



Enzo Petersen Corrêa

Projeto de balança aerodinâmica de três eixos para túnel de vento

Trabalho de Conclusão de Curso

Orientador: Prof. Igor Braga de Paula

Declaro que o presente trabalho é de minha autoria e que não recorri, para realizá-lo, a nenhuma forma de ajuda externa, exceto quando autorizado pelo professor tutor.

Rio de Janeiro, Dezembro de 2023

Agradecimentos

Ao meu orientador, Igor Braga de Paula, por partilhar comigo seu tempo, conhecimento e instruções, contribuindo diretamente na minha execução do projeto. Durante esses cinco anos, tive a oportunidade de contar com ótimos professores na minha formação acadêmica e técnica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ressalto minha gratificação à equipe de competições de AeroDesign AeroRio, onde pude conhecer colegas de diversos cursos e períodos, além de desenvolver meu conhecimento nas áreas de estudo que até hoje tenho interesse e apreço.

Gostaria de agradecer à minha equipe do Laboratório de Mecatrônica do CEPEL, a qual tive a oportunidade de estagiar junto, durante dois anos, aplicando conceitos vistos no curso e obtendo aprendizados complementares.

Aos meus pais, Graça de Fátima e Luiz Alberto, por me incentivarem diante dos meus interesses, me estabilizarem em momento de dificuldade e sempre se preocuparem com o minha satisfação e futuro profissional.

E finalmente, aos meus avôs, Fernando e Francisco, por sempre me contagiarem com conhecimentos diversos e relevantes, aprendizados e conversas agregadoras à minha sabedoria. Um agradecimento complementar ao Fernando pelo financiamento de todos meus estudos necessários.

Resumo

Projeto de balança aerodinâmica de três eixos para túnel de vento

Os túneis de vento correspondem a uma ferramenta para simular experimentalmente o escoamento aerodinâmico sobre corpos de interesse. Para o máximo proveito do túnel de vento do Laboratório de Mecatrônica do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPTEL, entendeu-se como essencial o desenvolvimento de uma balança aerodinâmica de três eixos, visto que através das medidas de sustentação, arrasto e momento de arfagem, os projetos e estudos realizados pela equipe seriam complementados por dados experimentais. Alguns fatores, como o campo de atuação do laboratório e especificações do túnel de vento, encaminham a escolha do modelo de estrutura da balança em questão. Após a definição do molde da instrumentação, são selecionados os componentes mecânicos e eletrônicos detalhadamente, garantindo a robustez do equipamento final. Os processos de calibração e de análise de incertezas das medições também se apresentam como etapas cruciais do projeto. E por fim, provando a funcionalidade da ferramenta elaborada, a validação é elaborada através de um corpo de prova de resultados previamente conhecidos.

Palavras-chave

Balança aerodinâmica; Túnel de vento; Aerodinâmica; Extensômetria; Strain-Gaug; Instrumentação; Célula de carga; Sustentação; Arrasto; Momento de Arfagem.

Abstract

Three-axis wind tunnel balance design.

Wind tunnels correspond to a tool for experimentally simulating the aerodynamic flow over bodies of interest. To make the most of the wind tunnel at the Mechatronics Laboratory of the Center for Energy Research - CEPEL, it was understood as essential to develop a three-axis balance, as through the measurements of lift, drag, and pitching moment, the projects and studies conducted by the team would be complemented by experimental data. Some factors, such as the laboratory's field of application and the wind tunnel specifications, guide the choice of the balance's structural model. After defining the instrumentation's design, mechanical and electronic components are selected in detail, ensuring the robustness of the final equipment. Calibration and measurement uncertainty analysis processes also present themselves as crucial stages of the project. And finally, to prove the functionality of the developed tool, validation is carried out using a test body with previously known results.

Keywords

Wind Tunnel Balance; Wind Tunnel; Aerodynamic; Strain-Gauge; Instrumentation; Loadcell; Lift; Drag; Pitching Moment.

Sumário

	1 INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivos	14
	2 ABORDAGEM	15
	3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Túneis de Vento	16
3.2	Balanças aerodinâmicas	18
3.3	Extensometria	22
	4 METODOLOGIA	24
4.1	Sistema de coordenadas e concepções aerodinâmicas	24
4.2	Especificações do Túnel de Vento	25
4.3	Condições de testes	26
4.4	Modelo de balança adotado	29
4.5	Cronograma	31
	5 PROJETO DA BALANÇA AERODINÂMICA	32
5.1	Design e modelagem 3D	32
5.2	Análise estrutural	34
5.3	Componentes	35
5.4	Projeto Eletrônico	39
5.5	Orçamento	40
	6 RESULTADOS	42
6.1	Calibração	43
6.1.1	Calibração da medição das forças aerodinâmicas	44
6.1.2	Calibração da medição do momento de arfagem	47
6.2	Análise de incertezas	49
6.2.1	Incerteza na medição das forças	50
6.2.1.1	Incerteza do Tipo A	50
6.2.1.2	Incerteza do Tipo B	51
6.2.1.3	Incerteza Total	52
6.2.2	Incerteza na medição do momento	53

6.2.2.1	Incertezas do tipo A	53
6.2.2.2	Incerteza do tipo B	54
6.2.2.3	Incerteza Total	55
6.3	Validação experimental	56
7	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	59
A	DADOS EXPERIMENTAIS COMPARATIVOS PARA A VALIDAÇÃO	60

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplos esquemáticos da caracterização do circuito dos túneis de vento.	16
Figura 2 – Componentes principais do túnel de vento.	17
Figura 3 – Modelo <i>Wire</i> de balança aerodinâmica.	19
Figura 4 – Modelo <i>Plataform</i> de balança aerodinâmica.	19
Figura 5 – Modelo <i>Yoke</i> de balança aerodinâmica.	20
Figura 6 – Modelo <i>Pyramidal</i> de balança aerodinâmica.	20
Figura 7 – Alternativas comuns para montagem de corpo de prova.	21
Figura 8 – Balança interna <i>Sting</i>	21
Figura 9 – Extensômetros de fio.	22
Figura 10 – Ponte de <i>WheatStone</i>	23
Figura 11 – Eixos de referência.	25
Figura 12 – Túnel de Vento do LabME.	26
Figura 13 – Modelos de corpo de prova adotados.	27
Figura 14 – Gráficos de C_L e C_M do S1223.	28
Figura 15 – Túnel de Vento do CBA MIT.	29
Figura 16 – Balança Aerodinâmica desenvolvida para o Túnel de Vento CBA-MIT.	30
Figura 17 – Cronograma desenvolvido para o atual trabalho.	31
Figura 18 – Modelagem 3D do design desenvolvido.	32
Figura 19 – Vista explodida dos componentes estruturais.	33
Figura 20 – Simulações para análise de tensão dos casos críticos.	34
Figura 21 – Viga em L	35
Figura 22 – Peças usadas em alumínio.	36
Figura 23 – Barra retificada de Aço Inox 8mm X 1m.	37
Figura 24 – Componentes auxiliares ao eixo.	37
Figura 25 – Sensores utilizados para a medição de forças e momento.	38
Figura 26 – Sistema de controle do ângulo de ataque	38
Figura 27 – Leitura e aquisição de dados.	39
Figura 28 – Modelos de PCB's utilizados no projeto eletrônico.	40
Figura 29 – Montagem final da balança aerodinâmica de três eixos	42
Figura 30 – Equipamentos utilizados na calibração.	43
Figura 31 – Planos de calibração.	47
Figura 32 – Curva de calibração para o momento de arfagem.	49
Figura 33 – Perfil Eppler 387 usado na validação da balança.	56

Figura 34 – Processos de validação da balança com 95% de confiabilidade.	57
Figura 35 – Dados experimentais do Sumário de Aerofólios de Baixos Reynolds. . .	60

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Modelos de balanças aerodinâmicas para túnel de vento.	18
Tabela 2 – Especificações do aparato aerodinâmico.	25
Tabela 3 – Especificações do aparato aerodinâmico.	26
Tabela 4 – Valores limites utilizados para o projeto.	29
Tabela 5 – Custo total do projeto.	41
Tabela 6 – Valores de custo de modelos comparativos	41
Tabela 7 – Calibração do sensor das forças	44
Tabela 7 – Calibração do sensor das forças (Continuação)	45
Tabela 7 – Calibração do sensor das forças (Continuação)	46
Tabela 8 – Calibração do sensor de momento	48
Tabela 9 – Especificações Técnicas da célula de carga PLA	51
Tabela 10 – Especificações Técnicas do amplificador HX711	51
Tabela 11 – Especificações Técnicas do sensor de momento	54

Lista de Símbolos

α Ângulo de ataque

A Área

a Coeficiente de calibração

b Braço de aplicação de força

C_D Coeficiente de arrasto

C_L Coeficiente de sustentação

C_M Coeficiente de momento de arfagem

\bar{c} Corda aerodinâmica

D Arrasto

DP Desvio padrão

\bar{DP} Desvio padrão médio

ϵ Deformação

F Força

GL Grau de liberdade

GL_{ef} Grau de liberdade efetivo

K Fator de abrangência

k Fator de sensibilidade do extensômetro

L Sustentação

M Momento

M_a Momento de arfagem

Ma Número de *Mach*

ρ Densidade do ar

R Resistência elétrica

Re Número de *Reynolds*

$RMSE$ Erro médio quadrático

σ Tensão mecânica

σ_E Limite de escoamento

u Incerteza

u_{comb} Incerteza combinada

u_{exp} Incerteza expandida

μ Viscosidade do ar

v Velocidade

V_{in} Tensão elétrica de entrada

V_{out} Tensão elétrica de saída

x Leitura medida por sensor

Lista de Siglas

CAD Computer-Aided Design

CBA Center for Bits and Atoms

CEPEL Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CFD Computational Fluid Dynamics

CNC Controle Numérico Computadorizado

HP Horse Power

IoT Internet of Things

LabME Laboratório de Mecatrônica do CEPEL

MIT Massachusetts Institute of Technology

NASA National Aeronautics and Space Administration

PCB Printed Circuit Board

USB Universal Serial Bus

3D Três Dimensões

1

Introdução

A aerodinâmica corresponde a um ramo da mecânica dos fluídos responsável pelo estudo da interação fluído estrutura em diversas aplicações da engenharia. Seus principais objetivos englobam analisar as forças exercidas pelo fluído sobre os corpos que nele estão imersos. Grandes exemplos de aplicações do estudo aerodinâmico abrangem os setores aeroespaciais, automotivos, de energia eólica e de engenharia civil.

Com a finalidade de desenvolver um projeto de engenharia no qual a aerodinâmica está envolvida, as três grandes tendências utilizadas para o completo estudo dos fenômenos da dinâmica dos fluidos correspondem às simulações computacionais, representadas por CFD, modelos analíticos e análises experimentais.

Por mais que sejam amplamente utilizados na engenharia, principalmente como modelos preliminares, os cálculos analíticos e numéricos do comportamento dinâmico dos fluidos não garantem a fidelidade dos fenômenos verificados na prática, visto que consideram métodos semi-empíricos. Portanto, a utilização desses modelos de forma integrada às análises experimentais proporciona um estudo mais completo e válido.

A fim de executar as análises experimentais, tornando possível um estudo quantitativo e qualitativo do escoamento aerodinâmico, o túnel de vento corresponde à principal ferramenta utilizada. Por meio dele, empresas, centros de pesquisa e universidades conseguem simular o fluxo de fluido ao redor de corpos de prova e modelos em escala sob condições diversas.

Entretanto, para que seja possível o emprego dos túneis de vento, essas instalações devem fazer uso da instrumentação e do controle do sistema. Essa instrumentação possibilitará a aquisição de dados de pressão, força, e demais condições do fluido.

Dentre diversos aparatos da instrumentação de um túnel de vento, cita-se a balança aerodinâmica, responsável por obter as medições das forças e momentos induzidos pelo escoamento sobre o corpo de prova estudado no túnel.

1.1

Motivação

Desde o final do segundo semestre de 2021, o estágio no Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL vem sendo realizado, mais especificamente no laboratório de mecatrônica LabME. O principal foco do estágio tem sido na área de mecânica dos fluidos, visto que certos projetos desenvolvidos pelo laboratório estão associados à escoamentos aerodinâmicos constantes e à fenômenos aeroelásticos.

Como uma das alternativas para complementar o estudo aerodinâmico das situações previstas, juntamente de simulações CFD, desenvolveu-se um túnel de vento de baixos Reynolds e circuito aberto. Entretanto, para que esse possa ser empregado como ferramenta de desenvolvimento de projetos, é essencial sua instrumentação, incluindo a integração de uma balança aerodinâmica que possibilite a obtenção das cargas e momentos atuantes nos corpos de prova estudados.

1.2

Objetivos

O objetivo primário desse projeto consiste no desenvolvimento de uma balança aerodinâmica de três eixos como alternativa da compra de um dos sistemas de elevado preço existentes no mercado. Assim, visa-se tornar possível a medição das cargas e esforços aerodinâmicos, incrementando a instrumentação do túnel de vento do Laboratório de Mecatrônica do Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL.

Indiretamente, o desenvolvimento do equipamento pretende resultar em projetos desenvolvidos pela equipe mais fidedignos e embasados aerodinamicamente, proporcionando a otimização da eficiência aerodinâmica dos componentes submetidos à escoamentos constantes. Ademais, também é propósito da balança possibilitar a etapa de validação para futuros estudos e artigos científicos atrelados ao campo da mecânica dos fluidos e escoamento externo.

2

Abordagem

Neste trabalho, optou-se pela elaboração de uma balança aerodinâmica de três eixos, ou seja, capaz de realizar a medição das forças de sustentação, arrasto e o momento de arfagem, visto que tal equipamento atenderia as necessidades do laboratório para os estudos aerodinâmicos de projetos internos, dispensando um nível de complexidade maior ao instrumento.

Vale ressaltar que os estudos propostos pelo laboratório são grande parte vinculados à energia eólica e ao escoamento aerodinâmico do vento aos sistemas de transmissão elétrica. Portanto, comparado com as condições apresentadas pelo campo da engenharia aeronáutica, os regimes de Reynolds vinculado com os futuros projetos do laboratório em análise são de baixa ordem de grandeza.

Considerando que a obtenção de uma balança aerodinâmica corresponde a uma das etapas de instrumentação do túnel de vento do LabME, foi de interesse da equipe que esse projeto fosse executado internamente para que pudesse ser facilmente integrado à demais equipamentos futuramente necessários. Ou seja, a execução desse presente projeto representa uma alternativa para os sistemas de instrumentação de túneis de vento encontrados no mercado, que além de estarem associados a elevados preços, também apresentam pouca versatilidade e escassas informações técnicas.

3

Revisão Bibliográfica

3.1

Túneis de Vento

Essencialmente, um túnel de vento é um dispositivo no qual um fluxo de ar é produzido sobre um corpo de prova, permitindo um estudo aerodinâmico de forma experimental. Normalmente, o fluxo do fluido é projetado de forma que seja uniforme em velocidade e direção. Os túneis de vento podem ser projetados a partir de dois principais modelos de circuito: abertos ou fechados [Bradshaw e Pankhurst 1964]. Essas configurações de montagem são exemplificadas pela Figura 1.

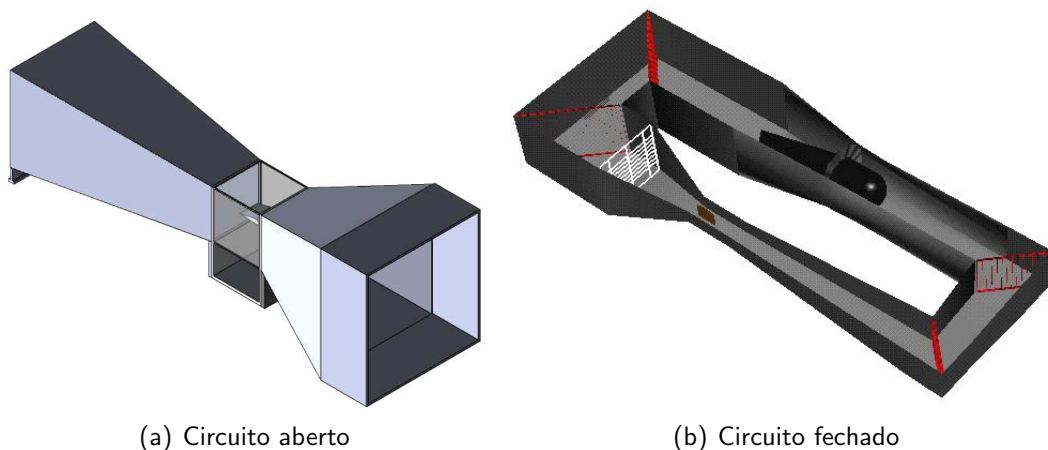


Figura 1 – Exemplos esquemáticos da caracterização do circuito dos túneis de vento.

Aqueles de circuito aberto aspiram o ar ambiente por uma de suas extremidades, gerando o escoamento pelo comprimento do duto e finalmente expelindo o fluido pela outra extremidade. Já na condição do circuito fechado, a massa de ar do sistema se mantém constante, já que o fluxo circula em *loop* através dos componentes do túnel.

Apesar da variação do modelo de circuito apresentado, os túneis de vento como um todo costumam apresentar alguns componentes, que são: o sistema de ventilador e motor, responsável por criar o escoamento no duto; alinhadores de escoamento e colmeia, permitindo a uniformização do fluxo com turbulência minimizada; seção de testes, região de posicionamento dos corpos de prova ensaiados; seção de contração,

onde o escoamento tem sua velocidade aumentada pela redução de área; e difusor, representando a última porção da estrutura.

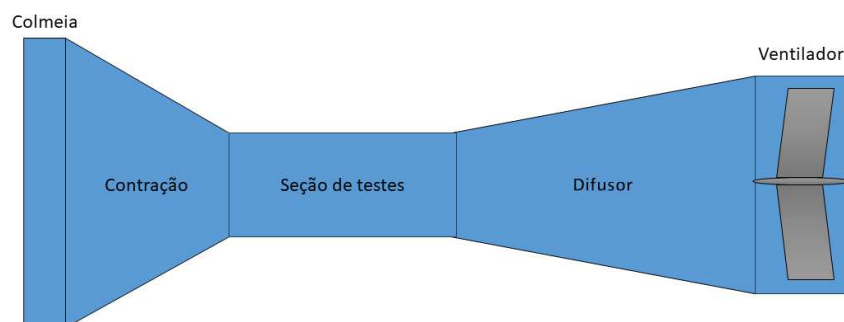


Figura 2 – Componentes principais do túnel de vento.

Outro modo de categorizar os túneis de vento é em relação às velocidades atingidas pelo escoamento na seção de testes. Esses são subdivididos em subsônicos, transônicos, supersônicos e hipersônicos, levando em conta a faixa do número de Mach em que o aparato opera [Gorlin e Slezinger 1966].

Os túneis subsônicos ($Ma < 0,8$) podem ser divididos nos de baixa velocidade ($Ma < 0,4$) ou alta velocidade ($0,4 < Ma < 0,8$). Esses são comumente empregados na calibração de equipamentos de medição, testes em perfis aerodinâmicos, ensaios em modelos de veículos, aeronaves, entre outros.

Os túneis transônicos além de também serem responsáveis por testar modelos de aeronaves, apresenta grande papel no estudo de fenômenos de compressibilidade, visto que atua na faixa de $0,8 < Ma < 1,2$.

Os túneis supersônicos ($1,2 < Ma < 5$) e hipersônicos ($Ma > 5$) funcionam a partir do alto consumo de energia, ocasionando nas suas utilização de forma intermitente. Ademais, os hipersônicos acabam basendo o uso de sistemas de refrigeração próprio, tendo em vista as altas temperaturas atingidas.

Por fim, vale ressaltar que caso um túnel tenha capacidade em operar nos 3 regimes sônicos, esse é dito como trisônico.

Quanto à instrumentação de um túnel de vento, pode-se classificá-la em quatro principais grupos, sendo eles: os instrumentos de medição de parâmetros do escoamento aerodinâmico (como velocidade, densidade, temperatura e umidade), dispositivos de medição das forças e momentos induzidos aos corpos de prova, equipamentos que determinam o padrão do fluxo ao redor dos modelos, e por fim, ferramentas que contribuem para o controle do próprio túnel e das suas expansões.

3.2

Balanças aerodinâmicas

É possível descrever uma balança aerodinâmica como um dispositivo de medição de forças e momentos que agem sobre o corpo de prova ensaiado em túnel de vento. Idealmente, uma balança completa deve ser capaz de apresentar as componentes dos esforços aerodinâmicos separadamente.

Inicialmente, vale comentar sobre a variação das balanças aerodinâmicas quanto ao número de eixos que suas medições estão associadas. Propõe-se que a maior complexidade corresponde aos instrumentos de seis eixos [Barlow, Rae e Pope 1999], visto que demonstram ser capazes de medir as três forças aerodinâmicas e os três momentos existentes. Entretanto, a quantidade de eixos apresentada pode variar com os interesses de estudo associados ao projeto da balança.

Outrossim, existem diversos modelos de balanças aerodinâmicas para túnel de vento, mas os mais relevantes podem ser compactados em balanças externas, balanças internas e balanças rotativas [Gonzalez et al. 2011]. Modelos esses que são descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos de balanças aerodinâmicas para túnel de vento.

Tipos de balanças	Características
Balanças externas	São posicionadas fora dos modelos ensaiados, e normalmente, fora das seções de teste do túnel. São responsáveis por introduzir interferência no fluxo de ar. Uma alta flexibilidade nos estudos realizados é garantido tendo em vista a possibilidade de modificar os corpos ensaiados.
Balanças internas	Essas ficam integradas ao modelo estudado, eliminando interferências ao fluxo do escoamento e tornando as cargas medidas mais próximas dos pontos de aplicação. Não oferecem flexibilidade no teste de diferentes modelos, além de apresentarem uma maior complexibilidade de projeto e instalação e usinagem.
Balanças rotativas	São utilizadas para o estudo de hélices, pás de helicópteros, turbinas e outros modelos submetidos ao movimento de rotação.

Dentre os modelos de balanças externas, quatro grandes configurações existentes ganham destaque, são essas: *Wire*, *Platform*, *Yoke* e *Pyramidal* [Barlow, Rae e Pope 1999].

Para a balança *Wire*, ilustrada pela Figura 3, o corpo de prova é suspenso por fios integrados à extensômetros. Em comparação com as demais alternativas, essas configurações não são utilizadas atualmente, visto que deixam a desejar no quesito de robustez e versatilidade, além de apresentarem um valor de arrasto adicional pelo efeito de tara no escoamento. Esse tipo de configuração foi uma das primeiras desenvolvidas mas não muito amplamente adotada visto que eram pouco robustas, pouco versáteis e possuíam dificuldade em proporcionar boa precisão tendo em vista o elevado arrasto gerado pelos fios.

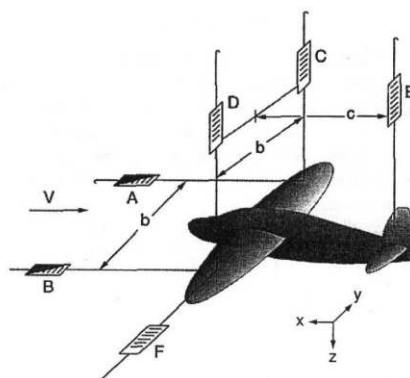


Figura 3 – Modelo *Wire* de balança aerodinâmica.

Fonte: [Barlow, Rae e Pope 1999]

Os demais modelos de balança utilizam de peças chamadas de *struts* no acoplamento dos corpos de prova e diferem-se pela forma que são montadas.

A categoria *Plataform* apresenta fácil manufaturabilidade, montagem e instrumentação, porém demonstram empecilhos nos fatos de que as forças e momentos resultantes ficam acoplados e na não coincidência do centro de resolução da balança com o centro do túnel de vento. Esse modelo é apresentado pela Figura 4.

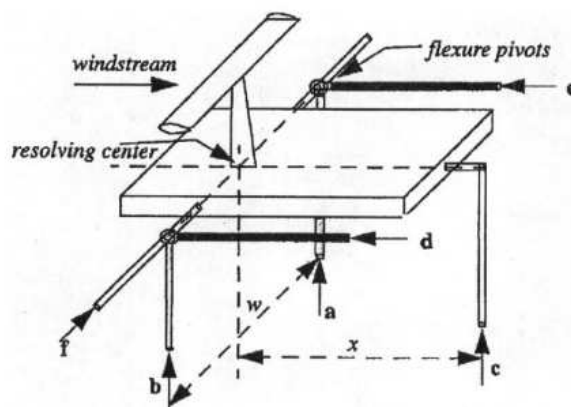


Figura 4 – Modelo *Plataform* de balança aerodinâmica.

Fonte: [Barlow, Rae e Pope 1999]

Como solução para os problemas mencionados nas balanças do estilo *Plataform*, as de configuração *Yoke* conseguem driblar tais aspectos negativos, sendo mostradas pela Figura 5. Entretanto, por sua vez, essas estão associadas à grandes deformações visto seus grandes braços de medição.

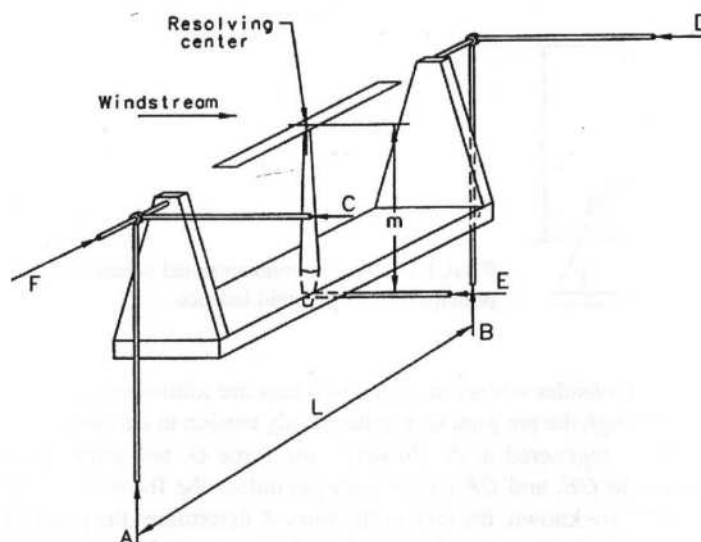


Figura 5 – Modelo *Yoke* de balança aerodinâmica.

Fonte: [Barlow, Rae e Pope 1999]

As balanças de modelo *Pyramidal* são capazes de medir as seis componentes de força e momento separadamente, evitando o acoplamento entre os valores, exigindo um maior grau de complexidade no projeto e na calibração. A Figura 6 explicita a categoria.

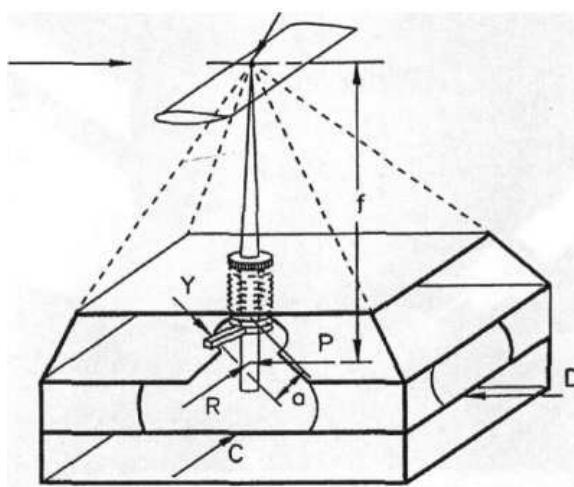
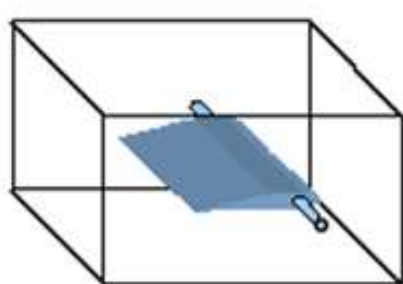


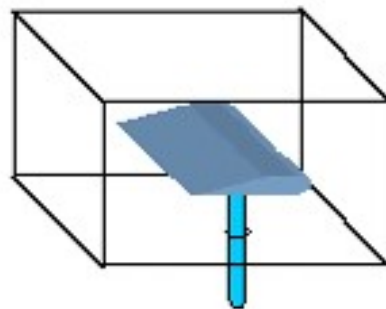
Figura 6 – Modelo *Pyramidal* de balança aerodinâmica.

Fonte: [Barlow, Rae e Pope 1999]

Considerando a montagem do corpo de prova ensaiado através de uma balança aerodinâmica, a NASA [Zante 1999] apresenta dois métodos amplamente utilizados, ilustrados pela Figura 7. Nota-se que o modo de montagem pela parede aproveita a envergadura dos corpos para interferir o mínimo possível no escoamento de ar. Entretanto, o mecanismo alternativo, que utiliza uma haste vertical, compõe um sistema mais compacto.



(a) Montagem através da parede



(b) Montagem através de haste vertical

Figura 7 – Alternativas comuns para montagem de corpo de prova.

Fonte: [Zante 1999]

Para concluir, no âmbito das balanças internas, destaca-se o *Sting*, estrutura em haste usinada com precisão, sendo normalmente equipada com extensômetros e encaixada nos corpos de prova a partir da extremidade traseira do modelo, interferindo minimamente no escoamento aerodinâmico. O *Sting* é exemplificado pela Figura 8.

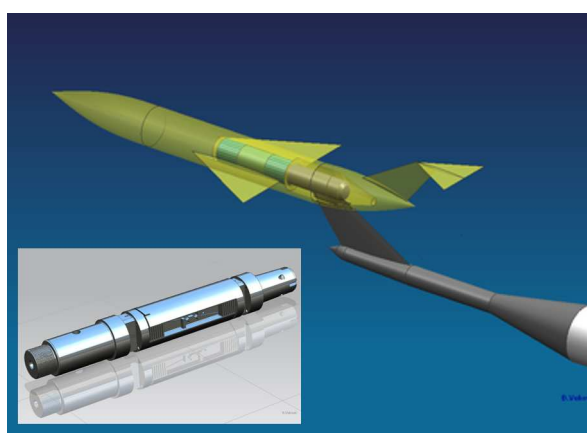


Figura 8 – Balança interna *Sting*.

Fonte: AGARD-B.

3.3

Extensometria

Forças e momentos podem ser medidos através de múltiplas maneiras, porém, de modo geral, essas podem ser divididas em dois grandes grupos, são eles: os dispositivos hidráulicos e os dispositivos elétricos. Os dispositivos hidráulicos utilizam manômetros para mensurar a pressão exercida sobre os pistões, enquanto, de forma ampla, os dispositivos elétricos atuam como transdutores que convertem as grandezas mecânicas mencionadas em sinais elétricos. Exemplos desses componentes elétricos são os extensômetros e sensores piezoelétricos.

No processo de medições realizadas pelas balanças aerodinâmicas, as técnicas elétricas são preferidas. E por apresentarem alta linearidade, precisão de medição, dimensões reduzidas, baixa histerese, alta versatilidade e baixo tempo de resposta, os extensômetros possuem amplo emprego nesses sistemas. Os extensômetros possuem seu funcionamento baseado na modificação da resistência elétrica de certo material quando o mesmo é deformado. Portanto, esses transdutores são responsáveis por medir deformação mecânica dos sistemas em que estão integrados.

A partir da Figura 9, é possível observar exemplos diversos de extensômetros.

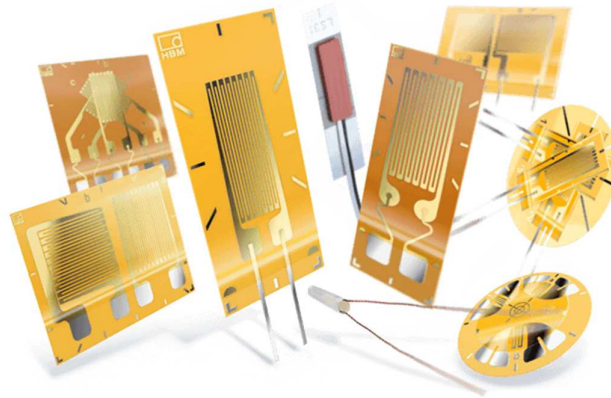


Figura 9 – Extensômetros de fio.
Fonte: HBM.

Usualmente, a relação da resistência do extensômetro com a deformação mecânica do sensor é dada pela seguinte equação:

$$\frac{dR}{R} = k \cdot \epsilon \quad (3.1)$$

Considerando que as variações de resistência elétrica dos extensômetros são bem pequenas quando submetidos às deformações mecânicas, propõem-se a formação da configuração de ponte de *WheatStone* completa, exemplificada pela Figura 10. Dessa forma, as medições consequentes possuem maior precisão garantida.

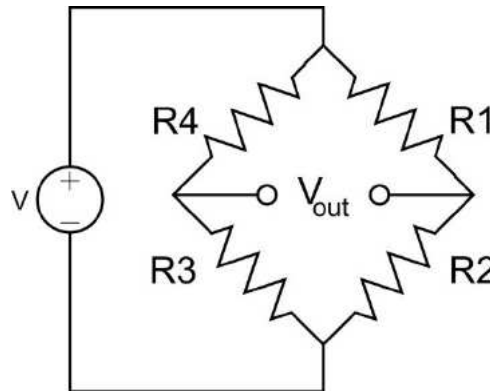


Figura 10 – Ponte de *WheatStone*.

Em particular, a ponte de *WheatStone* consiste em quatro resistores combinados em dois ramos do circuito. Dessa forma, quando o sistema é submetido a uma tensão de entrada V_{in} , existe a possibilidade de dois cenários, sendo esses o equilíbrio ou o desequilíbrio da ponte.

Mais detalhadamente, se houver igualdade no produto das resistências cruzadas do circuito, consideramos a ponte como equilibrada, visto que não há diferença de potencial entre os ramos. Caso contrário, havendo uma desigualdade no produto das resistências cruzadas gerada pela segunda lei de Ohm, induzida pela deformação de um dos extensômetros, existirá uma diferença de potencial elétrico correspondente à tensão de saída V_{out} .

Portanto, através da medição da tensão de saída da ponte de *WheatStone*, torna-se capaz calibrar um equipamento para a medição de deformações por meio da utilização de extensômetros, sendo um dos pares de resistores submetido à tensão mecânica enquanto o outro à compressão.

4

Metodologia

São vários os fabricantes de balanças aerodinâmicas encontrados no mercado, apresentando diversas soluções de medições para diferentes faixas de cargas e esforços. Como já desenvolvido na referência bibliográfica, o desenvolvimento desses projetos e sistemas estão vinculados diretamente ao modo de operação e finalidade. Portanto, nesse atual capítulo serão abordados os requerimentos, conjecturas, organização e outros aspectos que se mostraram importantes para cada decisão tomada no desenvolvimento do trabalho.

De início, são enumerados alguns aspectos técnicos essenciais que devem ser atendidos para uma elaboração bem-sucedida de balança aerodinâmica e estarão associados ao longo desse capítulo:

- Definição das faixas de medição.
- Escolha da configuração e design da balança.
- Dimensionamento geométrico.

4.1

Sistema de coordenadas e concepções aerodinâmicas

A fim de compreender corretamente as forças e momentos aerodinâmicos vinculados aos ensaios experimentais, é fundamental a definição dos eixos de referência. Existem muitos grupos de eixos de referência visto que podem ser definidos a partir do objetivo e modelo dos sistemas testados.

Em aplicações de túnel de vento, é comum utilizar o eixo do escoamento do vento como quadro de referência, sendo assim esse o adotado no presente projeto. Sua origem é fixada no centro de referência de momentos do modelo, coincidente ao ponto de fixação do corpo ensaiado.

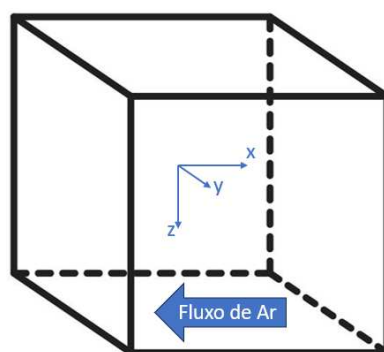


Figura 11 – Eixos de referência.

Por meio desse sistema de coordenadas definido e ilustrado pela Figura 11, os componentes aerodinâmicos de força e momento atuantes no modelo se tornam perfeitamente alinhados com os eixos.

A força e momento gerados no eixo XX são respectivamente o Arrasto e o momento de rolagem. No eixo YY , denominamos a força lateral e o momento de Arfagem. E por fim, a força de sustentação e o momento de guinada são visualizados no eixo ZZ . Para um melhor entendimento, a Tabela 2 unifica as nomenclaturas utilizadas com o sistema de eixos proposto.

Tabela 2 – Especificações do aparato aerodinâmico.

Força Aerodinâmica	Designação	Momento Aerodinâmico	Designação
Arrasto	F_x	Rolagem	M_x
Lateral	F_y	Arfagem	M_y
Sustentação	F_z	Guinada	M_z

4.2

Especificações do Túnel de Vento

O túnel de vento do Laboratório de Mecatrônica do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPTEL foi desenvolvido ao longo do ano de 2021 visando contribuir nas análises técnicas dos projetos internamente elaborados.

Através das concepções e variáveis já apresentadas sobre esse tipo de instrumento, cabe agora identificar as especificações do túnel vinculado ao atual projeto. Suas características são apresentadas na Tabela 3 e ilustradas pela Figura 12.

Tabela 3 – Especificações do aparato aerodinâmico.

Características do Túnel de Vento do LabME	
Regime do escoamento	Subsônico
Circuito	Aberto
Seção de Testes	0,60 m X 0,60 m
Comprimento da seção de teste	2,0 m
Comprimento total	4,7 m
Bocal de entrada	1,63 m X 1,63 m
Bocal de saída	0,84 m X 0,84 m
Potência do motor	1.5 HP
Velocidade máxima	20 m/s



Figura 12 – Túnel de Vento do LabME.

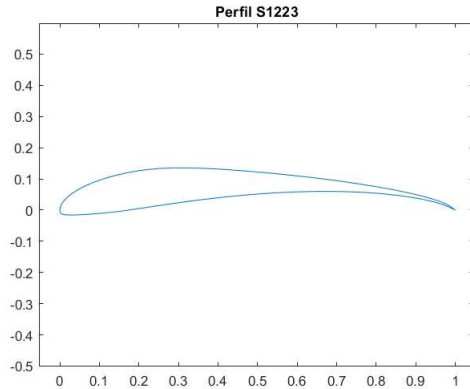
A importância da análise das especificações do Túnel de vento está vinculada a um eficaz processo de limitação e enquadro do projeto, de maneira que seja garantida a utilidade do instrumento no cenário previsto.

4.3

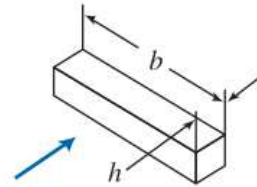
Condições de testes

Considerando que o setor eólico e o setor de transmissão elétrica correspondem às grandes vertentes de estudo do laboratório mencionado, a balança aerodinâmica visada exige uma versatilidade no ensaio de aerofólios, dispositivos IoT localizados em vias de transmissão elétrica e pás eólicas. Portanto, com o intuito de simular um

caso extremo de ensaio para as forças e momento, adotou-se dois corpos para uma análise aerodinâmica, representados na Figura 13.



(a) Aerofólio Selig1223.



(b) Prisma Retangular.

Figura 13 – Modelos de corpo de prova adotados.

Para simular os valores máximos de força de sustentação e o momento de arfagem, considerou-se um escoamento de velocidade máxima do túnel sobre uma asa de perfil aerodinâmico *Selig1223*. O aerofólio mencionado foi selecionado visto que é responsável por produzir um alto coeficiente de sustentação e momento mesmo em baixos reynolds, regime promovido pelos escoamento do túnel de vento em questão.

Para o máximo arrasto promovido em ensaios, pensou-se na situação de fluxo de vento de máxima velocidade promovida pelo túnel sobre um corpo rombudo. O corpo considerado foi o prisma retangular de razão entre comprimento e lado da base tendendo ao ∞ , responsável por um $C_D = 2.05$ [Mitchell et al. 2015].

Para ser possível obter os valores máximos de força de cada componente previsto, levou-se em consideração a relação de área varrida de um corpo para a seção transversal do túnel satisfazer a faixa de 1 – 10% na dimensionalização das amostras das simulações [Pankhurst e Holder 1968].

Fixando o comprimento dos corpos de prova das análises na medida da seção transversal do túnel de vento, obtém-se que a maior medida da altura da projeção varrida dos modelos deve ser 6cm. Ou seja, a corda aerodinâmica do prisma retangular dever corresponder à 6cm e a corda aerodinâmica da asa deve corresponder ao valor de 23cm, visto que para situação de maior C_L o ângulo de ataque da superfície é de 15, resultando em um altura projetada similar ao limite calculado.

A equação usada para calcular o número de Reynolds referente à simulação de teste da asa em túnel de vento é apresentada por:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot \bar{c}}{\mu} \quad (4.1)$$

Por intermédio de uma análise aerodinâmica via *Xfoil/XFLR5* demonstrada pelas Figuras 14, obtém-se os valores máximos em módulo de $C_L = 2.25$ e $C_M = -0.27$ para o perfil S1223 para $Re = 300k$.

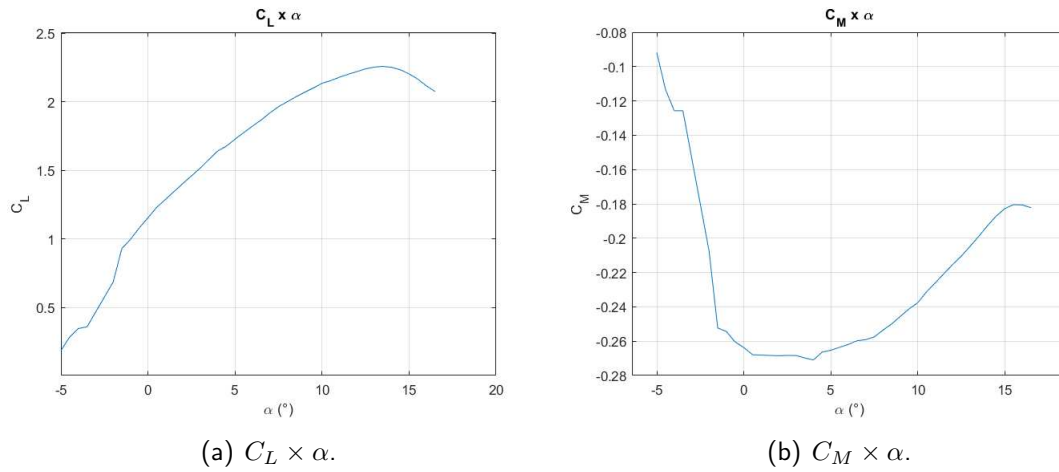


Figura 14 – Gráficos de C_L e C_M do S1223.

Adquiridos os máximos coeficientes aerodinâmicos dos cenários representados, aplica-se as formulações das forças aerodinâmicas de arrasto e sustentação e de momento de arfagem, concluindo finalmente os valores mencionados na Tabela 4, tidos como máximos que o projeto deve suportar.

$$L = \frac{1}{2} \rho \cdot C_L \cdot v^2 \cdot A \quad (4.2)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot v^2 \cdot A \quad (4.3)$$

$$M_a = \frac{1}{2} \rho \cdot C_L \cdot v^2 \cdot A \cdot \bar{c} \quad (4.4)$$

Tabela 4 – Valores limites utilizados para o projeto.

Valores Limites	
Sustentação (L)	$-76,1N$
Arrasto (D)	$18,1N$
Momento de arfagem (M_a)	$1,0N \cdot m$

4.4

Modelo de balança adotado

Estudando a literatura, observou-se a existência de um projeto de balança aerodinâmica para um túnel de vento com especificações similares ao do LabME [Rubio 2021]. A equipe do laboratório CBA-MIT elaborou uma balança de dois eixos para o túnel de vento de baixos Reynolds de suas instalações com aproximadamente $22m/s$ de velocidade máxima. Uma ilustração do túnel descrito é mostrado pela Figura 15.

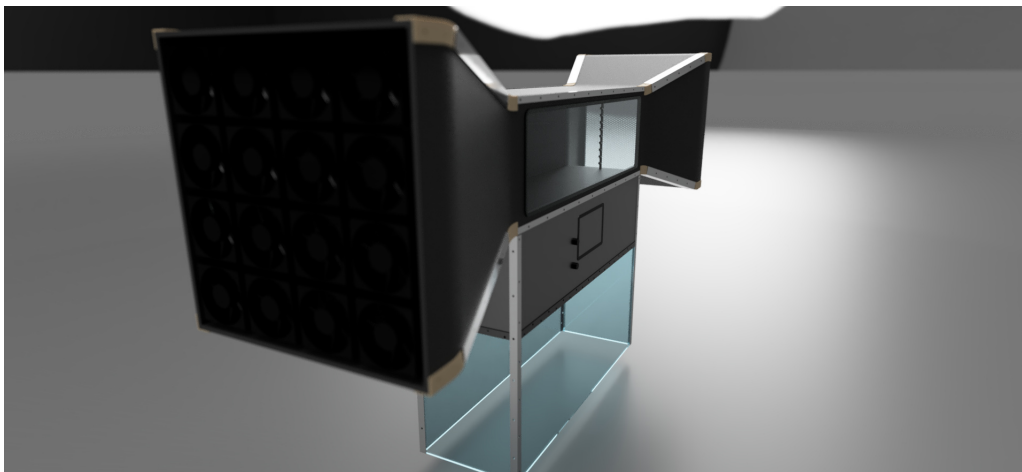


Figura 15 – Túnel de Vento do CBA MIT.

Fonte: [Rubio 2019]

A balança desenvolvida consiste em uma estrutura principal horizontal acoplada externamente ao túnel pelo lado inferior, e que apresenta braços equipados com extensômetros que realizam as medições de cargas exercidas em um eixo passante, onde o corpo de prova é posicionado e tem seu ângulo de ataque controlado por um motor. O projeto explicado é ilustrado pelo esquema da Figura 16.

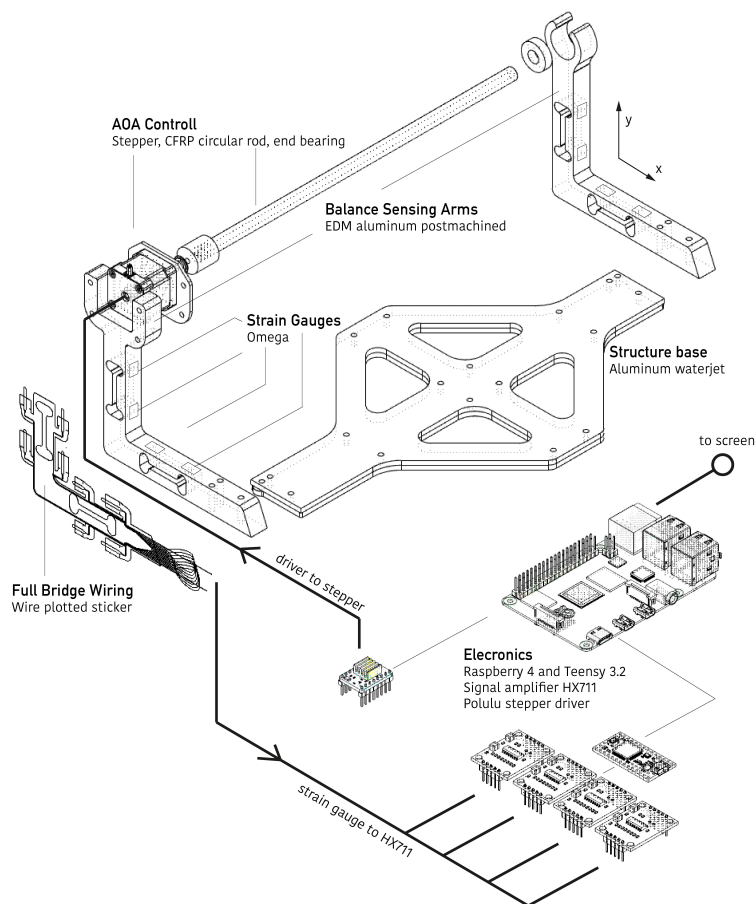


Figura 16 – Balança Aerodinâmica desenvolvida para o Túnel de Vento CBA-MIT.
Fonte: [Rubio 2021]

Por mais que o projeto da balança prevista para o LabME exija a medição do momento de arfagem além das forças de sustentação e arrasto, houve um grande embasamento e inspiração do atual projeto na aplicação realizada no CBA-MIT, visto que por representar uma balança externa possui menor custo de fabricação, menor complexidade e maior versatilidade quanto aos modelos ensaiados.

Ademais, considerando que os estudos do LabME são bem diversificados, uma balança aerodinâmica externa é essencial para permitir o ensaio de diversos corpos de prova de distintos contextos.

O eixo transversal utilizado no sistema da Figura 16 ainda consegue servir como uma boa solução para a diminuição das interferências aerodinâmicas dos experimentos uma vez que nos testes de asas e aerofólios o eixo atuaria como longarina e não estaria em contato com o fluxo de ar, e nos testes voltados ao estudo de dispositivos acoplados em vias de transmissão elétrica o eixo simularia o cabo energizado.

Portanto, considerando aspectos como a similaridade das condições de atuação do equipamento de medição das forças de arrasto e sustentação do laboratório CBA-MIT com as condições de ensaios aerodinâmicos visados no LabME, nível de complexidade, manufaturabilidade, disponibilidade de componentes, decidiu-se aproveitar a proposta mencionada como referência ao atual projeto junto da realização de adaptações ao contexto abordado.

4.5

Cronograma

Com o intuito de gerir o plano de projeto, produziu-se um cronograma das atividades que deveriam ser realizadas e seguidas ao longo do tempo de sua execução. As etapas e prazos são apresentadas na Figura 17.

	Mês								
	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Pesquisa bibliográfica do tema	X								
Definição do Arranjo e Requerimentos	X	X							
Modelagem 3D		X							
Projeto Eletrônico			X						
Compra dos componentes eletrônicos			X						
Fabricação/Usinagem do Arranjo				X	X				
Fabricação da PCB				X	X				
Montagem					X				
Testes Iniciais					X				
Melhorias						X			
Calibração						X	X		
Testes em Túnel de Vento							X		
Validação com Corpo de Prova							X	X	
Redação do projeto						X	X	X	
Apresentação do projeto									X

Figura 17 – Cronograma desenvolvido para o atual trabalho.

A partir do cronograma elaborado, tornou-se possível um melhor planejamento e estruturação do trabalho, gerenciando o tempo e prazos estabelecidos, minimizando os riscos relacionados a esse recurso.

5

Projeto da balança aerodinâmica

5.1

Design e modelagem 3D

Planejando o futuro processo de montagem da balança, foi preferido utilizar células de cargas precisas disponíveis no mercado ao invés da colagem de extensômetros, visto que as etapas complexas da fixação e instalação desses elementos poderiam aumentar o risco de interferências na medição final do projeto.

Dessa forma, com a mesma estratégia apresentada pelo modelo do laboratório do MIT [Rubio 2021], foram projetados dois braços de alumínio em formato de L, que ajudariam na decomposição das forças aerodinâmicas aplicadas sobre o corpo de prova localizado em um eixo ligante. Cada braço mencionado seria composto com uma dupla de células de carga e ficaria situado externamente de cada parede lateral da seção de testes do túnel de vento. O sistema descrito é apresentado através da Figura 18.

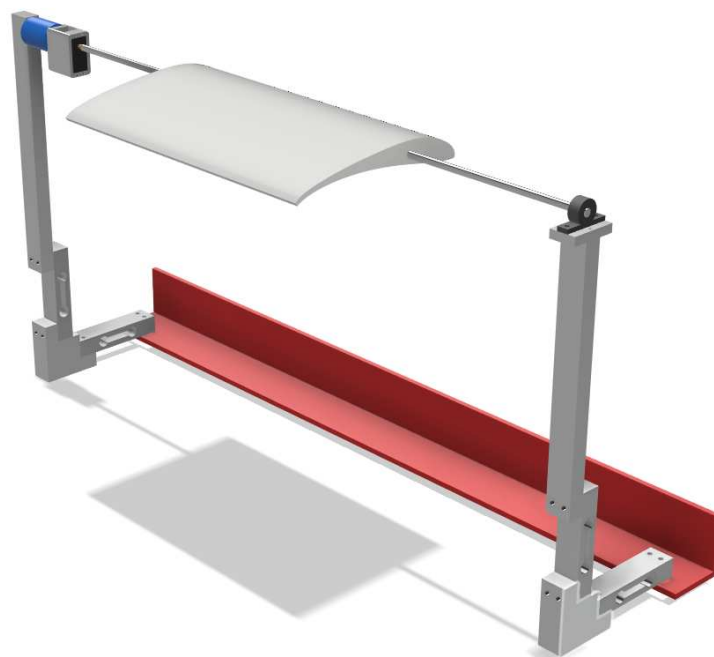


Figura 18 – Modelagem 3D do design desenvolvido.

O eixo transversal à câmara de testes do túnel foi idealizado de modo que correspondesse ao componente estrutural responsável por posicionar o corpo de prova ao ensaio e integrar os braços em L. Essa integração seria possível, utilizando um sensor de momento acoplado a um servo motor de um dos lados e um mancal com rolamento do outro.

Visando adicionar o terceiro eixo de medição à balança, o sensor de momento foi posicionado concentricamente ao eixo juntamente de um servo motor, possibilitando a obtenção do valor de momento de arfagem verificado nos ensaios e a mudança de ângulo de ataque da amostra estudada.

A importância do mancal com rolamento ao sistema está relacionada ao fato de proporcionar resistência mínima ao momento de arfagem apresentado durante o teste, permitindo uma medição mais fiel desse valor pelo sensor.

Para um melhor entendimento do design desenvolvido via modelagem computacional 3D, uma vista explodida do sistema estrutural é apresentada e descrita pela Figura 19.

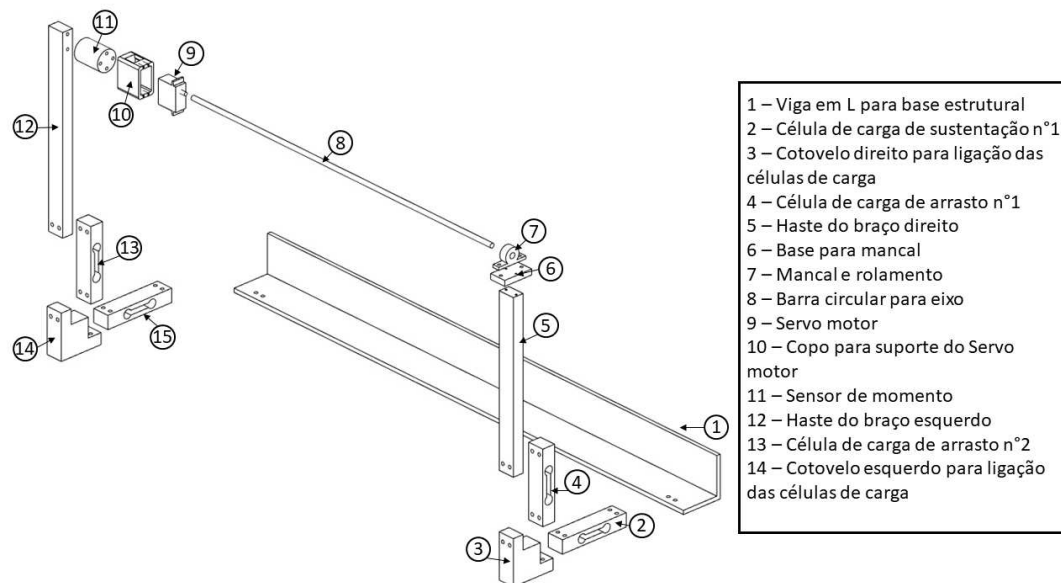


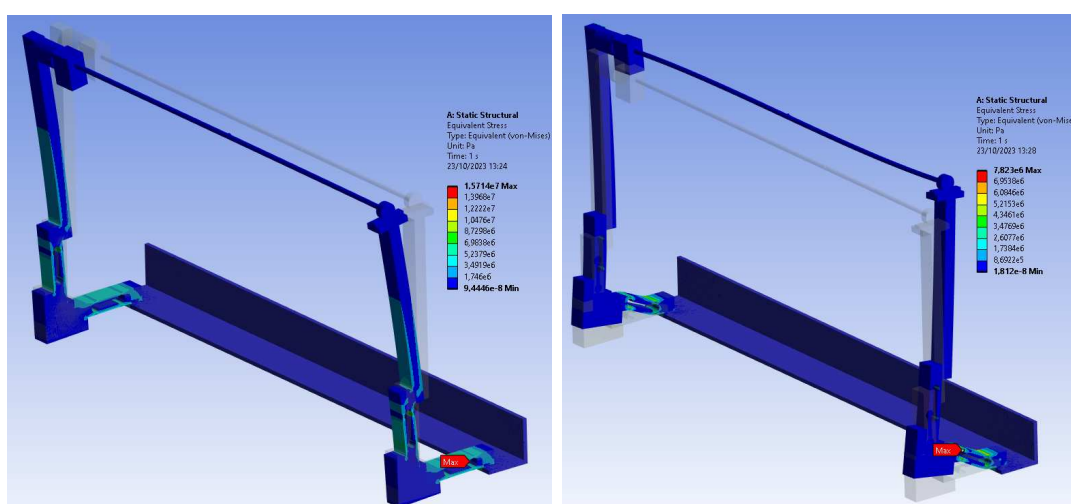
Figura 19 – Vista explodida dos componentes estruturais.

5.2

Análise estrutural

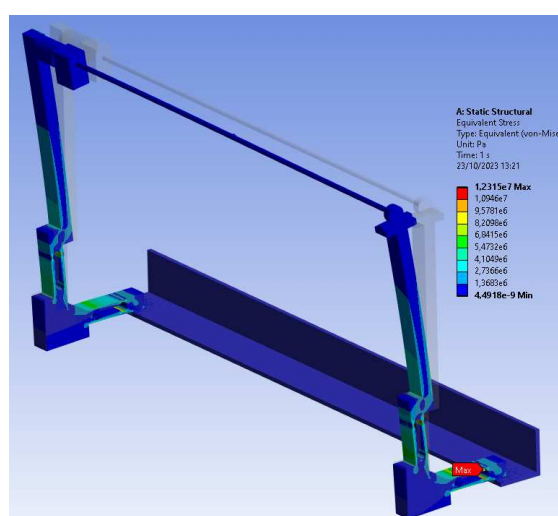
Após a elaboração do design da estrutura e de sua modelagem computacional realizada, é essencial analisar o comportamento das tensões resultantes das condições de teste críticas.

Portanto, inicialmente, foram simulados os cenários das forças máximas de sustentação e arrasto isoladamente. Em sequência, foi vez da situação de combinação das duas forças com o momento de arfagem crítico. As respectivas análises mecânicas são exemplificadas pela Figura 20.



(a) Simulação da máxima força de arrasto.

(b) Simulação da máxima força de sustentação.



(c) Combinação de momento e forças.

Figura 20 – Simulações para análise de tensão dos casos críticos.

Os resultados das análises computacionais realizadas via o software *Ansys*, demonstram uma tensão máxima de $\sigma = 15,7MPa$ localizada na células de carga. Comparando com o limite de escoamento da liga de alumínio, que corresponde à $\sigma_E = 200MPa$, comprova-se a robustez da balança aerodinâmica em questão.

5.3

Componentes

Por meio dessa seção, serão apresentados detalhadamente os componentes presentes no projeto da balança desenvolvida e enumerados anteriormente através da vista explodida da modelagem computacional elaborada. Também serão descritas as características técnicas e funções de cada elemento.

Como base estrutural da balança, aproveitou-se uma viga em aço e com perfil em L adquirida no laboratório. A escolha dessa peça de $7mm$ de espessura foi feita com base em sua grande resistência e rigidez. A viga pode ser visualizada por meio da Figura 21.



Figura 21 – Viga em L

Vale citar que foram realizados os processos de furação em suas duas extremidades e faceamento em sua superfície superior, para assim, a fixação das células de carga pudesse acontecer.

A partir de usinagem, foi possível produzir os elementos apresentados pela Figura 22, sendo eles: uma dupla de braços responsáveis por interligar as células de carga ao eixo de fixação da amostra ensaiada; uma dupla de cotovelos que faz a conexão entre as células de carga, dissociando as componentes de força; um copo para união do servo motor ao sensor de momento, alinhando concentricamente seus eixos; e uma chapa para o posicionamento do mancal sobre um dos braços anteriormente mencionado.

A escolha da utilização do alumínio como material dos componentes elaborados se deve aos fatos de ser um material de boa usinabilidade, que possibilite a estrutura final apresentar resistência mecânica, anticorrosiva, além de leveza, aspecto importante para não sobrecarregar as células de carga.



Figura 22 – Peças usadas em alumínio.

Posteriormente, cita-se a barra retificada que atuará como eixo e suporte do modelo ensaiado através do túnel. Foi selecionada uma barra circular de aço inox de $8mm$ de diâmetro e $1m$ de comprimento, como visualizado na Figura 23, visto que essa proporciona robustez ao projeto e capacidade anti-corrosiva. Sua resistência corrosiva é relevante visto que, em testes do túnel de vento, é introduzido linhas de fumaça ao escoamento, que poderiam vir a oxidar a barra.



Figura 23 – Barra retificada de Aço Inox $8mm$ X $1m$.

O eixo será integrado ao sistema através de suas duas extremidades. Uma delas será acoplada a um mancal, enquanto a outra utilizará um flange para sua ligação ao servo motor. Essa dupla de peças é exemplificada pela Figura 24.



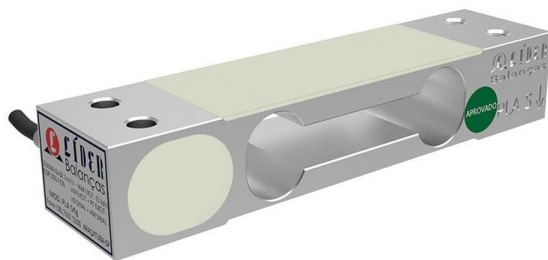
(a) Mancal para eixo de $8mm$.



(b) Flange de eixo de $8mm$.

Figura 24 – Componentes auxiliares ao eixo.

Para as medições de forças e momento, que são o foco do atual trabalho, selecionou-se quatro células de carga de $5kg$ e um sensor de momento de $5N \cdot m$ de capacidade, proporcionando uma margem de segurança satisfatória à balança. Os dois modelos de instrumentos podem ser visualizados pela Figura 25.



(a) Células de carga adotadas.



(b) Sensor de momento.

Figura 25 – Sensores utilizados para a medição de forças e momento.

O servo motor já comentado anteriormente possui a função de alterar a inclinação do corpo de prova. Sendo assim, para suportar o momento gerado pelo escoamento do ar, optou-se por um dispositivo de $40kg \cdot cm$ e um braço duplo de alumínio. Esses são apresentados pela Figura 26.



(a) Servo motor.



(b) Braço duplo metálico para servo motor.

Figura 26 – Sistema de controle do ângulo de ataque

Em relação à parte da aquisição e leitura de dados, fez-se o uso de amplificadores HX711 responsáveis por converter os sinais analógico vindos dos sensores em sinais

digitais, que por sua vez seriam enviados ao microcontrolador ESP32. O modelo do amplificador e do microcontrolador são mostrados pelas Figura 27.

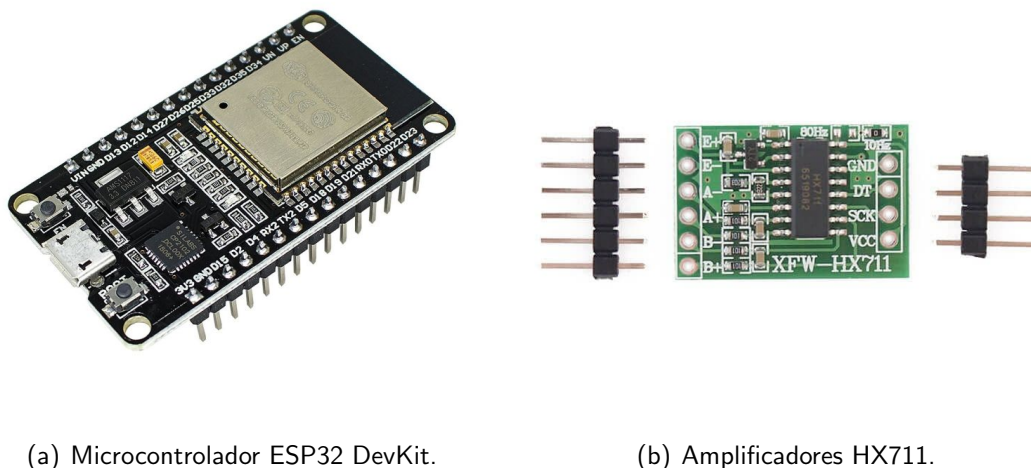


Figura 27 – Leitura e aquisição de dados.

5.4

Projeto Eletrônico

Considerando que as medições realizadas pela balança aerodinâmica proposta estão associadas a sensores de funcionamento extensométrico, o desenvolvimento de um projeto eletrônico foi necessário.

Como centro do sistema eletrônico está o microcontrolador ESP32 DevKit, que será responsável por controlar o servo motor e receber os sinais dos sensores processados pelos amplificadores de modelo HX711. O código trabalhado para o funcionamento do microcontrolador foi realizado através da plataforma *Arduino*.

Além disso, visando a criação de uma ligação eficaz entre os componentes eletrônicos, elaborou-se duas PCBs. Optou-se por dividir o sistema em duas placas com o intuito de diminuir os fios responsáveis por conduzir os sinais analógicos, mais suscetíveis à incorporação de ruídos, tendo em vista que os sensores ficam arranjados em lados opostos da seção de testes do túnel de vento.

Mais especificamente, uma PCB é considerada como módulo principal por apresentar o microcontrolador e três amplificadores, enquanto a outra PCB comporta apenas os dois amplificadores restantes. As PCBs representadas pela Figura 28

foram preparadas a partir do *software EasyEDA* e usinadas na fresadora CNC do laboratório.

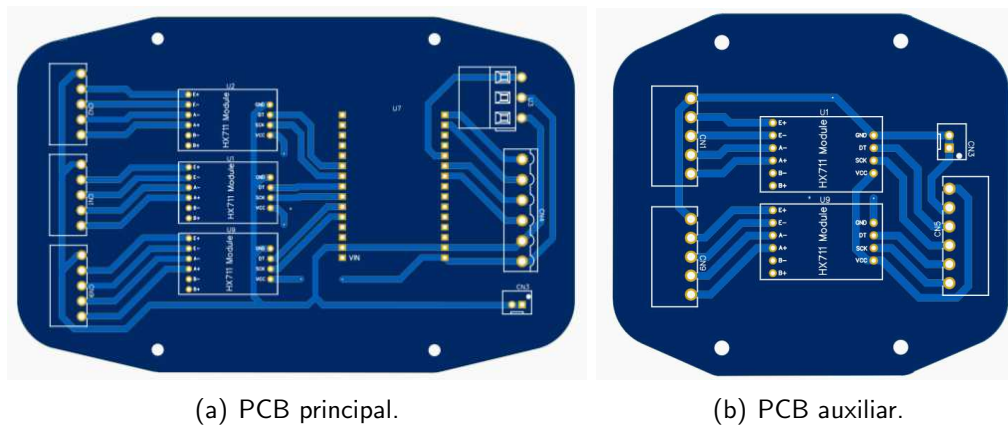


Figura 28 – Modelos de PCB's utilizados no projeto eletrônico.

A alimentação do sistema acontece de dois modos. Para a atuação do servo motor é usada uma fonte externa, visto que esse exige uma alta corrente. Já para microcontrolador, a alimentação é proporcionada pelo USB do computador, possibilitando o registro de dados direto para a máquina. Foi conferido que a ligação via USB não fosse responsável pela geração de ruídos relevantes à aquisição de dados.

Concluindo, previu-se pinos extras às PCBs que se conectassem à ligação terra elétrica, possibilitando o aterramento da estrutura metálica da balança junto com o do sistema eletrônico.

5.5

Orçamento

Posteriormente da seleção dos componentes necessários para a construção da solução de balança aerodinâmica proposta, foi possível realizar um levantamento do custo total do projeto.

O orçamento apresentado pela Tabela 5 leva em consideração os componentes estruturais, sensores e componentes eletrônicos principais. Na execução do atual projeto, o material bruto de alumínio para a usinagem de certas peças estruturais foi disponibilizado pela universidade, mas para efeito de comparação foram adicionados um bloco e um tarugo de alumínio à tabela de custos. Além disso, vale ressaltar

também, que não estão sendo levados em consideração nenhum tipo de custo relacionado à usinagem, visto que esses processos foram garantidos pela universidade.

Tabela 5 – Custo total do projeto.

Custo	
Células de Carga $5kg$	$4 \times R\$210$
Sensor de momento $5N \cdot m$	$R\$398,03$
Servo motor $40kgf \cdot cm$	$R\$160$
Amplificadores HX711	$4 \times R\$13$
Bloco de alumínio $10cm \times 10cm \times 5cm$	$R\$145$
Tarugo quadrado de alumínio $50,8mm \times 50,8mm \times 50cm$	$R\$228,65$
Barra Retificada de Aço Inox $8mm$	$R\$69,45$
Microcontrolador ESP32 DevKit	$R\$39,90$
Flange para eixo de $8mm$	$R\$45,88$
Braço duplo de alumínio de servo motor	$R\$11,72$
Mancal para eixo de $8mm$	$R\$18,76$
Total	$R\$2.009,39$

Vale retomar a premissa de que o objetivo do atual trabalho é o desenvolvimento de uma balança aerodinâmica de três eixos como alternativa dos altos valores encontrados no mercado. Como exemplos de comparação, são citados alguns modelos de produto e seus respectivos preços a partir da Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de custo de modelos comparativos

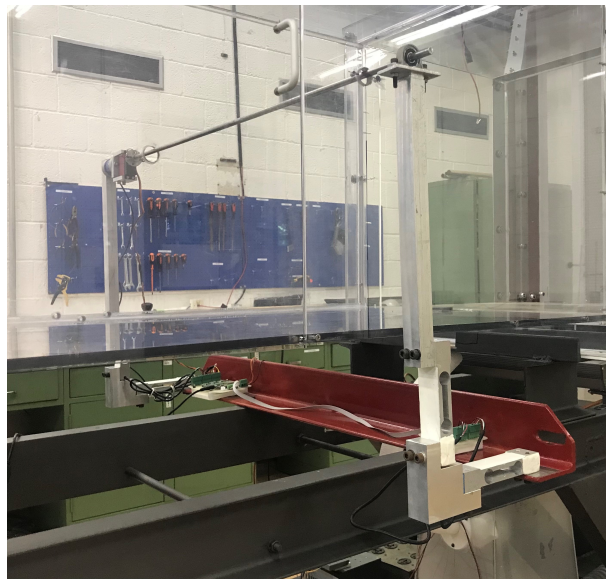
Preço de modelos comparativos	
Balança AF1300T três componentes	R\$ 197.961,26
Balança AF1300Z dois componentes	R\$ 80.535,07
Balança AF1300T seis componentes	R\$228.650,00

Fonte: Aeroalcool e NovaND

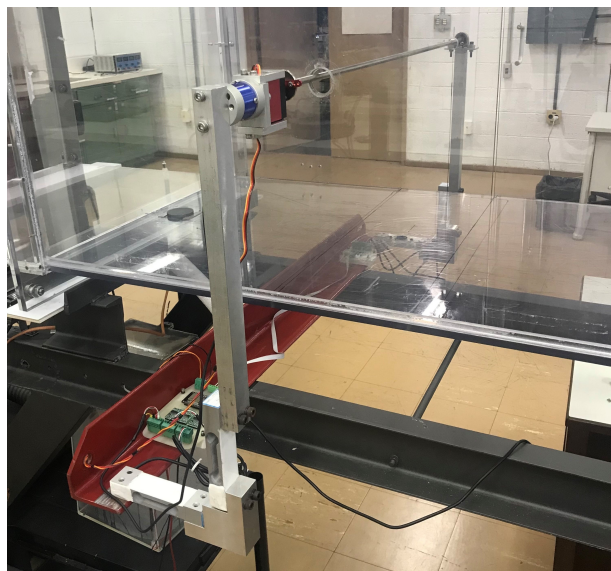
6

Resultados

Concluída a etapa de montagem da balança aerodinâmica, exemplificada pela Figura 29, cabe a execução dos seguintes processos: calibração do aparato, análise de incertezas de medição e validação experimental.



(a) Vista direita



(b) Vista esquerda

Figura 29 – Montagem final da balança aerodinâmica de três eixos

6.1

Calibração

Como já explicado anteriormente, as células de carga e o sensor de momento adotados correspondem à transdutores que utilizam extensômetros em seus funcionamentos. Isso significa que as medições finais que os componentes da balança aerodinâmica retornam estão associadas a conversão de energia mecânica em energia elétrica. Portanto, é essencial que haja um processo de calibração do instrumento projetado, possível através da comparação entre os valores de força e momento conhecidos e os respectivos resultados medidos pela balança.

Por meio da Figura 30 é possível observar os equipamentos utilizados no procedimento de calibração, incluindo um conjunto de massas de diferentes valores e roldanas para a transmissão das forças de peso na direções de aplicação desejadas.

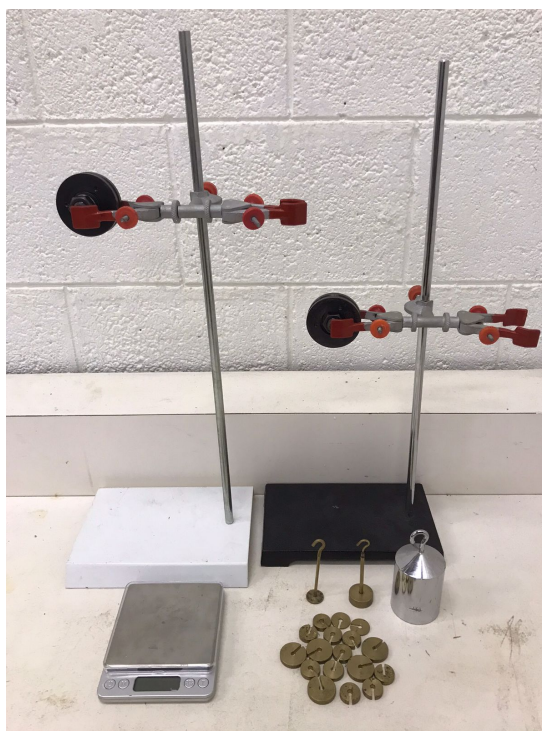


Figura 30 – Equipamentos utilizados na calibração.

6.1.1

Calibração da medição das forças aerodinâmicas

Por mais que a configuração da balança tenha sido desenvolvida com o intuito de decompor ao máximo a força resultante do escoamento aerodinâmico sobre um corpo estudado, os valores lidos pelas células de carga ainda correspondem a uma mistura entre as forças de arrasto e sustentação.

Mais especificamente, as formulações das duas forças aerodinâmicas buscadas podem ser representadas pelas equações 6.1 e 6.2, onde x_L corresponde à leitura da dupla de células de carga disposta horizontalmente e x_D à leitura da dupla de células de carga disposta verticalmente.

$$L = a_{L_1} + a_{L_2} \cdot x_L + a_{L_3} \cdot x_D + a_{L_4} \cdot x_L \cdot x_D \quad (6.1)$$

$$D = a_{D_1} + a_{D_2} \cdot x_L + a_{D_3} \cdot x_D + a_{D_4} \cdot x_L \cdot x_D \quad (6.2)$$

Com a finalidade de obter os coeficientes de calibração das equações, realizou-se a aplicação combinada de diversos valores representativos das forças de sustentação e arrasto, analisando as leituras do equipamento, e por fim montando a Tabela 7. O processo descrito foi responsável por totalizar 49 combinações de forças aplicadas.

Tabela 7 – Calibração do sensor das forças

Sustentação (L) [N]	Arrasto (D) [N]	Leitura 1 (x_L) [mV]	Leitura 2 (x_D) [mV]
-0.979904	0	0.125060964	0.002033415
0	-0.97904	0.003669059	-0.138091568
-0.97904	-0.97904	0.12779549	-0.136114627
0	0	-9.60426E-05	-6.40796E-05
-1.85409	0	0.236589673	0.00404109
-1.85409	-1.85409	0.229376564	-0.256946487
0	-1.85409	-0.005108009	-0.26100571
-0.97904	-1.85409	0.130208773	-0.261071557
-1.85409	-0.97904	0.238327584	-0.135665378
1.85409	-0.97904	-0.231520005	-0.123049985
0.97904	-0.97904	-0.121328209	-0.129805394
0.97904	-1.85409	-0.11309359	-0.252146046

Tabela 7 – Calibração do sensor das forças (Continuação)

Sustentação (L) [N]	Arrasto (D) [N]	Leitura 1 (x_L) [mV]	Leitura 2 (x_D) [mV]
1.85409	-1.85409	-0.222680778	-0.244931937
0.97904	0	-0.123911065	0.008778221
1.85409	0	-0.234802051	0.014741085
9.80019	-0.97904	-1.233993648	-0.143830769
9.80019	-1.85409	-1.237032129	-0.262373665
9.80019	0	-1.244488189	-0.015046117
-9.80019	0	1.249399271	0.022475745
-9.80019	-1.85409	1.240012064	-0.239817244
-9.80019	-0.97904	1.215427606	-0.11566615
0.97904	0.97904	-0.128362756	0.131385026
0	0.97904	-0.004831867	0.138260527
-0.97904	0.97904	0.119854223	0.14039905
-1.85409	0.97904	0.231155197	0.142441455
1.85409	0.97904	-0.238355321	0.127218619
9.80019	0.97904	-1.241604681	0.034753375
-9.80019	0.97904	1.24189304	0.159038315
-9.80019	1.85409	1.23577666	0.282497364
9.80019	1.85409	-1.244800903	0.173864302
0.97904	1.85409	-0.132662393	0.256260589
-0.97904	1.85409	0.116260077	0.26438887
0	1.85409	-0.008115449	0.262471552
1.85409	1.85409	-0.242507437	0.251721614
-1.85409	1.85409	0.227159669	0.27318384
-1.85409	9.80019	0.203978894	1.391890899
1.85409	9.80019	-0.255758401	1.36508194
0.97904	9.80019	-0.148239895	1.376598605
0	9.80019	-0.026915451	1.390226441
-0.97904	9.80019	0.09558348	1.392478526
-9.80019	9.80019	1.192966076	1.408157141
9.80019	9.80019	-1.242210364	1.35072541
9.80019	-9.80019	-1.086003694	-1.295651332
-9.80019	-9.80019	1.267849139	-1.37057435
0	-9.80019	0.021882355	-1.38335801
0.97904	-9.80019	-0.098819579	-1.380903313
-0.97904	-9.80019	0.144912363	-1.383668189

Tabela 7 – Calibração do sensor das forças (Continuação)

Sustentação (L) [N]	Arrasto (D) [N]	Leitura 1 (x_L) [mV]	Leitura 2 (x_D) [mV]
-1.85409	-9.80019	0.25433674	-1.382902998
1.85409	-9.80019	-0.205464251	-1.379800744

Com a formação da base de dados da combinação de forças aplicadas associadas às leituras da instrumentação, a aquisição dos coeficientes de calibração foi alcançada por meio do método de regressão linear múltipla.

A regressão é estabelecida através da equação 6.3, onde A_F corresponde à matriz de coeficientes de calibração para a sustentação e arrasto, Y_F à matriz das forças aplicadas sobre a balança, e X_F à matriz relativa às medições realizadas pela balança.

$$A_F = (X_F^T \cdot X_F)^{-1} \cdot X_F^T \cdot Y_F \quad (6.3)$$

$$Y_F = \begin{bmatrix} L_1 & D_1 \\ L_2 & D_2 \\ \dots & \dots \\ L_{49} & D_{49} \end{bmatrix}; A_F = \begin{bmatrix} a_{1L} & a_{1D} \\ a_{2L} & a_{2D} \\ a_{3L} & a_{3D} \\ a_{4L} & a_{4D} \end{bmatrix}; X_F = \begin{bmatrix} 1 & x_{L1} & x_{D1} & x_{L1} \cdot x_{D49} \\ 1 & x_{L2} & x_{D2} & x_{L2} \cdot x_{D49} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{L49} & x_{D49} & x_{L49} \cdot x_{D49} \end{bmatrix}$$

Finalmente, são adquiridos os valores de cada coeficiente presente nas equações 6.1 e 6.2, possibilitando a apresentação dos planos de calibração pela Figura 31.

$$a_{L_1} = 1.32731270064305 \cdot 10^{-2} [N]$$

$$a_{L_2} = -7.98028217661254 [N/mV]$$

$$a_{L_3} = -1.94826275623852 \cdot 10^{-1} [N/mV]$$

$$a_{L_4} = 8.21700989872868 \cdot 10^{-2} [N/mV^2]$$

$$a_{D_1} = -1.12289027200420 \cdot 10^{-2} [N]$$

$$a_{D_2} = -1.25345175831495 \cdot 10^{-1} [N/mV]$$

$$a_{D_3} = 7.13240065384959 [N/mV]$$

$$a_{D_4} = -1.45667552966257 \cdot 10^{-1} [N/mV^2]$$

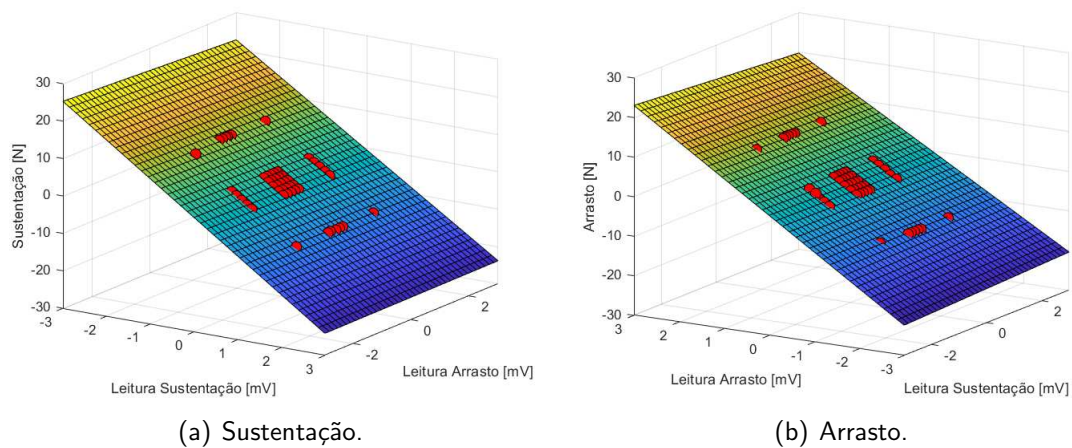


Figura 31 – Planos de calibração.

6.1.2

Calibração da medição do momento de arfagem

O método de calibração da medição do momento de arfagem é consideravelmente mais simples, uma vez que o sensor de momento foi disposto concentricamente à seção circular da barra em que a corpo de prova é posicionado.

Sendo assim, pode-se relacionar o valor de momento e o valor lido pelo sensor através da equação 6.4.

$$M_a = a_{M_1} + a_{M_2} \cdot x_M \quad (6.4)$$

Com o intuito de descobrir os coeficientes da equação mencionada, aplicou-se um momento de arfagem no eixo através de um braço de alavanca e de pesos conhecidos. Os resultados obtidos durante esse processo são apresentados pela Tabela 8.

Tabela 8 – Calibração do sensor de momento

Momento aplicado (M_a) [$N \cdot m$]	Leitura Momento (x_M) [mV]
-0.24476	-0.161071268
-0.06693	-0.044778767
-0.04245	-0.028383059
-0.02448	-0.016097899
-0.01229	-0.007915143
0	-0.000202842
0.01229	0.007927821
0.02448	0.016858787
0.04245	0.029412329
0.06693	0.046672728
0.24476	0.168189718

De forma similar ao método atribuído na calibração das forças aerodinâmicas, utilizou-se do conjunto de dados adquiridos através da aplicação de diferentes momentos no eixo da balança e da leitura do próprio equipamento para o cálculo dos coeficientes da curva de calibração do momento de arfagem.

Através da mesma fórmula matemática, apresentada pela equação 6.5, aplicou-se o modelo de regressão linear simples, onde agora, o termo Y_M representa o vetor de momentos aplicados, A_M o vetor de coeficientes de calibração, e X_M o vetor contendo os dados de leitura da balança.

$$A_M = (X_M^T \cdot X_M)^{-1} \cdot X_M^T \cdot Y_M \quad (6.5)$$

$$Y_M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \dots \\ M_{11} \end{bmatrix}; A_M = \begin{bmatrix} a_{M_1} \\ a_{M_2} \end{bmatrix}; X_M = \begin{bmatrix} 1 & x_{M_1} \\ 1 & x_{M_2} \\ \dots & \dots \\ 1 & x_{M_{11}} \end{bmatrix}$$

Aplicada a metodologia de regressão, chega-se aos valores dos coeficientes da curva de calibração, permitindo a ilustração do gráfico por meio da Figura 32.

$$a_{M_1} = -1.43203931289266 \cdot 10^{-3} [N \cdot m]$$

$$a_{M_2} = 1.48434143267423 [N \cdot m/mV]$$

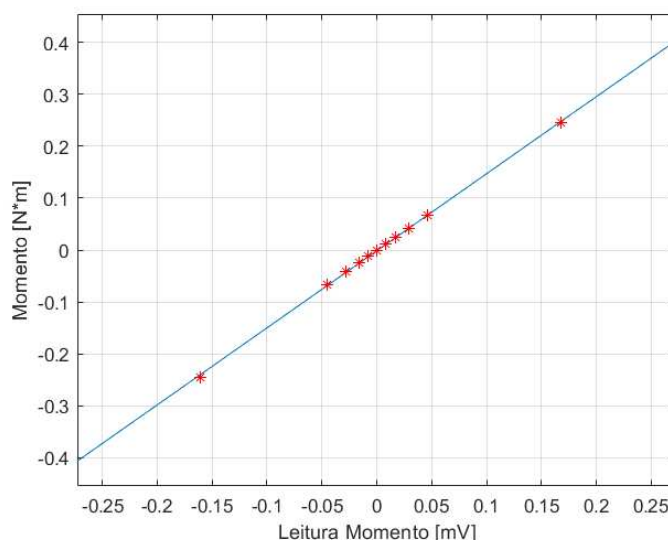


Figura 32 – Curva de calibração para o momento de arfagem.

6.2

Análise de incertezas

Os dados experimentais não são capazes de possuir precisão e exatidão absoluta, entretanto, certos valores podem ser considerados mais precisos ou exatos do que outros. Dessa forma, sendo importante estabelecer uma método que permita verificar a qualidade das medições, a incerteza é o valor que estima o quanto um resultado é confiável.

A incerteza do resultado de uma medição é composta por diferentes componentes que devem ser agrupados em duas categorias: incerteza do tipo A ou incertezas do tipo B.

Enquanto a incerteza do tipo A é obtida através de uma seleção de amostras, baseando-se em métodos estatísticos, a incerteza do tipo B está atrelada a qualquer outro meio, como por exemplo informações técnicas fornecidas pelo fabricante do instrumento de medição.

Sendo assim, o processo de análise de incertezas das medições realizadas pela balança aerodinâmica projetada foi desenvolvido através do proposto pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia [INMETRO 2012]. Mais especificamente, avaliou-se as incertezas tipo A e tipo B, determinou-se a incerteza combinada, que por fim, foi expandida pelo fator de abrangência.

6.2.1

Incerteza na medição das forças

6.2.1.1 Incerteza do Tipo A

Na busca das incertezas do tipo A das medições de forças, utilizou-se os dados e equações de calibração apresentados respectivamente na Tabela 7 e nas equações 6.1 e 6.2.

A primeira etapa correspondeu à obtenção da incerteza relacionada aos planos de calibração, e foi desenvolvida a partir do cálculo do erro médio quadrático, exemplificado pela equação 6.6, onde F_i corresponde à força aplicada e f_i corresponde à medida realizada através da equação de calibração. O índice n caminha até 49, visto que esse foi o valor de pontos estabelecidos na etapa de calibração das forças.

$$RMSE_F = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n=49} (F_i - f_i)^2} \quad (6.6)$$

Sendo assim, aplicando o cálculo aos casos de sustentação e de arrasto, são concluídos os valores desses erros associados à medição de cada uma dessas forças.

$$RMSE_L = 0.1385N$$

$$RMSE_D = 0.1411N$$

Outra fonte de incerteza importante que foi considerada correspondeu-se à flutuação dos dados medidos pelas células de carga. A aquisição dessa incerteza ocorreu pela média dos desvios padrões dos pontos de calibração das forças, onde o desvio padrão pode ser calculado pela equação 6.7.

$$DP_{x_f} = \sqrt{\frac{\sum (x_{f_i} - \bar{x}_f)^2}{n}} \quad (6.7)$$

$$\bar{DP}_{x_L} = 1.02726 \cdot 10^{-4} mV$$

$$\bar{D}P_{x_D} = 1.09816 \cdot 10^{-4} mV$$

6.2.1.2 Incerteza do Tipo B

A partir da escolha das células de carga utilizadas para as medições das forças aerodinâmicas da balança, reuniu-se as informações do modelo fornecidas pelo fabricante. A Tabela 9 apresenta tal detalhamento do modelo dos componentes.

Tabela 9 – Especificações Técnicas da célula de carga PLA

Especificações da célula de carga	
Capacidade	5 kg
Sensibilidade	2mV/V
Erro máximo	0,01% FS
Histerese	0,01%
Não linearidade	0,01%
Temperatura de trabalho	-10°C à 60°C
Sobrecarga sem danos	150%
Sobrecarga de ruptura	300%

Fonte: Líder Balanças

Tabela 10 – Especificações Técnicas do amplificador HX711

Especificações do HX711	
Vontagem	2.7-5.5 V
Frequência digital	10Hz
Ganho	128
<i>Full-scale differential voltage</i>	$\pm 20mV$
Ruído	90nV

Fonte: Avia Semiconductor

Foram consideradas as incertezas atreladas as células de carga, ao instrumento de pesagem utilizado para obter as massas do processo de calibração e ao amplificador HX711. Os cálculos das incertezas padrões relacionadas a cada um dos tópicos mencionados utilizam a hipótese de distribuição normal com 95% de confiabilidade e são apresentados pelas equações 6.8, 6.9, e 6.10.

$$u_{células} = \frac{\pm 0.01\%}{2} = \pm 5 \cdot 10^{-5} N \quad (6.8)$$

$$u_{pesagem} = \frac{\pm 0.05g \cdot 9.81m/s^2}{2} = \pm 2.4525 \cdot 10^{-3}N \quad (6.9)$$

$$u_{HX711} = \frac{\pm 0.45\%}{2} = \pm 3.2 \cdot 10^{-3}mV \quad (6.10)$$

6.2.1.3 Incerteza Total

Para finalizar as incertezas da medição de cada força aerodinâmica, as incertezas do tipo A e B são combinadas, e seguidamente expandidas através do fator de abrangência K , obtido através da tabela t-Student [Student 1908], da formulação WelchSatterhwaite 6.13/6.14 e da hipótese de 95% de confiabilidade.

$$u_{comb_L} = ((\frac{\partial L}{\partial L} \cdot RMSE_L)^2 + (\frac{\partial L}{\partial x_L} \cdot (2 * u_{sensor}))^2 + (\frac{\partial L}{\partial L} \cdot u_{balanca})^2 + (\frac{\partial L}{\partial x_L} \cdot \bar{D}P_{x_L})^2 + (\frac{\partial L}{\partial x_L} \cdot (2 * u_{HX711}))^2)^{1/2} = \pm 0.1477N \quad (6.11)$$

$$u_{comb_D} = ((\frac{\partial D}{\partial D} \cdot RMSE_D)^2 + (\frac{\partial D}{\partial x_D} \cdot (2 * u_{sensor}))^2 + (\frac{\partial D}{\partial D} \cdot u_{balanca})^2 + (\frac{\partial D}{\partial x_D} \cdot \bar{D}P_{x_D})^2 + (\frac{\partial D}{\partial x_D} \cdot (2 * u_{HX711}))^2)^{1/2} = \pm 0.1484N \quad (6.12)$$

$$GL_{ef_L} = \frac{(u_{comb_L})^4}{\frac{(\frac{\partial L}{\partial L} \cdot RMSE_L)^4}{GL_{RMSE_L} - 1} + \frac{(\frac{\partial L}{\partial x_L} \cdot \bar{D}P_{x_L})^4}{GL_{\bar{D}P_{x_L}} - 1}} = 62.0 \quad (6.13)$$

$$GL_{ef_D} = \frac{(u_{comb_D})^4}{\frac{(\frac{\partial D}{\partial D} \cdot RMSE_D)^4}{GL_{RMSE_D} - 1} + \frac{(\frac{\partial D}{\partial x_D} \cdot \bar{D}P_{x_D})^4}{GL_{\bar{D}P_{x_D}} - 1}} = 58.7 \quad (6.14)$$

$$u_{exp_L} = K \cdot u_{comb_L} = \pm 0.2954N \quad (6.15)$$

$$u_{exp_D} = K \cdot u_{comb_D} = \pm 0.2968N \quad (6.16)$$

Observando os valores finais das incertezas expandidas das forças aerodinâmicas medidas, identifica-se que as incertezas tipo B possuem maior peso quando comparadas às incertezas do tipo A.

Em relação ao fundo de escala utilizado nas calibrações das forças de sustentação e arrasto, a incerteza total calculada nas equações 6.15 e 6.16 correspondem respectivamente à 3.01% e 3.03%.

6.2.2

Incerteza na medição do momento

6.2.2.1 Incertezas do tipo A

Similarmente à obtenção das incertezas do tipo A das medições de forças, para a incerteza do tipo A referente ao momento de arfagem aproveitou-se dos dados e equações de calibração, nesse caso, encontrados respectivamente pela Tabela 8 e equações 6.4.

Novamente o cálculo do erro médio quadrático foi utilizado para alcançar o valor da incerteza do tipo A do momento, mostrado pela equação 6.17, onde M_i corresponde ao momento aplicado e m_i corresponde à medida realizada através da equação de calibração. O índice n caminha até 11 uma vez que esse foi o valor de pontos estabelecidos na etapa de calibração do momento.

$$RMSE_M = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n=11} (M_i - m_i)^2} \quad (6.17)$$

Analogamente, introduzindo o cálculo ao caso de momento de arfagem, é concluído o valor do erro médio quadrático associados à sua medição.

$$RMSE_M = 1.958 \cdot 10^{-3} N \cdot m$$

Por fim, a incerteza relacionada à flutuação dos dados medidos pelo sensor de momento foi obtida por meio da média dos desvios padrões dos pontos utilizados na calibração do momento de arfagem. Fez-se a utilização da equação 6.18 de desvio padrão para essa etapa mencionada.

$$DP_{x_m} = \sqrt{\frac{\sum (x_{m_i} - \bar{x}_m)^2}{n}} \quad (6.18)$$

$$\bar{D}P_{x_M} = 7.98472 \cdot 10^{-5} mV$$

6.2.2.2 Incerteza do tipo B

Como já detalhado anteriormente, optou-se pela utilização de um sensor de momento para as medições de momento arfagem da balança aerodinâmica. As informações relevantes à análise de incertezas do sensor foram cedidas pelo fabricante e organizadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Especificações Técnicas do sensor de momento

Especificações do sensor de momento	
Capacidade	5 N*m
Sensibilidade	2mV/V
Histerese	0,05%
Não linearidade	0,05%
Temperatura de trabalho	-20°C à 80°C
Sobrecarga sem danos	150%
Sobrecarga de ruptura	200%
Repetitividade	0,05%
Material	Liga de Alumínio/Liga de Aço
Voltagem máxima	15V

Diferentemente das células de carga utilizadas para a medição das forças aerodinâmicas, o fabricante do sensor de momento utilizado no projeto não disponibilizou os valores de erro máximo do seu produto. Portanto, com o intuito de simular esse valor buscado, combinou-se as incertezas associadas à histerese, não linearidade e repetitividade, demonstrando ser uma alternativa conservadora.

$$u_{medicão} = \sqrt{u_{histerese}^2 + u_{não-linearidade}^2 + u_{repetitividade}^2} = 0.0866\% \quad (6.19)$$

Foram consideradas as incertezas atreladas ao sensor de momento, ao instrumento de pesagem utilizado para obter as massas do processo de calibração, ao paquímetro usado na medição do braço de alavanca do processo de calibração e ao amplificador HX711. Os cálculos das incertezas padrões relativas a cada um aspecto mencionado utilizam a hipótese de distribuição normal com 95% de confiabilidade e são apresentados pelas equações 6.20, 6.21, 6.22 e 6.23.

$$u_{sensor} = \frac{\pm 0.0866\%}{2} = \pm 1.0825 \cdot 10^{-5} N \cdot m \quad (6.20)$$

$$u_{pesagem} = \frac{\pm 0.05g \cdot 9.81m/s^2}{2} = \pm 2.4525 \cdot 10^{-3} N \quad (6.21)$$

$$u_{paquímetro} = \frac{\pm 0.5mm}{2} = \pm 2.5 \cdot 10^{-4} m \quad (6.22)$$

$$u_{HX711} = \frac{\pm 0.45\%}{2} = \pm 3.7843 \cdot 10^{-4} mV \quad (6.23)$$

6.2.2.3 Incerteza Total

Para concluir a incerteza da medição de momento, as incertezas do tipo A e B são combinadas, e posteriormente expandidas a partir do fator de abrangência K , obtido por meio da tabela t-Student [Student 1908], da formulação de Welch-Satterthwaite, apresentada pela equação 6.25, e da hipótese de 95% de confiabilidade.

$$u_{comb_M} = \left(\left(\frac{\partial M}{\partial M} \cdot RMSE_M \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial x_M} \cdot u_{sensor} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial F} \cdot u_{paquímetro} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial x_M} \cdot \bar{DP}_{x_M} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial x_M} \cdot (u_{HX711}) \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial b} \cdot u_{pesagem} \right)^2 \right)^{1/2} = \pm 3.19094 \cdot 10^{-3} N \cdot m \quad (6.24)$$

$$GL_{ef_M} = \frac{(u_{comb_M})^4}{\frac{(\frac{\partial M}{\partial M} \cdot RMSE_M)^4}{GL_{RMSE_M}^{-1}} + \frac{(\frac{\partial M}{\partial x_M} \cdot \bar{DP}_{x_M})^4}{GL_{\bar{DP}_{x_M}}^{-1}}} = 70.9 \quad (6.25)$$

$$u_{exp_M} = K \cdot u_{comb_M} = \pm 6.38 \cdot 10^{-3} N \cdot m \quad (6.26)$$

Como conclusão, assim como nas incertezas relacionadas ao momento, nota-se uma maior influência das incertezas tipo B no valor total da incerteza expandida. E em relação ao fundo de escala utilizado na calibração do sensor de momento de arfargem, a incerteza total calculada na equação 6.26 corresponde à 2.61%.

6.3

Validação experimental

Com o intuito de validar a precisão da balança aerodinâmica desenvolvida, buscou-se simular experimentalmente uma geometria que fosse capaz de produzir simultaneamente uma combinação das três componentes medidas pelo instrumento. Portanto, o modelo geométrico proposto é apresentado pela Figura 33.

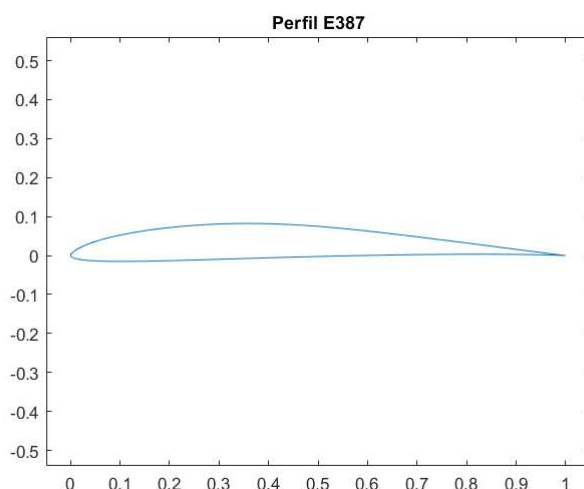


Figura 33 – Perfil Eppler 387 usado na validação da balança.

A escolha do perfil aerodinâmico Eppler 387 se deve ao fato desse corresponder a um aerofólio projetado especificamente para baixos Reynolds, possuindo dados experimentais referentes a uma faixa de Reynolds condizente com a capacidade do túnel.

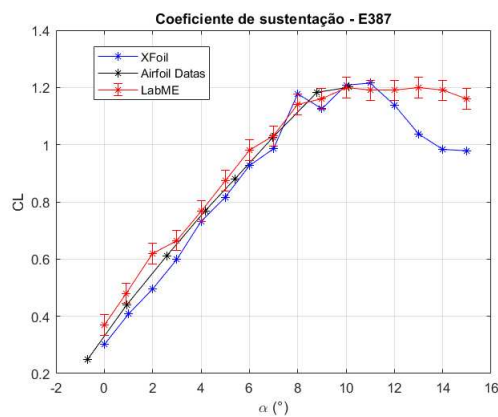
Os dados utilizados como valores comparativos na validação equivalem ao regime de $Re = 61.5k$, respeitando à potência do ventilador do túnel de vento do LabME e à dimensionalização da área varrida do corpo de prova baseado no limite proposto pela literatura [Pankhurst e Holder 1968].

O modelo de asa criado foi impresso através de uma impressora 3D e teve seu acabamento retocado para diminuir ao máximo a rugosidade da superfície gerada pela impressão.

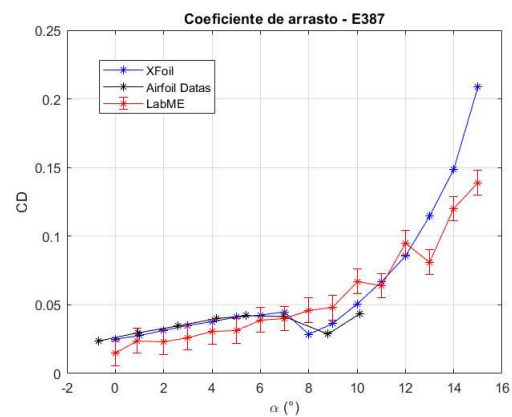
Dois *endplates* foram acoplados às extremidade do corpo de prova com a finalidade de reproduzir mais fielmente os resultados dos componentes aerodinâmicos relativos à um escoamento bidimensional, evitando os gradientes de velocidade la-

terais. É importante ressaltar que os *endplates* tiveram suas contribuições de forças aerodinâmicas e momento descontadas no resultado final, visto que uma simulação experimental foi realizada preliminarmente para quantificar tais valores.

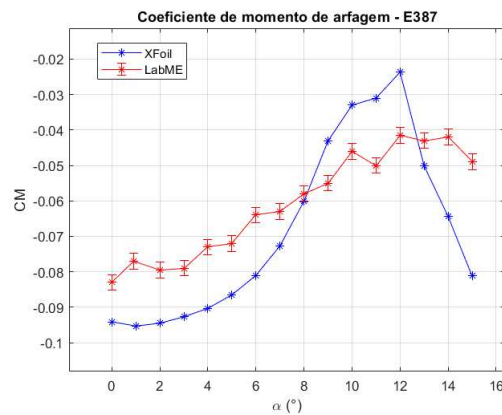
Os resultados das medições da sustentação, arrasto e momento de arfagem realizados pela balança são apresentados pelos gráficos da Figura 34, e comparados com os dados de um catálogo de perfis aerodinâmicos [Selig 1996] e com uma simulação computacional bidimensional do perfil via *Xfoil/XFLR5*.



(a) Validação da sustentação.



(b) Validação do arrasto.



(c) Validação do momento de arfagem.

Figura 34 – Processos de validação da balança com 95% de confiabilidade.

Conclusão

O objetivo principal desse trabalho consistiu na instrumentação do túnel de vento do Laboratório de Mecatrônica do Centro de Pesquisa de Energia Elétrica - CEPEL através do desenvolvimento de uma balança aerodinâmica de três eixos.

Com o intuito de projetá-la às dimensões do túnel de vento do laboratório e às condições de testes experimentais de estudo, realizou-se uma análise detalhada sobreos diferentes modelos de balanças existentes, considerando suas qualidades e limitações.

Após a eleição da categoria de balança que mais se adaptasse aos requisitos envolvidos, iniciou-se o desenho da configuração final da estrutura, prevendo tecnicamente os componentes mecânicos e eletrônicos. Mais especificamente à modelagem dos componentes mecânicos, foram realizadas simulações computacionais visando constatar a robustez estrutural relacionada às tensões mecânicas localizadas na configuração do instrumento.

Posteriormente à montagem da balança, foi vez do processo de calibração das medições seguido da análise de suas incertezas, visto que essas etapas proporcionariam a confiabilidade dos resultados adquiridos através do dispositivo.

Para completar o projeto, buscou-se validar a funcionalidade da balança aerodinâmica desenvolvida. Portanto, comparou-se os resultados experimentais dos testes de uma asa configurada a partir de um aerofólio selecionado com os seus valores de coeficientes aerodinâmicos já previstos na literatura.

Sendo assim, a balança aerodinâmica de três eixos foi elaborada de forma eficaz, tendo em vista que essa levou em consideração os cenários de testes propostos pelo Laboratório de Mecatrônica, respeitou o cronograma previamente descrito, proporcionou uma robustez e precisão exigidos nas simulações, além de corresponder a uma alternativa econômica aos modelos existentes no mercado.

Referências

- BARLOW, J. B.; RAE, W. H.; POPE, A. *Low-speed wind tunnel testing*. [S.l.]: Wiley, 1999.
- BRADSHAW, P.; PANKHURST, R. C. *The design of low-speed wind tunnels*. [S.l.: s.n.], 1964.
- GONZALEZ, M. et al. In: _____. *Components of a wind tunnel balance: Design and calibration*. [S.l.]: INTECH Open Access Publisher, 2011.
- GORLIN, S. M.; SLEZINGER, I. I. *Wind tunnels and their instrumentation*. [S.l.]: Israel Program for Scientific Translations, 1966.
- INMETRO. Gum 2008: Avaliação de dados de medição - guia para a expressão de incerteza de medição. In: _____. [S.l.: s.n.], 2012.
- MITCHELL, J. W. et al. *Fox and McDonald's introduction to Fluid Mechanics*. [S.l.]: Wiley, 2015.
- PANKHURST, R. C.; HOLDER, D. W. *Wind-tunnel technique*. [S.l.]: Isaac Pitman, 1968.
- RUBIO, A. *Week 1. introduction and computer-aided design*. 2019. Disponível em: <https://fab.cba.mit.edu/classes/863.19/CBA/people/alfonso/week1.html>.
- RUBIO, A. *HTMSTM(a)A. low speed wind tunnel*. 2021. Disponível em: <https://fab.cba.mit.edu/classes/865.21/people/alfonso/finalproject.html>.
- SELIG, M. S. *Summary of low speed airfoil data*. [S.l.]: SoarTech Publications, 1996.
- STUDENT. The probable error of a mean. *Biometrika*, JSTOR, p. 1–25, 1908.
- ZANTE, J. V. *Wind tunnel test section with airfoil*. NASA, 1999. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/WindTunnel/WTEExpKids/sld005.htm>.

A

Dados experimentais comparativos para a validação

E387 (A)		
Fig. 4.19		
Run: 209		
$Re = 61500$		
α	C_l	C_d
-5.36	-0.255	0.0425
-3.71	-0.127	0.0248
-2.12	0.059	0.0240
-0.68	0.250	0.0237
0.92	0.439	0.0296
2.58	0.611	0.0346
4.17	0.769	0.0400
5.40	0.880	0.0421
6.98	1.026	0.0415
8.80	1.183	0.0287
10.13	1.201	0.0437

Figura 35 – Dados experimentais do Sumário de Aerofólios de Baixos Reynolds.

Fonte: [Selig 1996]