

BALANÇA DE FORÇAS DE QUATRO COMPONENTES PARA FINS EDUCACIONAIS

Pedro Lacerda Montes, pedrolacerdamontes@gmail.com¹

¹Universidade de Brasília, St. Leste Projeção A - Gama Leste, Brasília,

Resumo. *Ensaios em túnel de vento são um pilar do estudo de aerodinâmica e são essenciais em qualquer projeto na indústria, academia ou educação. Para realizar esse tipo de experimento é necessário não somente um túnel de vento como também um sistema de aquisição de dados, como uma balança de forças. Esse tipo de equipamento pode chegar a dezenas de milhares de reais no mercado, o que dificulta que pequenos projetos e organizações realizem experimentos. Esse trabalho propõe o projeto de uma balança de forças externa de quatro componentes para fins educacionais que possa ser construída com pouco investimento. A balança é capaz de medir força de arrasto, sustentação, momento de arfagem e momento de rolamento e foi dimensionada para testes de minifoguetes em túneis de vento de pequeno porte.*

Palavras chave: *Aerodinâmica experimental. Túnel de vento. Balança de forças.*

Abstract. *Wind tunnel testing is a pillar of the aerodynamics study and is essential to any industrial, academic, or educational project. Besides the wind tunnel, one also needs a data acquisition system for such experiments, like a force balance. This equipment can cost tens of thousands of Reais, which is financially unviable for small projects and organizations. The current work proposes a design of a four-component external force balance for educational purposes with a minor project investment. The suggested equipment is capable of measuring drag, lift, pitch moment, and rolling moment, and it was scaled to test model rockets in small-scale wind tunnels.*

Keywords: *Experimental aerodynamics, Wind tunnel, Force balance.*

1. INTRODUÇÃO

O estudo de aerodinâmica tem sido indispensável em diversas áreas, como na engenharia civil, automotiva, de energia, aeronáutica e aeroespacial. Seja no projeto de carros, torres, turbinas ou aeronaves, engenheiros têm estudado o escoamento de fluidos ao redor de objetos por décadas. Com o avanço da teoria de aerodinâmica e de modelos computacionais, essas análises ficaram cada vez mais rápidas e acessíveis, entretanto, para que se entenda completamente a natureza dos fenômenos aerodinâmicos é preciso empregar técnicas experimentais, como os ensaios em túnel de vento.

Ensaios em túnel de vento são uma das mais antigas e consolidadas metodologias experimentais em aerodinâmica, estão presentes em muitos projetos de pesquisa e são frequentemente utilizados como ferramenta de ensino. Para que um experimento em túnel de vento resulte em valores numéricos que possam ser utilizados para tomada de decisões é necessário que se tenha um sistema de aquisição de dados, caso contrário só poderá ser utilizado para visualização do escoamento.

Um dos métodos mais utilizados para obter forças e momentos de um ensaio em túnel de vento são as balanças de força. Existem dois grandes grupos de balanças de forças: internas e externas. Balanças de força internas tem os sensores e eletrônicos dentro da estrutura do modelo de testes, enquanto balanças externas tem uma estrutura externa em que é fixado um suporte para o modelo de testes. Existem ainda diversas formas de se montar e posicionar os sensores de modo que seja possível desacoplar e calcular as componentes da carga aerodinâmica. Entre os principais tipos de balança externa pode-se citar a balança tipo plataforma, piramidal e *yoke* (Barlow *et al.*, 2015).

Balanças de força podem ser obtidas comercialmente por empresas especializadas, mas dependendo das especificações do equipamento o custo de aquisição se torna proibitivo para organizações e projetos com orçamento limitado.

Este trabalho propõe o projeto de uma balança de forças externa do tipo plataforma de quatro componentes com custo reduzido. A balança é pensada para ser utilizada em túneis de vento de pequeno porte e voltada para projetos de equipes de competição e apoio a disciplinas.

2. TÚNEIS DE VENTO

A balança foi projetada para operar em dois túneis de vento presentes na Universidade de Brasília (UnB): o túnel de vento localizado no Laboratório de Sistemas Espaciais (LaSE) da Faculdade UnB Gama e no túnel de vento localizado no Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.

2.1 TÚNEL DE VENTO DO LaSE

O túnel de vento de circuito aberto do LaSE pode ser visto na Fig. 1. A sessão de testes deste túnel tem dimensões aproximadas de $0,2\text{ m} \times 0,2\text{ m} \times 0,4\text{ m}$ e um bocal com razão de redução de aproximadamente 9:1. O escoamento é acelerado por meio de um ventilador de 80 W e 12 V operado por um controlador PWM que varia a entrada de potência no motor para alterar a velocidade de rotação das pás. O controlador consegue variar a velocidade do escoamento de 0 a $9,4\text{ m/s}$ com incerteza em torno de $\pm 0,3\text{ m/s}$.



Figura 1: Túnel de vento do LaSE, UnB.

2.2 TÚNEL DE VENTO DO LEA

O túnel de vento de circuito aberto do LEA pode ser visto nas Fig. 2 e Fig. 3. A sessão de testes deste túnel tem dimensões aproximadas de $1,2\text{ m} \times 1,2\text{ m} \times 2\text{ m}$ e um bocal com área de redução de 4:1. O motor WEG W22 de 10 HP que faz a sucção do ar é acionado por meio de um inversor CFW-09 Vectrue Inverter 10A 3CV. O motor é controlado usando um controlador PID que é conectado a um tubo de Pitot e a um sensor de temperatura. O controlador consegue variar a velocidade do escoamento de 0 a 20 m/s com incerteza de aproximadamente $\pm 0,1\text{ m/s}$ e intensidade de turbulência menor que 1% (Mendes, 2020).

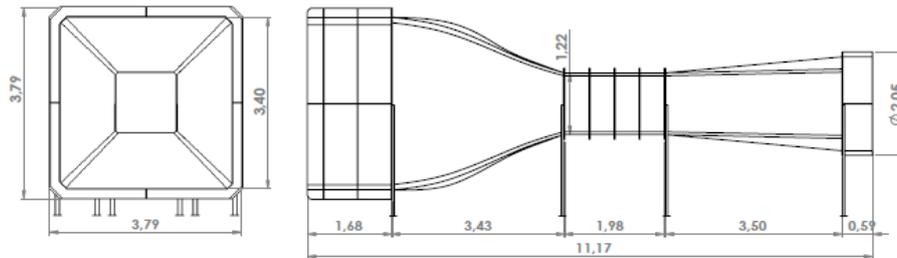


Figura 2: Vistas cotadas em metros do túnel de vento do LEA, UnB. (Macías, 2016)



Figura 3: Túnel de vento do LEA, UnB. (Macías, 2016)

3. METODOLOGIA

O objetivo da balança projetada neste trabalho é medir quatro componentes da carga aerodinâmica, duas componentes de força e duas componentes de momento. As componentes de força são a força em X , chamada força de arrasto (D), e em Y , chamada força de sustentação (L). Já as componentes de momento são o momento em Z , chamado momento de arfagem (p), e em X , chamado momento de rolamento (r). A Figura 5 ilustra em vermelho as cargas citadas.

3.1 CONFIGURAÇÃO GERAL

A balança tipo plataforma é amplamente utilizada por ter um conceito simples e de fácil aplicação. Nessa configuração, o modelo é montado numa plataforma plana a partir de onde os sensores são posicionados. A Figura 4 mostra um esquemático desse tipo de balança.

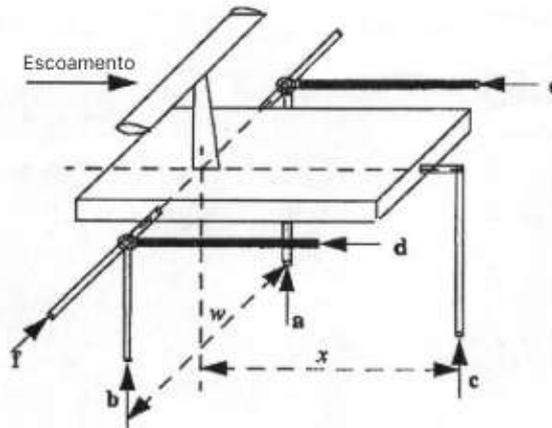


Figura 4: Esquemático do projeto de uma balança plataforma. Barlow *et al.* (2015).

Baseando-se no esquemático mostrado na Fig. 4, foi desenvolvida uma configuração com quatro sensores que atende à proposta do projeto. A Figura 5 mostra um esquemático da configuração proposta onde os símbolos α , β , γ e σ representam a posição dos sensores e as letras a e b indicam os braços de alavanca referentes aos momentos.

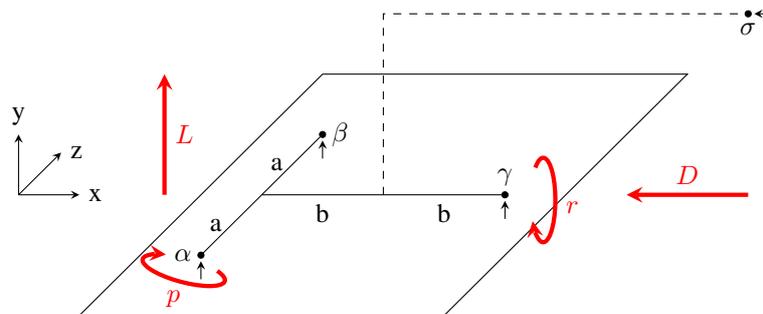


Figura 5: Esquema do posicionamento dos sensores na balança

Com o posicionamento dos sensores definidos e considerando o balanço de forças e momentos na plataforma, é possível derivar equações para as quatro componentes em função das leituras dos sensores. As Equações. (1) a (4) foram derivadas dessa forma e são apresentadas na sequência.

$$L = \alpha + \beta + \gamma \quad (1)$$

$$D = \sigma \quad (2)$$

$$p = (\alpha + \beta - \gamma)b \quad (3)$$

$$r = (\beta - \alpha)a \quad (4)$$

3.2 SENSORES

Na maioria dos projetos de balança de força utiliza-se extensômetros para medir as forças geradas pelo escoamento. Com isso em mente, optou-se por utilizar células de carga do tipo *single point* por serem componentes comercialmente acessíveis, invariantes a forças laterais e de fácil montagem na balança.

Além do tipo, é necessário determinar a precisão desejada para o sensor. Isso é ainda mais importante em um projeto de pequena escala pois, devido às dimensões do túnel de vento, espera-se que as forças geradas sejam muito pequenas e caso o sensor não seja preciso o suficiente corre-se o risco de não se capturar os fenômenos desejados. Com isso em mente, foram feitas estimativas das forças a serem medidas para que se possa definir os sensores adequados. A estimativa foi feita baseando-se nas dimensões do túnel de vento do LaSE pois, por ser o menor equipamento e por ter um motor menos potente, espera-se que gere as menores forças.

As forças de sustentação e de arrasto podem ser calculados pelas equações (6) e (7) onde q é a pressão dinâmica do escoamento, definida pela equação 5 em que V_∞ é a velocidade do escoamento e ρ é a massa específica do fluido, C_L e C_D são coeficientes adimensionais e S é a área de referência (Anderson, 2009).

$$q = \frac{1}{2} V_\infty^2 \rho \quad (5)$$

$$L = q C_L S \quad (6)$$

$$D = q C_D S \quad (7)$$

O objeto utilizado nos cálculos é um modelo em escala do minifoguete desenvolvido no projeto Circe pela equipe de foguetemodélismo Capital Rocket Team da UnB. O minifoguete tem cerca de 2,14 m de comprimento e 0,155 m de diâmetro, mas foi reduzido para ocupar 80% da sessão de testes do túnel de vento. Na análise aerodinâmica de foguetes costuma-se usar como área de referência a maior área de sessão transversal da fuselagem e essa será a convenção adotada neste trabalho. A Tabela 1 reúne as principais dimensões do minifoguete em escala assim como sua área de referência.

Tabela 1: Dimensões do modelo de teste

Comprimento [m]	Diâmetro [m]	Área [m ²]
0,32	2,31e-2	4,21e-4

Para o cálculo foi considerado um escoamento ao nível do mar a 20 °C na máxima velocidade permitida pelo túnel de vento, 9,4 m/s. Nessas condições a massa específica do ar é igual a $\rho = 1,20 \text{ kg/m}^3$, resultando numa pressão dinâmica de $q = 53,02 \text{ Pa}$.

Os coeficientes de sustentação e arrasto foram obtidos utilizando o software livre *OpenRocket*, ferramenta muito utilizada no foguetemodélismo. O software utiliza uma variação das equações de Barrowman, um método algébrico para calcular os coeficientes de força normal (C_N) e de força de arrasto de veículos esguios com aletas (Niskanen, 2009). Para número de Mach e ângulo de ataque iguais a zero, o software calcula $C_N = 13,9$ e $C_D = 1,1$. O coeficiente de força normal se relaciona com os coeficientes de força de sustentação e de arrasto por meio de relações trigonométricas, mas, para ângulo de ataque igual a zero essa relação se torna $C_N = C_L$, logo, $C_L = 13,9$ (Anderson, 2009).

Finalmente, a estimativa de força de sustentação é $L = 3,10 \times 10^{-1} \text{ N}$ e da força de arrasto é $D = 2,46 \times 10^{-2} \text{ N}$. Dividindo ambos os valores pela aceleração gravitacional, obtém-se o valor a ser medido em quilogramas. Dessa forma, $L_{kg} = 3,16 \times 10^{-2} \text{ kg}$ e $D_{kg} = 2,51 \times 10^{-2} \text{ kg}$, onde L_{kg} e D_{kg} são, respectivamente, a força de sustentação e a força de arrasto medidas em quilogramas.

Por fim, os sensores escolhidos foram quatro células de carga com carga máxima de 300 g de modo que a força mínima estimada esteja próxima do fundo de escala do sensor. Cada célula de carga é conectada a um módulo amplificador HX711 e são controladas por uma placa microcontroladora Arduino Uno.

3.3 ESTRUTURA

A estrutura da balança pode ser dividida em base principal, plataforma, apoios e suporte. Alguns requisitos foram levados em consideração no desenvolvimento:

- A balança deve ser capaz de ser utilizada no túnel de vento do LEA considerando que a janela de acesso está localizada na face superior da sessão de testes;
- A balança deve ser dimensionada para ser utilizada no túnel de vento do LaSE;
- O suporte do modelo deve ser removível para permitir diferentes tipos de experimentos;
- A estrutura deve utilizar componentes comerciais o máximo possível a fim de diminuir os custos.

3.3.1 BASE PRINCIPAL

A base principal é o maior componente da estrutura e junto dos apoios suporta toda a balança. É na base principal onde as células de carga são fixadas. A base principal foi construída usando perfis estruturais de alumínio 20 × 20 mm

para facilitar a montagem. Os perfis são unidos com cantoneiras usando porcas e parafusos próprios para perfis estruturais que garantem uma estrutura rígida sem a necessidade de soldas ou de outros processos de fabricação complexos.

As células de carga que medem sustentação são diretamente fixadas na face inferior dos perfis utilizando porcas como espaçadores. A célula de carga que mede arrasto é fixada no furo central do perfil estrutural utilizando uma placa adaptadora. O bloco adaptador é uma placa de alumínio com dois furos, um furo M6 para fixação do bloco na base principal, e um furo M3 para fixação da célula de carga na placa adaptadora. A Figura 7 mostra um modelo virtual da placa adaptadora.

A Figura 6 mostra um modelo virtual da base principal montada com as células de carga fixadas.

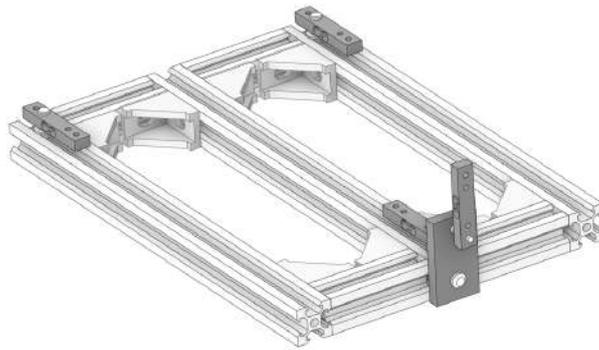


Figura 6: Modelo virtual da base principal

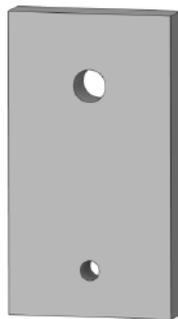
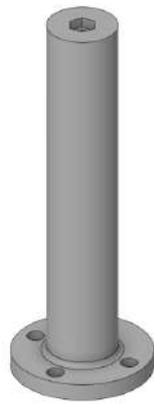


Figura 7: Modelo virtual da placa adaptadora

3.3.2 APOIOS

Os apoios são os componentes responsáveis por elevar e sustentar a base principal. A motivação de se usar apoios é permitir que a balança seja montada de forma invertida, com o modelo se estendendo abaixo da base principal.

Três apoios são utilizados no total, dois fixados na base principal e um fixado à célula de carga que mede arrasto. Os apoios foram fabricados em PLA usando uma impressora 3D. Os apoios da base principal tem um encaixe para uma porca na face superior para rosquear um parafuso. Esse parafuso é então encaixado na ranhura do perfil estrutural. Na Figura 8a pode ser visto um modelo virtual do apoio da base principal e na Fig. 8b pode ser visto o apoio da célula de carga.



(a) Apoio da base principal



(b) Apoio da célula de carga

Figura 8: Modelos virtuais dos apoios

3.3.3 PLATAFORMA

A plataforma é o componente que transmite as forças geradas no modelo para os sensores fixados na base principal. A plataforma deve ser rígida para que as forças sejam inteiramente transferidas para os sensores adequados. A peça foi fabricada em poliacetal por ser um material disponível na universidade. No centro da plataforma há um furo passante para que o suporte do modelo seja fixado com porcas. Na Figura 9 é possível ver um modelo da plataforma.

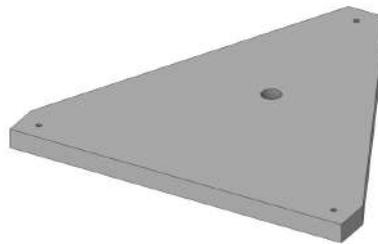


Figura 9: Modelo virtual da plataforma

3.3.4 SUPORTE

O suporte é o componente que conecta o modelo dentro da sessão de testes à plataforma. O componente ainda não foi definido, mas deve ser baseado em um eixo com uma das pontas rosqueadas para ser fixado na plataforma.

4. RESULTADOS

O resultado obtido nesse trabalho é a balança de forças que pode ser vista na Fig. 10. Os componentes enumerados apresentados são:

1. Base principal;
2. Células de carga;
3. Apoios da base;
4. Placa adaptadora;
5. Apoio da célula de carga;
6. Plataforma.

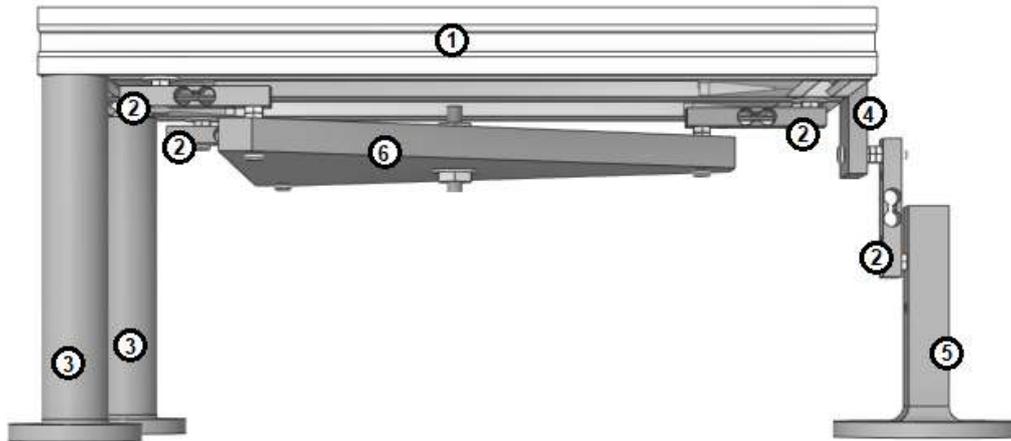


Figura 10: Vista lateral da balança com componentes numerados

5. CONCLUSÃO

Balanças de força são essenciais em ensaios em túnel de vento e não devem ser um impedimento para realizar experimentos. Neste trabalho foi proposta uma balança de forças baseada em componentes comerciais e poucos processos de fabricação complexos de modo que o projeto seja acessível.

Este trabalho propõe um projeto de balança de forças externa do tipo plataforma de quatro componentes: força de sustentação, força de arrasto, momento de arfagem e momento de rolamento. A balança foi projetada visando operar nos túneis de vento da UnB para servir de apoio a disciplinas e a projetos de equipes de competição de foguetemodelismo.

A balança utiliza quatro células de carga que medem até 300 g conectadas a amplificadores HX711 controladas por um microcontrolador Arduino Uno.

A estrutura da balança foi pensada para que seja operada a partir da parede superior da sessão de testes do túnel de vento para se adequar aos requisitos do túnel de vento do LEA. A estrutura é composta em parte por componentes comerciais e em parte por componentes fabricados com impressão 3D ou com processos de usinagem simples.

6. REFERÊNCIAS

- Anderson, J.D., 2009. *Fundamentals of aerodynamics*. McGraw.
- Barlow, J.B., Rae, W.H. and Pope, A., 2015. *Low speed wind tunnel testing*, Vol. 7. INCAS-National Institute for Aerospace Research "Elie Carafoli".
- Macías, M.M., 2016. *Estudo experimental em túnel de vento de turbinas de eixo horizontal*. Mestrado em ciências mecânicas, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.
- Mendes, R.C.F., 2020. *Interação entre esteiras aerodinâmicas de turbinas de eixo horizontal em arranjos*. Doutorado em ciências mecânicas, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.
- Niskanen, S., 2009. *Development of an Open Source model rocket simulation*. Master of science in technology, Faculty of Information and Natural Sciences, Helsinki University of Technology, Espoo.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.