidade. De facto, a densidade altera-se mais rapidamente do que a velocidade por um fator do quadrado do número de Mach. Num fluxo supersónico, a diminuição da área da secção transversal faz com que o fluxo diminua em velocidade e aumente a pressão. Da mesma forma, o aumento da área faz com que a velocidade aumente e a pressão diminua. Esta alteração nas propriedades é exatamente o oposto da alteração que ocorre subsonicamente. Além disso, os caudais compressíveis sofrem um estrangulamento do fluxo de massa. À medida que um fluxo subsónico é contraído, a velocidade e o número de Mach aumentam.



Figura 5: A aeronave de espionagem militar Lockheed SR-71 sobrevoava os céus a velocidades de Mach 3.4 (NASA/Jim Ross)

Quando a velocidade alcança a velocidade do som (Mach = 1), o escoamento é estrangulado e o número de Mach não pode ser aumentado além de Mach = 1. Pretende-

se obter a maior velocidade possível na secção de ensaio do túnel de vento. Para um túnel de vento supersónico, contraímos o fluxo até este se estrangular na garganta de um bocal. Em seguida, difunde-se o escoamento, o que aumenta a velocidade supersónica. A secção de ensaio do túnel supersónico é colocada na extremidade do difusor. A partir da consideração da conservação da massa para um escoamento compressível, podemos conceber a secção de ensaio para produzir uma velocidade desejada ou Mach com base na área da secção de ensaio. Na figura 6, observamos as alterações do número de Mach, da velocidade e da pressão através da concepção de um túnel de vento supersónico.

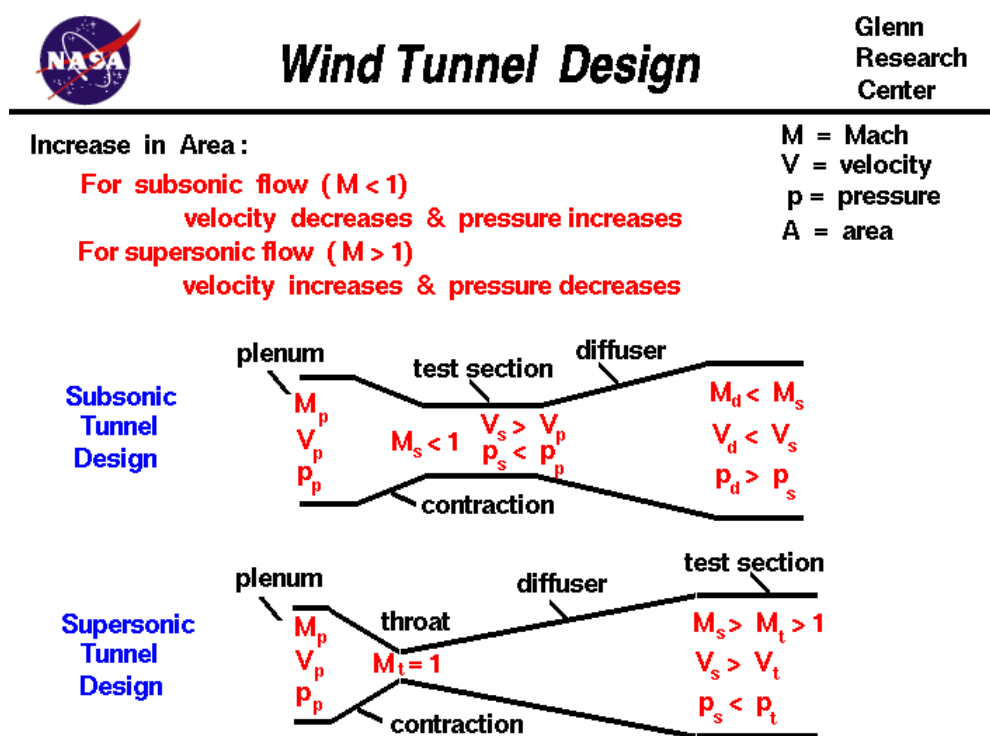


Figura 6: Diferenças no design de túneis de vento [3]

Capítulo 2 - Testes em túneis de vento

Os aerodinamicistas utilizam túneis de vento para testar modelos de aeronaves e componentes de motores propostos. Durante um ensaio, o modelo é colocado na secção de ensaio do túnel e o ar é obrigado a passar pelo modelo. São utilizados vários tipos de instrumentação para determinar as forças exercidas sobre o modelo. Existem quatro tipos principais de ensaios em túnel de vento.

2.1 - Medir diretamente forças e momentos

Em alguns ensaios em túnel de vento, as forças e momentos aerodinâmicos sobre o modelo são medidos diretamente. O modelo é montado no túnel numa aparelhagem especial designada por balança de forças. A saída da balança é um sinal que está relacionado com as forças e momentos no modelo. As balanças podem ser utilizadas para medir tanto as forças de sustentação como as de arrasto.

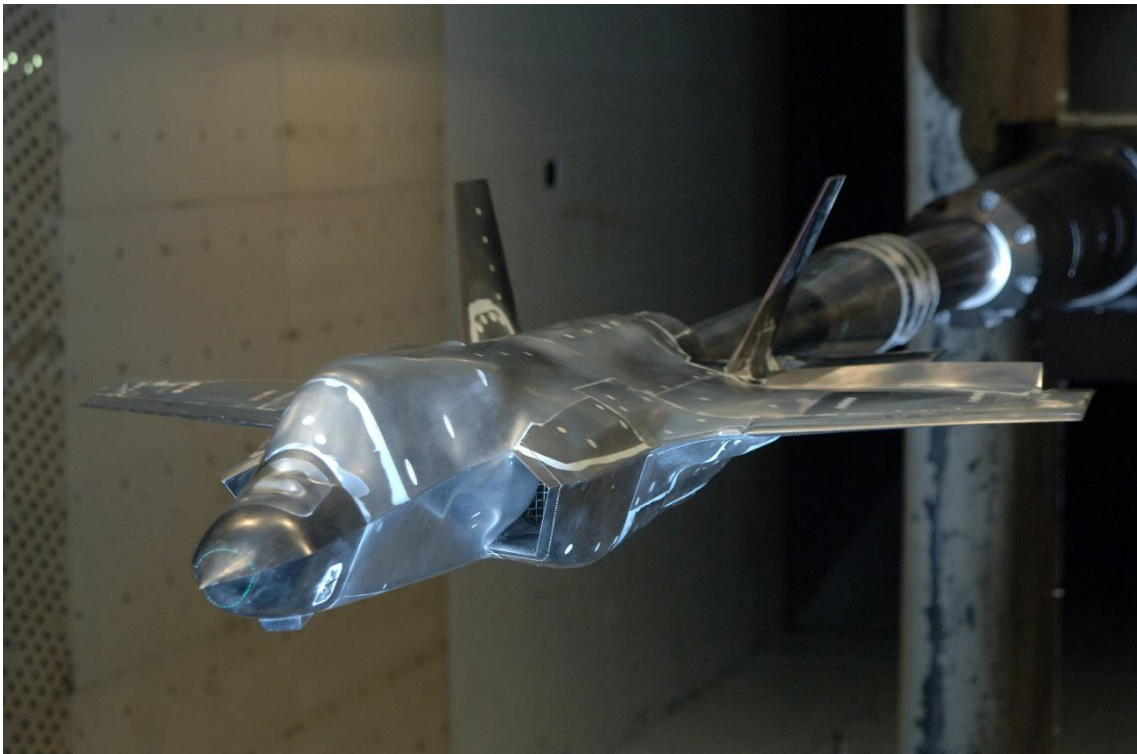


Figura 7: Teste em túnel de vento de um modelo Lockheed Martin F-35 Lightning II (Air Force/David Housch)

2.2 - Medir pressões ou velocidade para diagnóstico

Em alguns ensaios em túnel de vento, o modelo é equipado com instrumentos para fornecer informações de diagnóstico sobre o fluxo de ar em torno do modelo. Os instrumentos de diagnóstico incluem tomadas de pressão estática, *rakes* de pressão total, velocimetria laser etc. Um teste de diagnóstico não fornece o desempenho global da aeronave, mas ajuda o engenheiro a compreender melhor a forma como o fluido se move à volta e através do modelo.

2.3 - Visualização do fluxo para diagnóstico

Nalguns ensaios em túnel de vento, são utilizadas técnicas de visualização do fluxo para fornecer informações de diagnóstico. As técnicas de visualização incluem fumo de fluxo livre, folha de laser ou fluxo de óleo na superfície. Parte-se do princípio de que o meio de visualização do escoamento se move exatamente com o escoamento. Para escoamentos de baixa velocidade, os “fios de lã” ou o óleo de superfície indicam a direção do escoamento ao longo da superfície de um modelo.



Figura 8: Utilização de tinta flow-vis no túnel de vento de baixa velocidade da Airbus em Bremen [17]



Figura 9: Teste aerodinâmico "novelo de lã" usado no desenvolvimento do mítico Ford GT40 [18]

Capítulo 3 - Balanças Aerodinâmicas

Uma balança de aerodinâmica é um equipamento usado em túneis de vento que permite medir as cargas aerodinâmicas (forças e momentos) que atuam sobre um modelo. Deve ser capaz de separar as cargas e medi-las.

Os requisitos de uma balança de forças estão relacionados com as cargas que consegue medir: a carga máxima e a resolução da medição, devendo estar em concordância com as forças previstas no túnel.

As balanças podem ser divididas em dois grandes grupos: as balanças internas e externas [3]. As balanças internas (figura 10) estão colocadas no próprio modelo e, por isso, não interferem no escoamento, sendo apenas necessário um suporte mecânico para manter o modelo no local correto e se necessário regular a posição. Têm a desvantagem de serem pouco flexíveis, uma vez que, são projetadas para um modelo em específico, no entanto são bastante precisas.

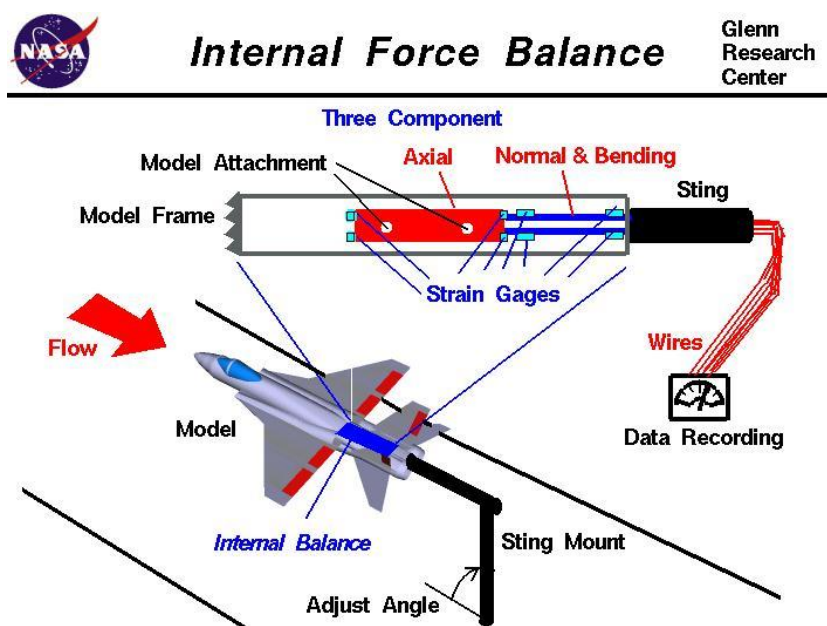


Figura 10: Balança aerodinâmica interna [3]

As balanças externas (figura 11) podem estar dentro ou fora da secção de testes, mas já não estão incorporadas no modelo, permitindo medir as cargas em vários modelos. Neste caso como o objetivo é a execução de uma balança aerodinâmica didática, optei por utilizar uma balança externa, devido à facilidade de teste de diferentes protótipos.

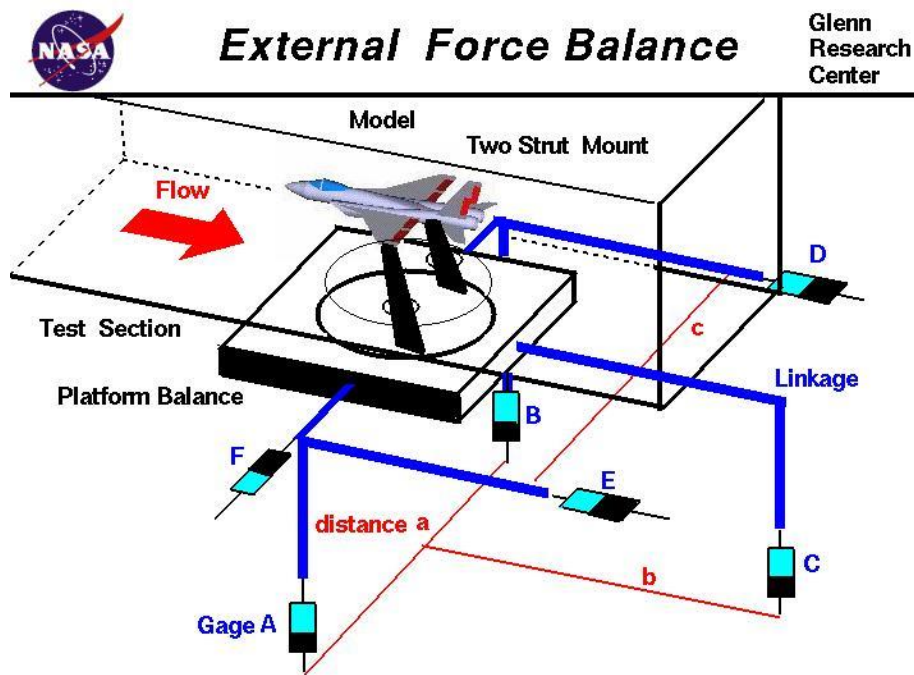


Figura 11: Balança aerodinâmica externa [3]

Como se mostra na figura, um modelo idealizado de avião caça está ligado a uma plataforma localizada por baixo da secção de teste através de um suporte de duas hastes. Existem seis extensómetros, identificados na figura de A a F, que estão ligados à plataforma. Cada um mede a força correspondente através do estiramento de um elemento elétrico.

3.1 - Eixos de referência

Para definir corretamente as forças é necessário primeiro definir os eixos de referência. Os eixos de referência variam consoante a aplicação do túnel de vento. Neste caso serão considerados os eixos adotados na indústria aeronáutica, uma vez que o modelo utilizado para testes terá a estrutura semelhante à asa de um avião. Consideram-se dois sistemas de coordenadas: os relativos ao vento e os relativos ao modelo, que são solidários ao movimento deste. Quanto ao eixo de referência do vento, o eixo das abcissas, XX , tem sentido oposto ao vento, o eixo das ordenadas, YY , aponta para a direita de quem encara frontalmente o vento e o eixo da cota, ZZ , é vertical e aponta para o chão. Na Figura está representado o sistema de coordenadas relativo ao escoamento.

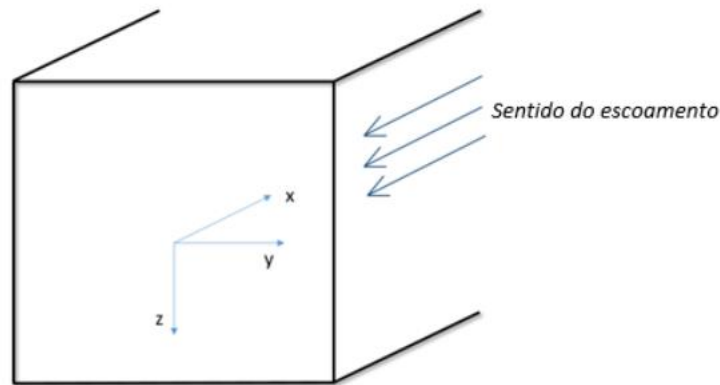


Figura 12: Representação dos eixos de referência relativos ao vento [5]

A força e momento gerados no eixo XX são, respectivamente, o arrasto (\vec{D}) e o momento de rolamento (\vec{M}_x).

No eixo ZZ conseguimos identificar a força de sustentação (\vec{L}) e o momento de guinada (\vec{M}_z).

No âmbito deste projeto as forças e momentos verificados no eixo YY serão ignorados, uma vez que a balança aerodinâmica apenas foi projetada com a medição do arrasto e força de sustentação em mente.

3.2 - Medidores de forças

Na realidade, existem várias formas diferentes de montar um modelo na secção de ensaio e os dispositivos de medição podem estar localizados no interior do modelo ou numa plataforma de medição fora do túnel. A escolha da localização dos dispositivos de medição e o tipo de montagem afetam a redução de dados para o modelo.

Os medidores podem ser extensómetros elétricos que medem uma força através do alongamento de um elemento elétrico no medidor e da aplicação da lei de Ohm à alteração da resistência elétrica do elemento. Ou podem ser simples medidores mecânicos de mola que medem a força através do estiramento de uma mola. Neste projeto optei pela utilização de molas, uma vez que terá como intuito o uso didático no laboratório de fluídos da ESTG.

3.2.1 - Extensómetros eléctricos

Os túneis de vento modernos utilizam normalmente *strain gages* (extensómetros) eléctricos para determinar as forças no modelo. Podem ser utilizados vários extensómetros para determinar as três forças e os três momentos.

Como se mostra na figura 13, um extensómetro é constituído por um fio eléctrico longo e fino que é enrolado para trás e para a frente e fixado firmemente a um pedaço de material, chamado substrato. Quando uma força F é aplicada ao substrato, o substrato e o fio ligado são esticados. À medida que o fio é esticado, o comprimento L aumenta e a área da secção transversal A diminui. A resistência eléctrica R no fio é dada por:

$$R = \frac{\rho \times L}{A}$$

Onde ρ é a resistividade do material do fio. A resistividade é o inverso da condutividade do material. O alongamento do fio faz com que a resistência aumente. Durante o funcionamento, é aplicada uma tensão constante conhecida U através do medidor e a corrente I através do medidor é medida por um mostrador na sala de controlo. A partir da lei de Ohm para um circuito eléctrico, a corrente depende da tensão e da resistência:

$$I = \frac{U}{R}$$

O alongamento do fio altera a resistência do fio, o que altera a corrente de saída do circuito. Após a calibração utilizando uma quantidade conhecida de força, a corrente de saída é inversamente proporcional à força aplicada F .

$$I \sim \frac{1}{F}$$

Dispomos agora de um instrumento que pode ser utilizado para medir a força numa balança externa ou interna. No entanto, existem algumas condições que devem ser cuidadosamente monitorizadas para garantir uma medição precisa da força. Assume-se que o alongamento do fio é o mesmo que o alongamento do substrato. Isto só é verdade desde que o fio esteja rigidamente fixado ao substrato.

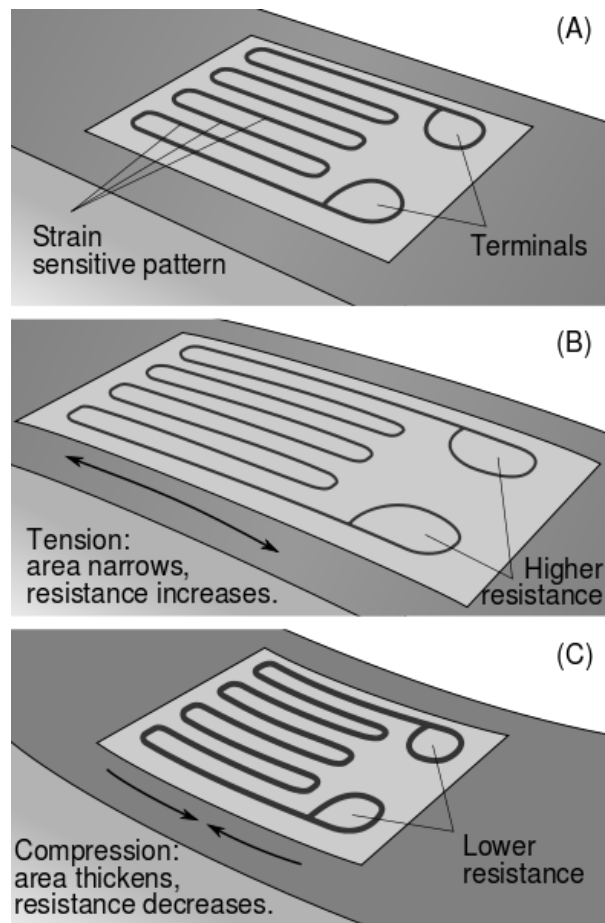


Figura 13: Funcionamento de um Strain Gage [21]

Deve-se tomar cuidado na construção, operação e manuseamento do medidor para garantir que o fio permaneça preso ao substrato. O substrato e o fio também podem ser "esticados" pelo aquecimento do elemento. A mudança no comprimento do fio devido ao aquecimento é registrada como uma força aplicada quando nenhuma força é aplicada. Para eliminar os efeitos da temperatura no medidor, são normalmente ligados vários medidores ao modelo num circuito de ponte de Wheatstone.

3.2.2 - Extensômetros mecânicos

Para túneis de vento bastante simples, como o caso que será apresentado posteriormente, um medidor mecânico de molas pode ser suficiente para determinar as forças no modelo. Podem ser utilizados vários medidores para determinar as três forças e os três momentos presentes no modelo. No nosso caso iremos apenas trabalhar com duas forças e dois momentos.

Como se mostra na figura 14, um medidor de mola é constituído por uma mola que é esticada pela aplicação de uma força e por algum tipo de escala para determinar a magnitude da força. O medidor de mola baseia-se na observação física de que o comprimento L de uma mola está linearmente relacionado com a força aplicada F através de uma constante de mola que, por sua vez, depende do material e da espessura da mola. Se a constante da mola for especificada pela letra k , então

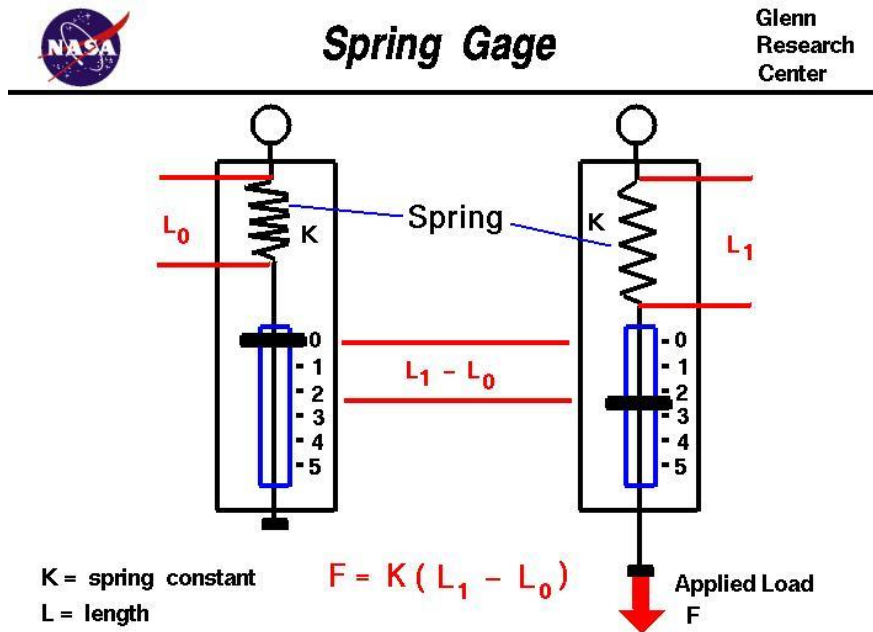


Figura 14: Funcionamento de um extensómetro de mola [3]

$$L = \left(\frac{1}{k}\right) \times F$$

$$F = k \times L$$

Se não for aplicada qualquer força na mola, esta tem um comprimento L_0 . Fixamos uma barra à mola que aponta para zero na escala quando não é aplicada qualquer força. Quando é aplicada uma força, a mola estica-se até um comprimento L_1 e a barra move-se numa distância $L_1 - L_0$. Calibramos a escala aplicando uma força conhecida e marcando a escala de forma apropriada. Para qualquer outra força aplicada, a mola esticar-se-á para um novo valor de L_1 e,

$$F = k \times (L_1 - L_0)$$

Assim sabemos o valor de k da respetiva mola, através da lei de Hooke.

Capítulo 4 - Desenvolvimento de uma balança aerodinâmica

Em função da avaliação da unidade curricular de projeto desenvolvi uma estrutura semelhante à de um túnel de vento sem a circulação de ar, com balança aerodinâmica externa. Este modelo foi pensado e desenhado para a transformação em um túnel de vento aberto subsônico, para fins educativos no laboratório de fluidos da ESTG.



Figura 15: Vista geral da estrutura da balança aerodinâmica

Este sistema foi desenhado para medir as forças aplicadas num modelo no eixo XX e no eixo ZZ , as forças de arrasto (L) e forças de sustentação (D), respetivamente.

A ideia deste projeto é a testagem de diferentes modelos, do fluxo de ar nestes, e das forças exercidas tendo em conta a morfologia do modelo

Num sistema com circulação de ar iríamos verificar a atuação da força de sustentação e podíamos fazer uma análise a nível de mecânica dos fluidos.

Segundo Daniel Bernoulli (1738): “Com o aumento na velocidade de um fluido ocorre simultaneamente uma diminuição na pressão ou uma diminuição na energia potencial deste.”, através desta afirmação e analisando a equação de Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho_1v_1^2 + \rho_1gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho_2v_2^2 + \rho_2gh_2$$

Sendo:

P - Pressão;

ρ - Massa volúmica;

v - Velocidade;

g - Aceleração gravítica;

h - Altura de escoamento;

Uma asa, seja qual for, trabalha sempre pela diferença de pressão entre a parte superior e inferior. Essa diferença de pressão gera uma força a que se dá o nome de Força de Sustentação. Concluimos que a força de sustentação se deve a uma maior velocidade do ar na parte superior do modelo comparativamente à parte inferior, o que por sua vez cria uma maior pressão na parte inferior promovendo a sustentação deste.

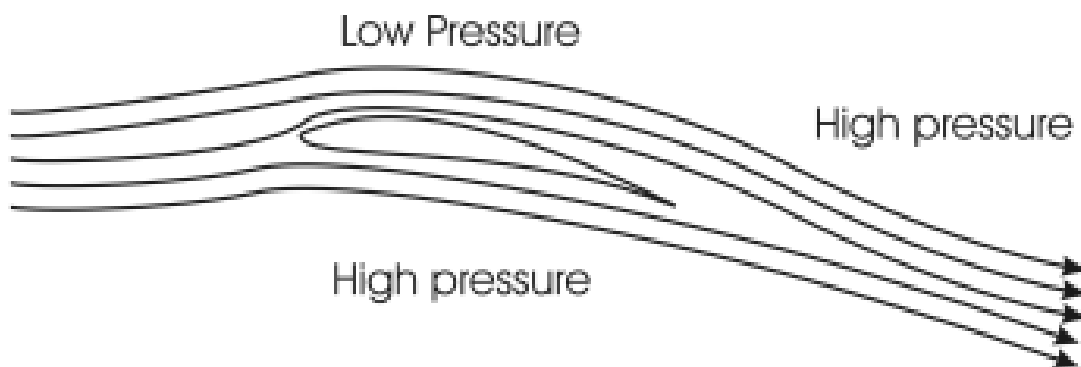


Figura 16: Representação das diferenças de pressão no modelo [19]

Em aplicação contraditória os veículos mais rápidos nos circuitos mundiais têm como componente de maior importância a aerodinâmica.

Os carros de fórmula 1 fazem há várias décadas uso da sustentação negativa, conhecida na gíria com *downforce*, para uma constante diminuição dos tempos por volta.

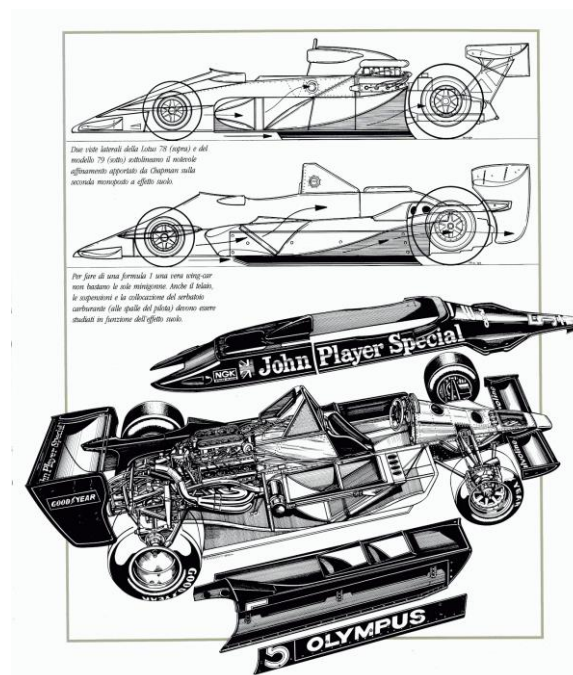


Figura 17: Perfil asa invertida do Lotus 78 e 79 (Paolo D'Alessio)

Aqui o estudo das forças e fluxo do ar em regime de testes de túnel de vento é uma tarefa diária e essencial para o sucesso de uma equipa. Após as recentes mudanças no regulamento técnico da formula 1 em 2022, a equipa Oracle Red Bull Racing tem estado 3 passos à frente das equipas adversárias no parâmetro da aerodinâmica, por conseguinte conquistaram os títulos de piloto e equipa nos dois últimos anos.

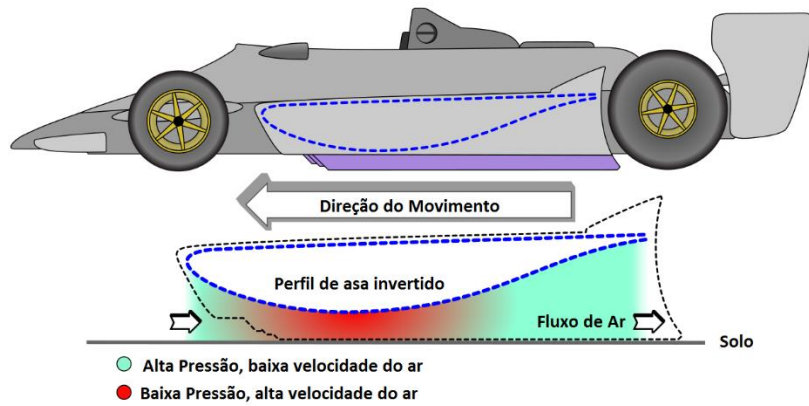


Figura 18: Carro de F1 Lotus 78, e a funcionalidade dos pods laterais, que são moldados no interior com um perfil de asa negativa [20]

Não irei explorar mais este tópico uma vez que não é o intuito deste projeto, porém estes conhecimentos de mecânica dos fluidos são essenciais para a compreensão do funcionamento da balança aerodinâmica.

Tirando inspiração do túnel de vento didático da edibon TA300/300 [22], e após discussão com o professor orientador foram definidas as dimensões finais.

O protótipo construído tem uma secção de teste de 300x300x830mm e é composto por um mecanismo que permite determinar as forças exercidas no modelo.

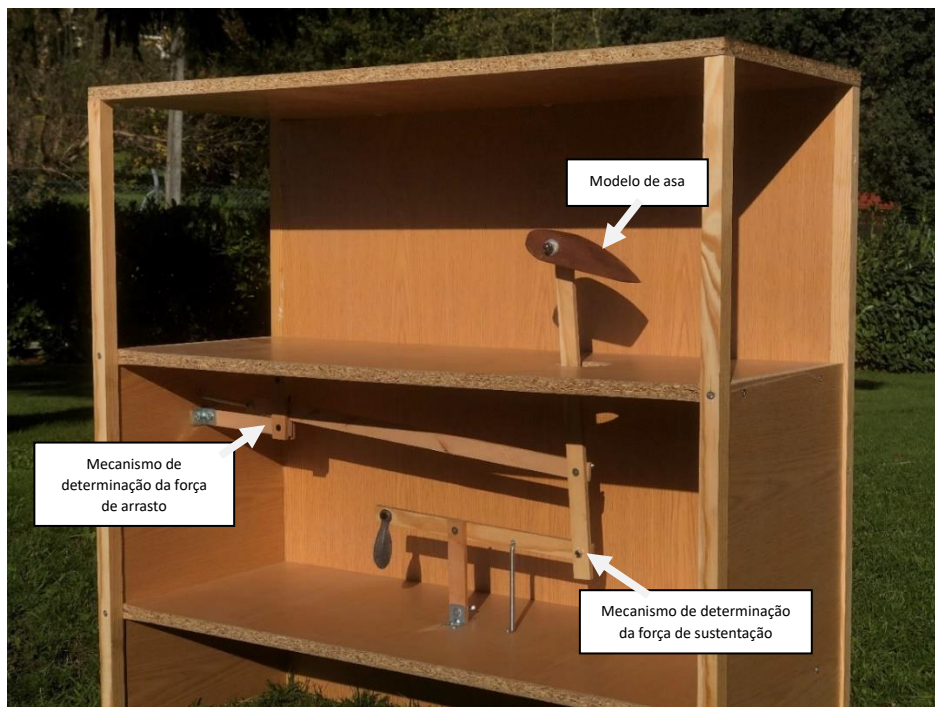


Figura 19: Vista geral da balança aerodinâmica

O mecanismo de determinação das forças de sustentação é composto por 2 articulações, enquanto o mecanismo de determinação das forças de arrasto é apenas composto por 1 articulação.

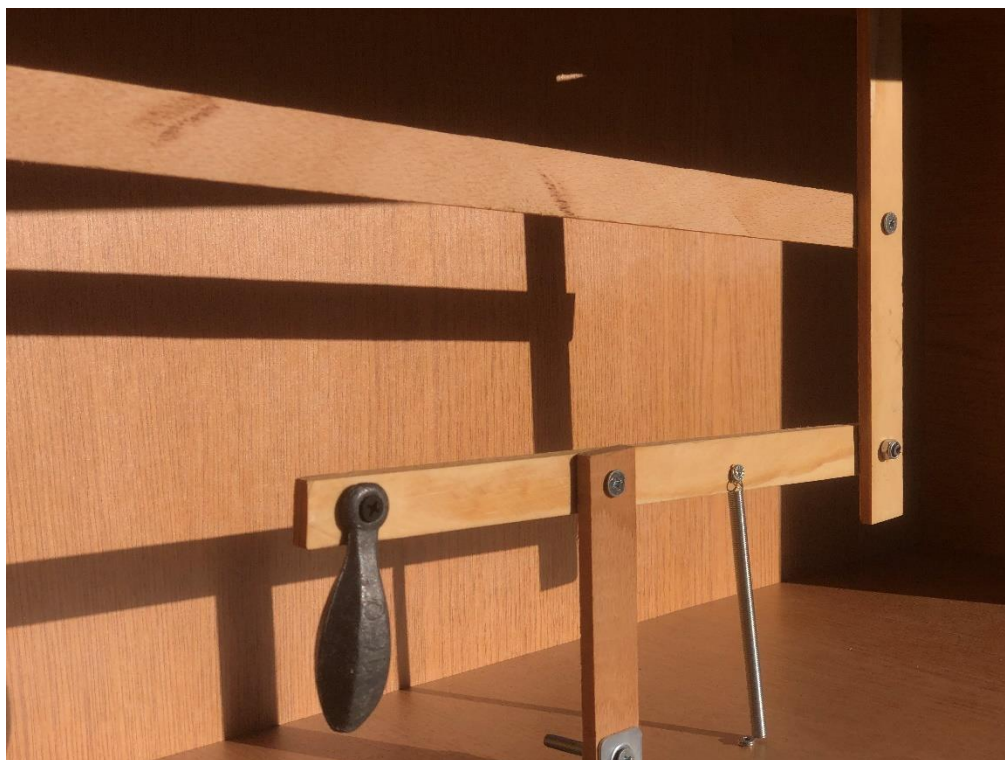


Figura 20: Pormenor do mecanismo da balança

A força de retorno F é tanto maior quanto maior for a deformação X . A lei de Hooke diz que as duas grandezas são diretamente proporcionais:

$$F = -k \times \Delta X$$

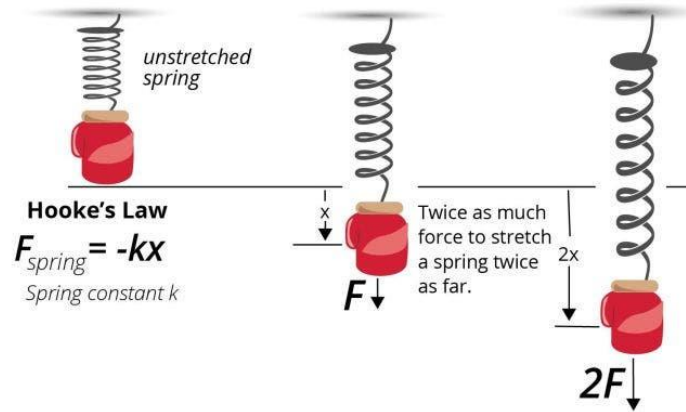


Figura 21: Interpretação da lei de Hooke [23]

Sendo que k é a constante de deformação da mola.

Ou seja, em teoria na minha construção o modelo de testes está ligado aos mecanismos articulados e estes, por sua vez, estão ligados a 2 molas fixas na estrutura de suporte do túnel.



Figura 22: Articulações do mecanismo da balança

Na mola fixa à lateral da estrutura será imposta uma deformação diretamente proporcional à força de arrasto exercida no modelo.

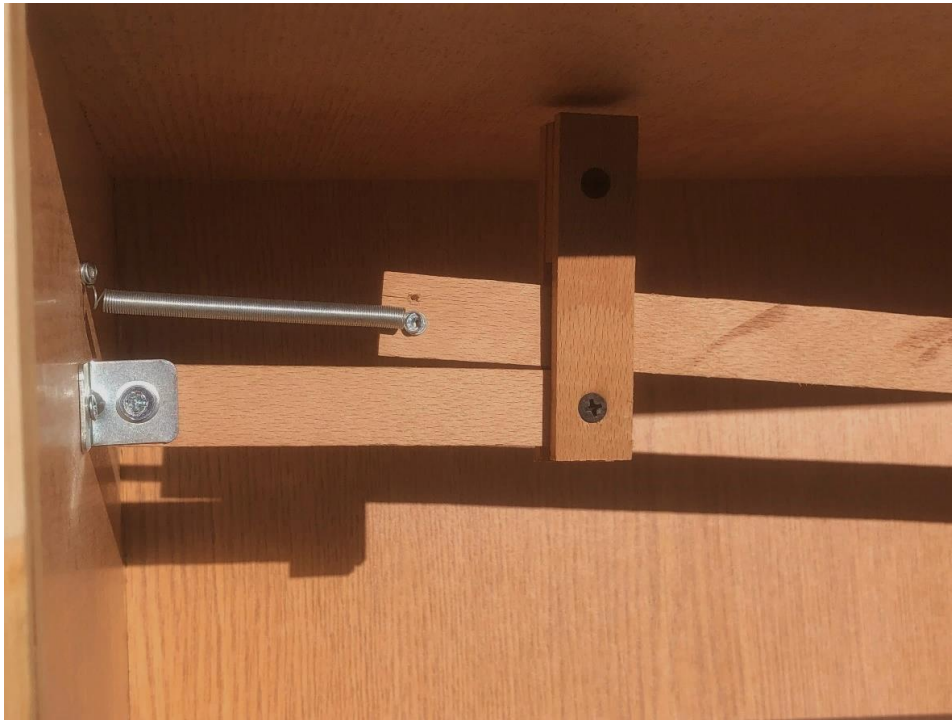


Figura 23: Vista de pormenor da mola de determinação da força de arrasto

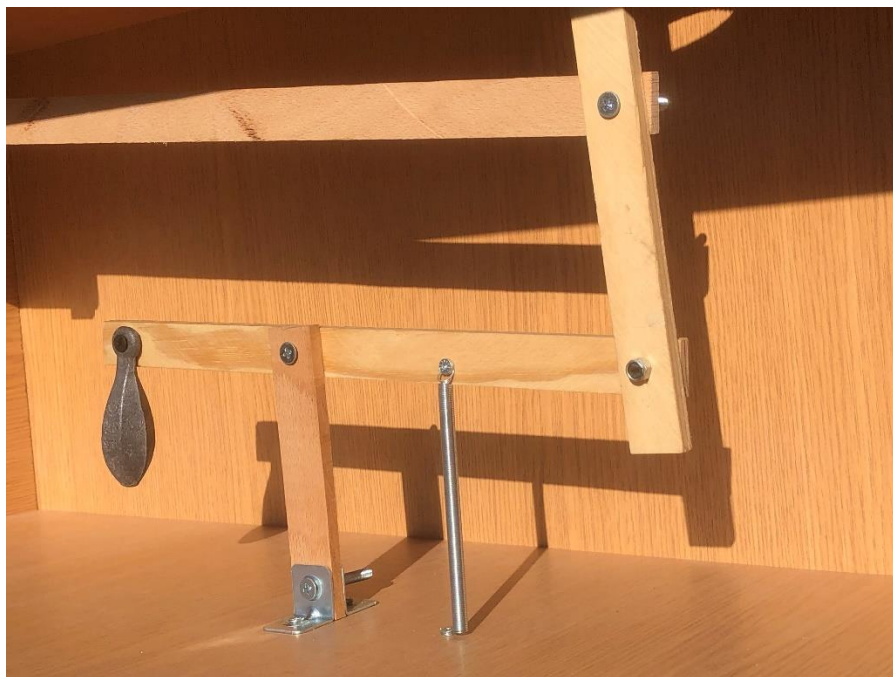


Figura 24: Vista de pormenor da mola de determinação da força de sustentação

Em contrapartida na mola fixa à base da estrutura será imposta uma deformação diretamente proporcional à força de sustentação exercida no modelo

Mediu-se o comprimento da mola sem força exercida, posteriormente usou-se um peso com massa de 338g de modo a verificar a deformação na mola.

$$L0 - 155 \text{ mm}$$

$$L1 - 232 \text{ mm}$$

$$\text{Massa} - 0,338 \text{ g}$$

$$P = m \times g$$

$$P = 0,338 \times 9,8 \quad g = 9,8 \text{ m/s}^2$$
$$= 3,31 \text{ N}$$

$$P = k \times (L1 - L0)$$

$$3,31 = k \times (0,232 - 0,155)$$

$$k = 42,99 \text{ N/m}$$

Assim, com o valor de k [N/m] sabemos através da diferença de comprimento da mola aproximadamente as forças de arrasto e sustentação aplicadas no modelo.

O coeficiente de arrasto pode ser calculado a partir da Equação (Fox, 2006) [1], utilizando nesta equação, a força de arrasto obtida, experimentalmente, na balança desenvolvida:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2}$$

Onde F_D [N] é a força de arrasto (*drag*), C_D [adimensional] o coeficiente de arrasto, obtido através do número de Reynolds, A [m²] área projetada (área projetada no eixo horizontal), V [m/s] a velocidade do vento e ρ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ a densidade do fluido. O coeficiente de sustentação pode ser definido com a força de sustentação adquirida na balança (Fox, 2006) [1]:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2}$$

Onde F_L [N] é a força de sustentação e C_L [adimensional] o coeficiente de sustentação.

Na asa de testes tentou replicar-se o perfil NACA 4415, esta asa tem ajuste de posição em torno do eixo yy de modo a testar a diferença de forças aplicadas no modelo em consequência dos diferentes ângulos de ataque da asa.



Figura 25: Modelo de asa usada nos testes preliminares

4.1 - Testagem funcionamento

Com o sistema em repouso podemos medir o comprimento inicial das molas:

- Mola de medição da força de arrasto (L_0 arrasto) – 77 mm
- Mola de medição da força de sustentação (L_0 sustentação) – 96 mm

Foi imposta uma força manual desconhecida no modelo, esta força aumentou o comprimento das molas:

- Mola de medição da força de arrasto (L_1 arrasto) – 91 mm
- Mola de medição da força de sustentação (L_1 sustentação) – 115 mm

Considerando as fórmulas apresentadas no capítulo Extensómetros mecânicos (pág. 24) e tendo o valor de k da mola obtido experimentalmente, temos para a força de arrasto (F_D):

$$k = 42,99 \text{ N/m}$$

$$F_D = k \times (L_1 - L_0)$$

$$F_D = 42,99 \times (0,091 - 0,077)$$

$$F_D = 0,602 \text{ N}$$

Da mesma forma para a força de sustentação (F_L):

$$k = 42,99 \text{ N/m}$$

$$F_L = k \times (L_1 - L_0)$$

$$F_L = 42,99 \times (0,115 - 0,096)$$

$$F_L = 0,817 \text{ N}$$

Podemos então concluir que nesta situação, a carga aplicada manualmente manifestou-se numa força de $0,603 \text{ N}$ exercida na mola de medição da força de arrasto, e numa força de $0,817 \text{ N}$ exercida na mola de medição da força de sustentação.

Conclusão e perspectiva de trabalhos futuros

O objetivo deste trabalho passou realizar um projeto de uma balança aerodinâmica para um túnel de vento. O propósito deste projeto seria auxiliar o conhecimento teórico adquirido na licenciatura com um modelo prático a ser usado no laboratório de fluidos da ESTG.

Numa visão geral, o objetivo do trabalho pode dar-se como concluído com sucesso. Numa fase inicial efetuei uma revisão bibliográfica no estudo dos túneis de vento, das balanças aerodinâmicas e o seu papel de relevo no nosso mundo.

A construção física da balança revelou-se eficaz nos testes preliminares, foi desenvolvida com vista a melhorias e otimizações futuras.

No futuro esta estrutura está pensada para ser feito um dimensionamento de um túnel de vento subsónico de circuito aberto, este dimensionamento poderá ser feito também em contexto de projeto futuro. O desenvolvimento completo futuro de um túnel de vento com balança aerodinâmica iria ser um promotor no ensino de mecânica dos fluidos na ESTG.

O trabalho desenvolvido ao longo do projeto permitiu-me compreender e ter outra perspectiva relativamente à necessidade do teste em túnel de vento no mundo moderno, desde os automóveis mais simples aos aviões comerciais, dos carros de Formula 1 aos aviões caças militares. Todos passaram por períodos de testagem em tuncis de vento.

Referências bibliográficas

- [1] FOX, Robert W. Introdução à mecânica dos fluidos. 6. ed. LTC, 2006.
- [2] BARLOW, J.B.; RAE, W. H.; POPE, A. Low-Speed Wind Tunnel Testing. 3. Ed New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [3] HALL, Nancy. NASA Glenn Research Center. Wind Tunnel Index 2023 [Visitado em 03/10/2023]; disponível em <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/shortt.html#>
- [4] MEHTA, R. D.; BRADSHAW, P. Technical Notes: Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels. The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society. 1979.
- [5] SANTOS, Luís. ANTEPROJETO DE UMA BALANÇA AERODINÂMICA PARA TÚNEL DE VENTO. 2021.
- [9] BARBOSA, Tarsis. Túnel de Vento para Ensaio de Componentes. 2008.
- [10] SOETHE, VIVIANE. PROJETO DE CONSTRUÇÃO DE UMA BALANÇA AERODINÂMICA. 2011.
- [11] ANDERSON, J.; D., Jr. Fundamentals of Aerodynamics. 3ª ed. McGraw-Hill, 2001.
- [12] GONZALEZ Hernandez, MORENO Lopez. (2013) Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel. Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications. InTech. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/54169>.
- [13] HOUGHTON, E.I.; CARPENTER, P.w..Aerodynamics for Engineering Students. 5. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2003.
- [14] GORLIN, S.M; SLEZINGER, I. I. Wind tunnels and their instrumentation. Moskva, 1964
- [15] FREDRIKSEN, CARSTEN. A lista de instalações de teste de túnel de vento, 2022 [Visitado em 09/11/2023]; Disponível em <https://dewesoft.com/pt/blog/lista-de-instalacoes-de-teste-de-tunel-de-vento>
- [16] ARC Capabilities and Facilities [Visitado em 12/11/2023]; Disponível em <https://www.nasa.gov/ames-capabilities-facilities/>
- [17] ASHTON, NEIL & WEST, ALASTAIR & MENDONCA, FRED. Slat Noise Prediction using Hybrid RANS-LES methods on Structured and Unstructured Grids, 2015.
- [18] FRIEDMAN, DAVE. Ken Miles The Shelby American Years, 2021.

[19] AIRSIGHT. Types of Drones - Fixed Wing, [Visitado em 13/10/2023]; Disponível em <https://www.airsight.com/learn/airspace-security/drone-fundamentals/types-of-drones-fixed-wing>

[20] Side view of the F1 racing car and representation of the Venturi nozzle, which is formed between the wing profile inside the side pods and the runway, [Visitado em 09/09/2023]; Disponível em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lotus_Modell_79_wing-profile.svg.

[21] Visualization of the working concept behind the strain gauge on a beam under exaggerated bending, [Visitado em 27/08/2023]; Disponível em <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:StrainGaugeVisualization.svg>

[22] Aerodynamic Tunnel TA300/300, Disponível em <https://www.edibon.com/en/aerodynamic-tunnel-300x300-mm/catalog>

[23] Hookes Law - Understanding Definition, Formula, and Graph, Disponível em <https://www.westlab.com/blog/hookes-law-understanding-definition-formula-and-graph>