



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Automotiva**

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE ESFORÇOS
AERODINÂMICOS EM RETROVISORES
AUTOMOTIVOS**

**Autor: Luiz Gustavo da Rocha Caixeta
Orientador: Thiago Fernandes Oliveira**

**Brasília, DF
2014**



LUIZ GUSTAVO DA ROCHA CAIXETA

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE ESFORÇOS AERODINÂMICOS EM
RETROVISORES AUTOMÓTIVOS**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Professor Thiago
Fernandes Oliveira

**Brasília, DF
2014**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Sobrenome do Autor, Nome Autor.

Título da Monografia: Subtítulo / Nome do Autor (em ordem normal). Brasília: UnB, 2014. 103 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2014. Orientação: Nome do
Orientador.

1. Palavra Chave. 2. Palavra chave. 3. Palavra chave3 I.
Sobrenome do orientador, Nome do orientador. II. Título.

CDU Classificação

- A ficha catalográfica oficial deverá ser solicitada à Biblioteca pelo aluno após a apresentação.



INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE ESFORÇOS AERODINÂMICOS EM RETROVISORES AUTOMÓTIVOS

Luiz Gustavo da Rocha Caixeta

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 18/11/14 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof.: Thiago Fernandes Oliveira, UnB/ FGA
Orientador

Prof.: Maura Angelica Milfont Shzu, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof.: Marcus Vinicius Girão de Moraes, UnB/ ENM
Membro Convidado

Brasília, DF
2014

Esse trabalho é dedicado à minha família e as pessoas que amo, por me darem a força necessária para que eu completasse esta etapa da minha vida.

“O homem erudito é um descobridor de fatos que já existem - mas o homem sábio é um criador de valores que não existem e que ele faz existir.”

Albert Einstein

RESUMO

O presente trabalho apresenta um breve estudo sobre esforços aerodinâmicos em retrovisores automotivos. Inicialmente, o projeto reconstrói e calibra a balança de túnel de vento. Ao revitalizar a balança, o mecanismo analógico de aquisição de força de arrasto foi transformado em um mecanismo digital, por meio de célula de carga, composta por extensômetros, e aquisitada por um conjunto NIcDAQ/ NI9237 e um computador equipado com o software LabVIEW. Para a validação da reconstrução da balança foram realizados ensaios em um perfil cilíndrico e em um aerofólio NACA 0012 e comparados os resultados experimentais obtidos com a literatura. Após a validação, iniciou-se a fase de testes para verificar os esforços aerodinâmicos em retrovisores. A fim de consolidar a análise, foram realizados testes em diferentes modelos de retrovisores, confrontando-os a cópias planas em MDF. Os resultados trouxeram coeficientes de arrasto em números de Reynolds da ordem de 10^5 , comparados à literatura apresentaram similaridade.

Palavras-chave: esforços aerodinâmicos, balança de túnel de vento, célula de carga, extensômetro, retrovisor.

ABSTRACT

This paper presents a short study of aerodynamic loads in automotive side mirrors. At first, the project reconstructs and calibrates the wind tunnel scale. To revive the scale, the analog acquisition of drag force was transformed to digital with strain gauges linked a NIcDAQ / NI9237 and a computer equipped with the LabVIEW software. To validate the reconstruction of the scale, tests were performed in a cylinder and a airfoil NACA 0012, the experimental data were compared with the results in the literature. After validation, began the testing phase to verify the aerodynamic loads in side mirrors. Tests were performed on different models of side mirrors, comparing them to flat copies made of MDF. The results showed drag coefficients with Reynolds number of 10^5 order, showing similarity with the literature.

Keywords: aerodynamic loads, wind tunnel scale, drag coefficient, strain gage, automotive side mirror

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Aula de Mecânica do Fluidos II	13
Figura 2. Tipos de extensômetros de resistência elétrica	15
Figura 3. Ponte de Wheatstone	16
Figura 4. Circuito de um quarto de ponte	17
Figura 5. Circuito de meia ponte	17
Figura 6. Circuito de ponte completa	17
Figura 7. Seção de testes	19
Figura 8. Visualização do escoamento	20
Figura 9. Técnicas de visualização do escoamento	21
Figura 10. Velocidade do escoamento	23
Figura 11. Área de projeção e comprimento característico	25
Figura 12. Camada limite	25
Figura 13. Túnel Inglês	30
Figura 14. Desenho da balança	31
Figura 15. Interação entre arrasto e sustentação	32
Figura 16. Molas em aço inox	34
Figura 17. Suportes da base	34
Figura 18. Suporte das molas	35
Figura 19. Montagem dos suportes	35
Figura 20. Extensômetro Excell Sensors	36
Figura 21. Dimensionamento da mola de arrasto	36
Figura 22. Módulo NI 9237 e Rack NI Cdaq 9172	37
Figura 23. Retrovisores	37
Figura 24. Cópia plana de retrovisor com haste	38
Figura 25. Diagrama tensão/deformação	40
Figura 26. Sistema de orientação	41
Figura 27. Barra engastada	42
Figura 28. Aferindo a deflexão	43
Figura 29. Interface LabVIEW	44
Figura 30. Calibração da balança de túnel de vento	45
Figura 31. Circuito utilizado de ponte completa	48
Figura 32. Teste com cilindro	49
Figura 33. Teste com aerofólio NACA 0012	49
Figura 34. Ensaio de cópia plana de retrovisor	50
Figura 35. Módulo de cisalhamento experimental	51
Figura 36. Curva teórica de calibração	52
Figura 37. Calibração subindo	53
Figura 38. Calibração descendo	53
Figura 39. Resultado experimental da calibração	54
Figura 40. Curvas de calibração	55
Figura 41. Coeficiente de arrasto do cilindro	56
Figura 42. Coeficiente de arrasto NACA 0012	57
Figura 43. Coeficiente de arrasto Celta	58
Figura 44. Coeficiente de arrasto Corsa	58
Figura 45. Coeficiente de arrasto Del Rey	59

LISTA DE SÍMBOLOS

V_e = Tensão de saída

V_0 = Tensão de entrada

Δp = diferença de pressão estática;

U_∞ = velocidade do escoamento não perturbado;

ρ_{ar} = densidade do ar;

A_1 = Área da seção transversal do difusor;

A_2 = Área da seção transversal da seção de testes;

F_D = força de arrasto;

F_L = força de sustentação;

p = pressão;

τ_w = tensão de corte;

dA = elemento de área;

θ = ângulo da normal de elemento de área em relação à direção do escoamento.

C_D = Coeficiente de arrasto;

C_L = Coeficiente de sustentação;

ρ = Densidade do fluido;

A = Projeção da área na direção normal ao escoamento.

Re = número de Reynolds;

U_∞ = velocidade do escoamento não perturbado;

l = comprimento modelo ou comprimento original

ν = viscosidade cinemática do fluido;

F = Força aplicada;

A = Área da seção transversal;

ε = deformação específica

δ = deformação total;

L_0 = comprimento inicial do corpo;

L = comprimento final do corpo;

E = módulo de elasticidade do material (ou módulo de Young);

M = momento fletor aplicado na barra;

y = distância entre fibra analisada e a linha neutra da barra;

I = momento de inércia da barra;

ρ = resistividade do material do fio;

R = resistência elétrica;

ε_t = deformação transversal do fio;

ε_a = deformação axial do fio;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 MOTIVAÇÃO	11
1.2 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO	12
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 Objetivos gerais	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	14
2.1 SENSORES E TRANSDUTORES	14
2.1.1 Extensômetros elétricos de resistência	14
2.1.2 Ponte de Wheatstone	16
2.2 TÚNEL DE VENTO	18
2.2.1 escoamento e suas propriedades	23
2.2.2 Efeito do número de Reynolds	25
2.3 ESTADO DA ARTE	27
3 TÚNEL DE VENTO	30
3.1 DESCRIÇÃO DO TÚNEL DE VENTO	30
3.2 BALANÇA	30
3.2.1 Especificações de fábrica da balança	30
3.2.2 Condições da balança	32
3.2.3 Construção da balança	33
3.2.3.1 Molas	33
3.2.3.2 Cabos e suportes	34
3.3 EXTENSÔMETROS E AQUISIÇÃO	35
3.4 RETROVISORES AUTOMOTIVOS	37
4 MÉTODOS E ENSAIOS	39
4.1 DIMENSIONAMENTO DAS MOLAS	39
4.1.1 Tensão	39
4.1.2 Deformação	39
4.1.3 Flexão	41
4.2 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE CISLHAMENTO	42
4.3 CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA	44
4.4 PREVISÃO TEÓRICA DE SAÍDA DE SINAL	45
4.4.1 Resistência do extensômetro	45
4.4.2 Circuito de medição	48
4.5 VALIDAÇÃO DA BALANÇA	49
4.6 INVESTIGAÇÃO DOS ESFORÇOS AERODINÂMICOS EM RETROVISORES	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1 MÓDULO DE CISLHAMNETO DA MOLA	51
5.2 DADOS EXPERIMENTAIS DA CALIBRAÇÃO	52
5.3 VALIDAÇÃO DA RECONSTRUÇÃO DA BALANÇA	55
5.4 ENSAIOS COM MODELOS DE RETROVISORES AUTOMOTIVOS	57
6 CONCLUSÃO	60
6.1 SUGESTÕES PARA FUTURO TRABALHO	61
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Performance, dirigibilidade, segurança e conforto em um automóvel estão intimamente ligados às propriedades aerodinâmicas de um veículo. Em um automóvel, para que haja economia de combustível e redução nas emissões de gases poluentes é importante a redução da resistência causada pelo ar. Existem aspectos na aerodinâmica dos veículos que também são importantes para a qualidade de um automóvel, como: a estabilidade na direção, ruídos, janelas e carroceria, resfriamento do motor, freios e câmbio, aquecimento, ventilação e ar condicionado. Todos esses aspectos variam de acordo com a passagem do ar ao redor e por dentro do veículo.

A força de resistência do ar ao movimento de um veículo é chamada de força de arrasto aerodinâmico¹. Essa força é proporcional ao quadrado da velocidade do veículo². Em um carro de tamanho médio, a 100Km/h, o arrasto aerodinâmico, F_D , é responsável por 75-80% das forças de resistência ao movimento [1].

O estudo da aerodinâmica, desde o início do desenvolvimento do projeto veicular, é de extrema importância. A alteração no formato exterior de um veículo, além de interferir no arrasto, tem influência em muitos outros aspectos. Apesar dessa influência, a configuração externa do veículo, normalmente, é uma das primeiras características a serem definidas. Assim sendo, é importante, logo no início do desenvolvimento de um novo veículo, trabalhar as propriedades aerodinâmicas fazendo uso da experiência, de ferramentas computacionais e experimentais.

O desenvolvimento aerodinâmico, predominantemente experimental, comumente é realizado em fases, mas auxiliados por estudos numéricos.

Na primeira fase, cria-se o modelo a ser estudado em escala ou em tamanho real. A maior parte dos estudos produzidos na primeira fase são realizados em túneis de vento. Problemas específicos como: arrasto do veículo ao atravessar um túnel, resposta em troca de faixa, a influência de um veículo ao cruzar por outro, são situações comumente estudadas com auxílio de modelos em túneis de vento.

¹ Em inglês: aerodynamic drag

² $F_D \sim V^2$

As fases seguintes, quais sejam: a criação de um protótipo pronto para dirigir; a iniciação de linha de produção, após vícios corrigidos; e, por fim, o exame das amostras produzidas; são reflexos dos estudos realizados com os tuneis de vento.

Portanto, o estudo dos aspectos retromencionados demonstra a necessidade da utilização de um túnel de vento, e sua contribuição para a engenharia automotiva [1].

1.2 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

O escopo desse Trabalho de Conclusão de Curso é a revitalização de uma importante ferramenta para o estudo de Mecânica dos Fluidos - A balança de túnel de vento, que se localiza no laboratório *Vortex*, no SG9 do campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, além de testes aerodinâmicos.

A reconstrução da referida balança, que está fora de uso, deixa como legado uma importante ferramenta. Ao funcionar plenamente, permite a pesquisadores da Universidade de Brasília a determinação experimental de forças de arrasto F_D e de sustentação F_L em túnel de vento aerodinâmico, e possibilita a alunos de Mecânica dos Fluidos I e II a realização de experimentos práticos com resultados de arrasto e sustentação, ferramenta didática para a fixação dos conceitos trabalhados em aulas expositivas.

Ainda nesse semestre, realizou-se uma aula prática de mecânica dos fluidos II com o auxílio da balança Fig. (1).



Figura 1. Aula de Mecânica dos Fluidos II

A existência de equipamentos como a balança de túnel de vento, proporcionará a Universidade de Brasília acessibilidade a dados que auxiliarão no desenvolvimento de projetos de pesquisa relacionados à aerodinâmica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos gerais

O objetivo geral desse trabalho é o estudo de esforços aerodinâmicos em estruturas veiculares.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Recuperação da balança do túnel de vento do laboratório *Vortex*;
- Calibração da balança;
- Validação da calibração, comparando a teoria com os valores encontrados;
- Realizar a investigação experimental dos esforços aerodinâmicos em retrovisores automotivos

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O capítulo 2 apresenta fundamentos e conceitos básicos para o desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso. Neste tópico são apresentados conceitos sobre a instrumentação, sobre a física e o funcionamento de túneis de vento, principalmente voltados a aplicações automotivas.

2.1 SENSORES E TRANSDUTORES

Os transdutores são dispositivos que transformam uma forma de energia, ou quantidade física em outra. A mensuração realiza-se por medida direta ou indiretamente através de uma relação conhecida. Os sensores são as partes sensíveis dos transdutores, ou seja, são materiais que mudam seu comportamento sob a ação de uma grandeza física. De maneira exemplificativa, quando um extensômetro é um transdutor de força e o sensor é a lâmina resistiva [17].

2.1.1 Extensômetros elétricos de resistência

Os extensômetros elétricos são transdutores medidores de deformação mecânica capazes de transformar variações dimensionais muito pequenas em variações de sua resistência elétrica. Essencialmente, esses dispositivos convertem deformações lineares em sinais elétricos. Com esses transdutores é possível mensurar com precisão a alteração dimensional de uma estrutura em condições de funcionamento sem a destruição da peça [3].

O funcionamento de um extensômetro exige que sua parte resistiva (lâmina), esteja alinhada a direção de deformação principal. Existem diferentes configurações de grade para extensômetros, como mostra a Fig. (2). O extensômetro axial único é normalmente utilizado em situações que se conhece a direção da deformação em um único sentido. Os extensômetros tipo Roseta de duas direções ou extensômetros biaxiais são utilizados para medir deformações quando as direções principais são conhecidas. Extensômetros do tipo roseta de três direções ou extensômetros triaxiais, são utilizados para medir deformações quando as direções principais são desconhecidas. Os extensômetros do tipo diafragma são extensômetros de 4 lâminas, sensíveis a deformações em duas posições diferentes. Normalmente, os extensômetros do tipo diafragma são utilizados como transdutores de pressão. Os extensômetros axiais duplos são basicamente dois extensômetros lado a lado em uma mesma base [3].

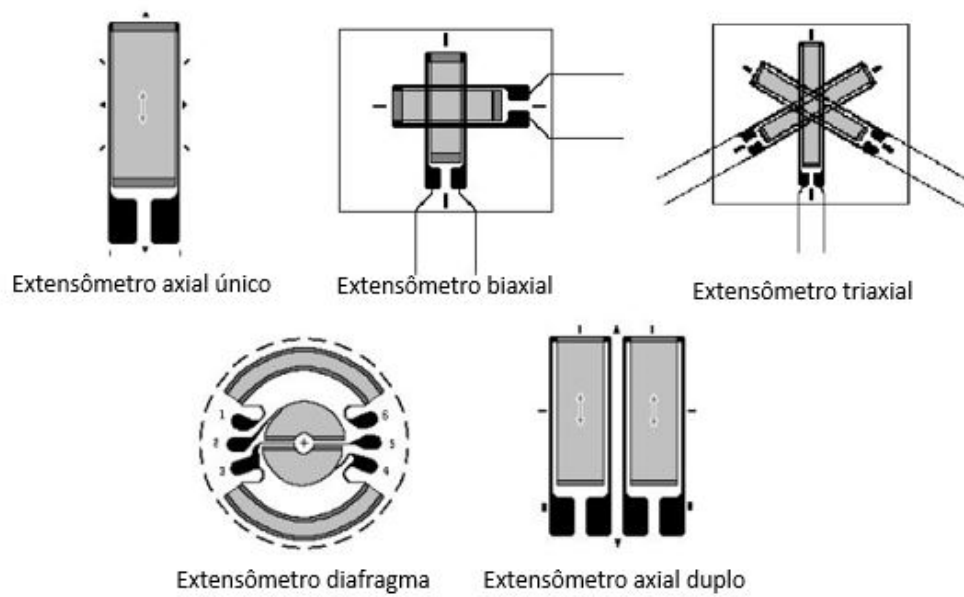


Figura 2. Tipos de extensômetros de resistência elétrica [4]

As principais características dos extensômetros são:

- Alta linearidade;
- Excelente precisão de medição;
- Dimensões extremamente reduzidas;
- Baixa histerese;
- Alta amplitude de temperatura;
- Alta versatilidade (podem ser usados como transdutores de pressão, momento, força, aceleração, deslocamento);
- Baixo tempo de resposta.

2.1.2 Ponte de Wheatstone

O método mais comum para medir as variações de resistência em um circuito elétrico, principalmente no caso da extensometria, é utilizar uma ponte de Wheatstone, por sua precisão com pequenas variações de resistência como ilustrado na Fig. (3).

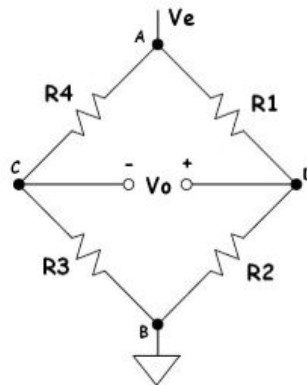


Figura 3. Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone consiste em quatro resistores montados Fig. (3). Ao submeter este arranjo resistivo a uma tensão de excitação V_e , mensura-se uma tensão de saída V_0 entre os pontos C e D.

Dois resistores montados em série são divisores de tensão. E, a corrente por eles é idêntica. Quando montados em paralelo, a tensão nos resistores é a mesma. Enquanto, a corrente nos resistores varia. Dessa forma, percebe-se que a tensão V_0 , é função da excitação e dos resistores da ponte:

$$V_{CB} = V_0^- = \frac{R3}{R3 + R4} V_e \quad (1)$$

$$V_{DB} = V_0^+ = \frac{R2}{R2 + R1} V_e \quad (2)$$

$$V_0 = V_e \left(\frac{R2}{R2 + R1} - \frac{R3}{R3 + R4} \right) \quad (3)$$

Ao instrumentar por extensometria uma barra submetida a flexão, a ponte de Wheatstone assume várias configurações de acordo com o número de extensômetros ativos, como demonstrado a seguir: [5]

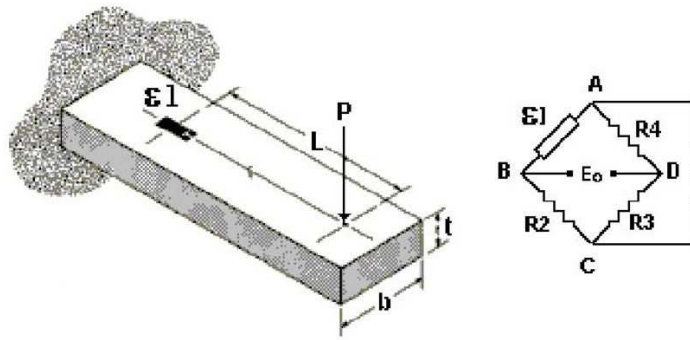


Figura 4. Circuito de um quarto de ponte [5]

O circuito de 1/4 de ponte (Fig. 4) tem apenas um sensor ativo que não é muito preciso por ser sensível à mudanças de temperatura.

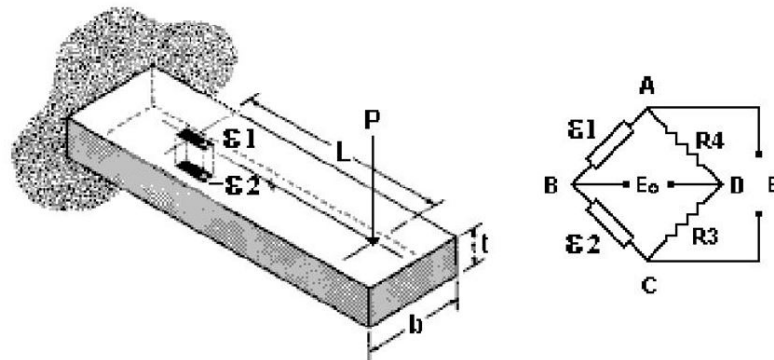


Figura 5. Circuito de meia ponte [5]

O circuito de 1/2 ponte (Fig. 5) possui dois sensores ativos, o que dobra a sensibilidade do sistema, é montado com os extensômetros em braços adjacentes, o que compensa as mudanças de temperatura.

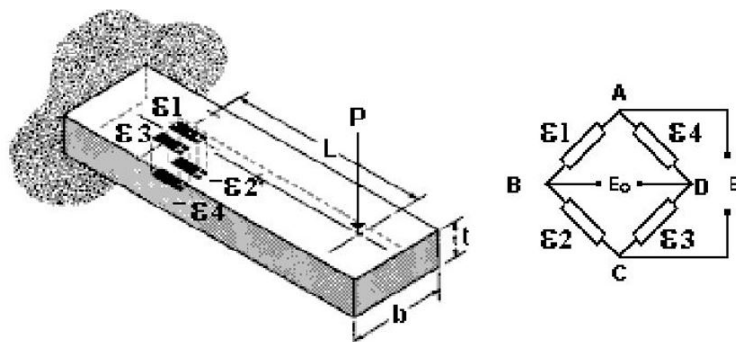


Figura 6. Circuito de ponte completa [5]

O circuito de ponte completa (Fig. 6), possui quatro sensores ativos, o que quadruplica a sensibilidade do sistema, também montado com os extensômetros em braços adjacentes, o que compensa as mudanças de temperatura. [3]

2.2 TÚNEL DE VENTO

Os túneis de vento são ferramentas de estudo que simulam um escoamento de ar em laboratório sob condições controladas. Normalmente, são equipados com balanças e sensores ligados a um computador e classificados de acordo com a velocidade do ar e forma.

Em relação ao formato, um túnel de vento pode ser dividido em três categorias: Circuito Aberto geralmente possui um ventilador em uma extremidade e é aberto na outra, Circuito Fechado circula o ar dentro dele sem contato com a atmosfera. O túnel necessita de menos energia para movimentar o fluido, e o Túnel Semifechado é uma mistura dos dois anteriores. Esse tipo de túnel necessita de menos força do motor que o modelo aberto. E é menos complexo de construir do que o modelo fechado.

Os túneis de vento também são categorizados com relação a velocidade do ar na seção de teste. Túneis subsônicos são túneis com a velocidade do fluxo de ar bem abaixo da velocidade do som $c=340$ m/s a 1 atm. Túneis de vento transônicos³ são capazes de chegar a velocidade bastante próximas da velocidade do som. Túneis supersônicos, operam em velocidades acima da velocidade do som. Existem ainda túneis classificados como hipersônicos cuja velocidade nominal de funcionamento até 15 vezes a velocidade do som.

A seção de testes de um túnel de vento (Fig. 7) é a região onde os modelos são posicionados para os ensaios. Normalmente a seção de teste é construída de forma a não perturbar o escoamento enquanto possibilita a visualização do teste e o manuseio do modelo. A geometria da seção varia com o objetivo do túnel. Usualmente, adoçamentos nos cantos com filetes são usados para minimizar os efeitos de borda.

³ Esse tipo de túnel é muito comum na indústria aeronáutica, pois a maioria dos aviões operam próximos a essa velocidade.



Figura 7. Seção de testes

Com a assistência de um túnel de vento é possível simular e investigar o escoamento e os efeitos em torno de um modelo sólido. Munido com o equipamento adequado, um túnel de vento é capaz de medir:

- Forças e momentos – balança;
- Velocidade – fio quente;
- Pressão – manômetros;
- Fluxo de ar – anemômetros;
- Visualização do fluxo – fumaça, vapor de óleo, laser, PVI, efeito doppler;
- Pressão sonora – microfones;
- Temperatura – termômetros;

Em testes automotivos, um túnel de vento pode ser dotado de equipamentos adicionais tais como:

- Força de tração – dinamômetro;
- Fluxo de ar quente – boiler;
- Umidade – gerador de vapor;
- Chuva – sistema de spray de água;

A visualização de um escoamento em torno de um perfil aerodinâmico é uma ferramenta importante para compreender os efeitos do escoamento ao passar por um objeto sólido. Com a visualização do escoamento pode-se observar parâmetros como velocidade e vorticidade.

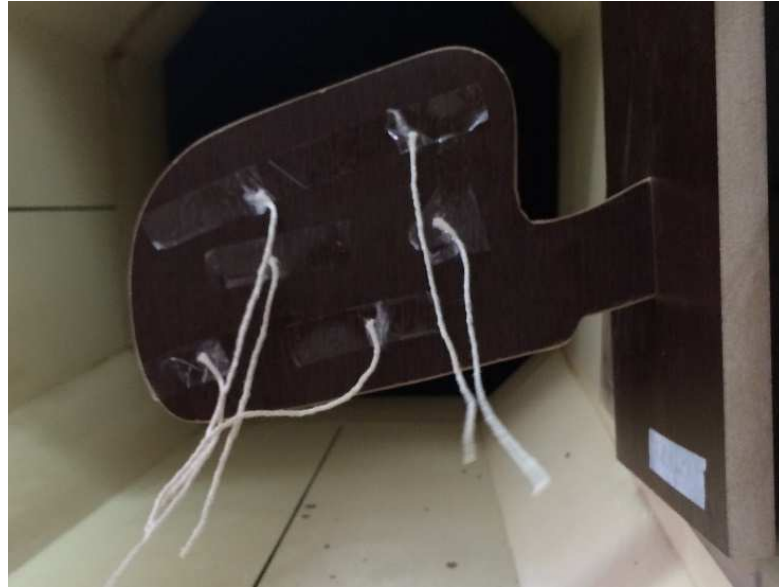


Figura 8. Visualização do escoamento

Existem várias técnicas para a visualização do padrão de escoamento sobre o corpo do veículo (Fig. 9), quais sejam:

- A disposição de vários tufos de lã sobre a superfície do modelo
- Aplicação de um filme de óleo contendo pigmentos coloridos ou luminescentes sobre a superfície;
- Geração de fumaça usando um gerador de fumaça, que torna visível os padrões escoamento mesmo em fluxos separados (sendo a técnica mais comum para a visualização do fluxo de ar);
- Laser, em que o feixe pode percorrer toda a superfície do veículo;
- Geração de bolhas de sabão preenchidas com hélio, as bolhas são lançadas no escoamento e fotografadas, se o tempo de exposição das lentes for correto, os padrões podem ser vistos claramente, esse tipo de técnica é especialmente usada com modelos em escala reduzida [1].

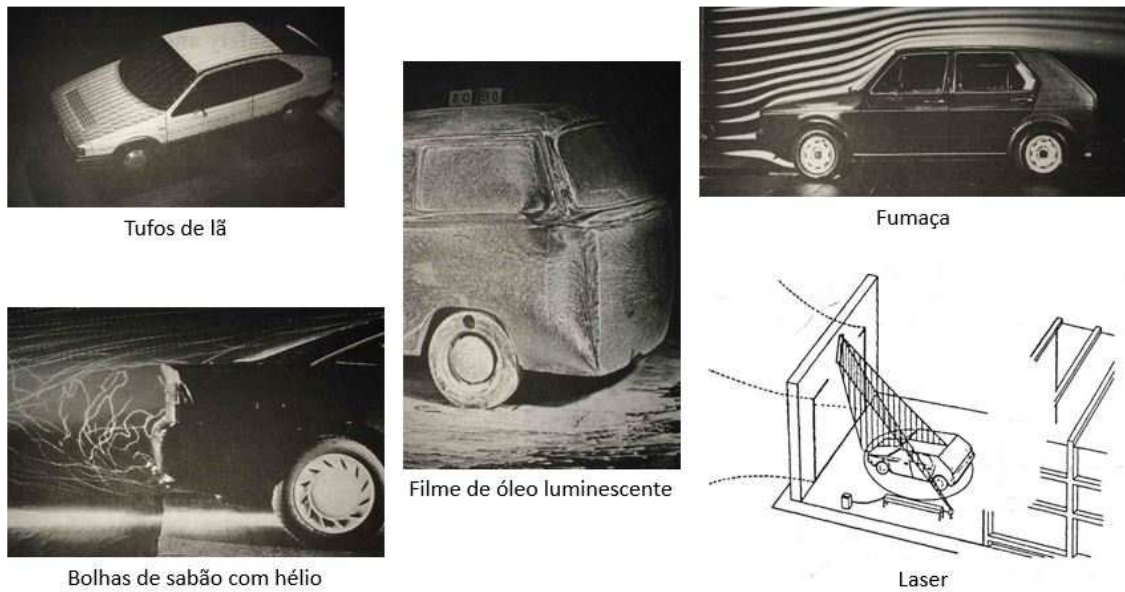


Figura 9. Técnicas de visualização do escoamento [1]

A função de uma balança de túnel de vento é medir, em um modelo, a força aerodinâmica resultante e o momento atuante. Dessa forma, uma balança de túnel de vento deve preencher alguns requisitos:

- A estrutura da balança não deve afetar o escoamento em volta do modelo. Se uma estrutura de apoio for usada para fixar o veículo à balança, o efeito da estrutura nas medições deve ser considerado;
- A posição do modelo não deve mudar descontroladamente durante as medições;
- Durante medições de sustentação, resta apenas uma fração do peso do modelo, desta forma a pré-carga deve ser compensada na tara;
- Se forem feitas medições para situação de curva, a balança deve rotacionar de acordo, para não interferir nos resultados;
- A transmissão de forças entre o objeto testado e as forças aferidas deve ocorrer sem atrito e histerese.

No caso de modelos de veículos completos, para a medição de coeficientes aerodinâmicos, é necessário que no começo dos testes o modelo seja preferencialmente fixado à balança com as rodas travadas [1].

Desta forma, para que os dados obtidos possam ser confiáveis, tenta-se fazer com que os testes em túnel de vento sejam mais próximos da realidade possível. Por exemplo, para simular o efeito do automóvel passando sobre uma estrada, uma ferramenta usual é uma esteira onde o modelo fica apoiado emulando a movimentação sobre um piso.

Dirigir um veículo sobre uma pista com espaço ilimitado em todas as direções, é uma situação distinta de testar um modelo em um túnel de vento, pois, as dimensões do túnel são finitas. Quando comparado a um veículo em espaço aberto, o escoamento em volta do modelo sofre alterações nas proximidades das paredes do túnel. As modificações acontecem com o ângulo do escoamento, com a velocidade e pressão ao redor do modelo, e todas as tensões sobre a superfície, conseqüentemente, sobre as forças e momentos que atuam no veículo. As discrepâncias são maiores quanto menor for o túnel em relação ao modelo. Entretanto, para investigar o escoamento sobre modificações no perfil, sustentação e arrasto, as diferenças podem ser toleradas em um túnel de tamanho razoável.

Existem inúmeras desvantagens em trabalhar com modelos em escala reduzida. Detalhes específicos em modelos de escala reduzida podem não ser reproduzidos adequadamente, apresentando número de Reynolds inadequados, assim como a representação da pista pode ser inadequada. Entretanto existem, vantagens em se trabalhar com escala reduzida. Modelos pequenos podem ser construídos com mais rapidez e modificações podem ser facilmente acrescentadas. Os modelos são fáceis de transportar. E, principalmente, modelos e túneis menores exigem menos investimento financeiro [1].

Normalmente a velocidade do ar na seção de teste de um túnel de vento (Fig. 10) é determinada de acordo com a Eq. (4).

$$U_{\infty}^2 = \frac{2\Delta p}{\rho_{ar} \left(1 - \left(\frac{A_2^2}{A_1^2} \right) \right)} \quad (4)$$

onde,

- Δp = diferença de pressão estática;
- U_{∞} = velocidade do escoamento não perturbado;

- ρ_{ar} = densidade do ar;
- A_1 = Área da seção transversal do bocal;
- A_2 = Área da seção transversal da seção de testes;

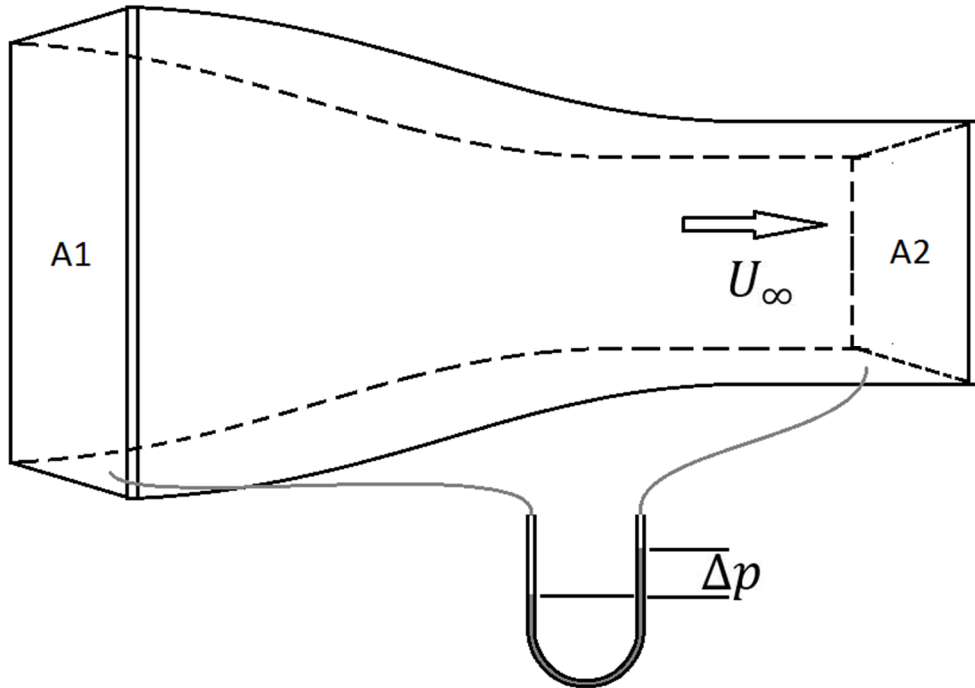


Figura 10. Velocidade do escoamento

2.2.1 Escoamento e Suas Propriedades

O escoamento em torno de um corpo é responsável por fenômenos físicos como, a força de arrasto em um automóvel, a força de sustentação nas asas de um avião ou a energia gerada pela água ao passar por uma turbina. A geometria de um corpo tem influência no escoamento em torno de si e no campo de velocidade. Um corpo imerso em um fluido sofre forças e momentos atuantes em várias direções. Quando não existe escoamento, o fluido exerce apenas forças normais de pressão sobre a superfície do corpo.

Em um fluido em movimento, a força exercida sobre o corpo na direção do escoamento é chamada de força de arrasto F_D . A força na direção normal à superfície é chamada de força de sustentação F_L . As forças de arrasto e de sustentação podem ser aferidas diretamente com auxílio de uma balança, ou determinadas a partir das distribuições de pressão e de tensão de cisalhamento:

$$F_D = \int_A dF_D = \int_A (-p \cos \theta + \tau_w \sin \theta) dA \quad (5)$$

$$F_L = \int_A dF_L = \int_A (p \sin \theta + \tau_w \cos \theta) dA \quad (6)$$

onde:

- F_D = força de arrasto;
- F_L = força de sustentação;
- p = pressão;
- τ_w = tensão de cisalhamento;
- dA = elemento de área;
- θ = ângulo da normal de elemento de área em relação à direção do escoamento.

As referidas forças dependem da densidade do fluido, da velocidade do escoamento e da geometria do corpo. Em contraponto, o coeficiente de arrasto C_D e o coeficiente de sustentação C_L são grandezas adimensionais que representam, essas forças:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (7)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (8)$$

onde:

- C_D = Coeficiente de arrasto;
- C_L = Coeficiente de sustentação;
- F_D = Força de arrasto;
- F_L Força de sustentação;
- ρ = Densidade do fluido;

- A = Projeção da área na direção normal ao escoamento.

A Fig. (11) exemplifica a obtenção da projeção da área normal ao escoamento e do comprimento característico.

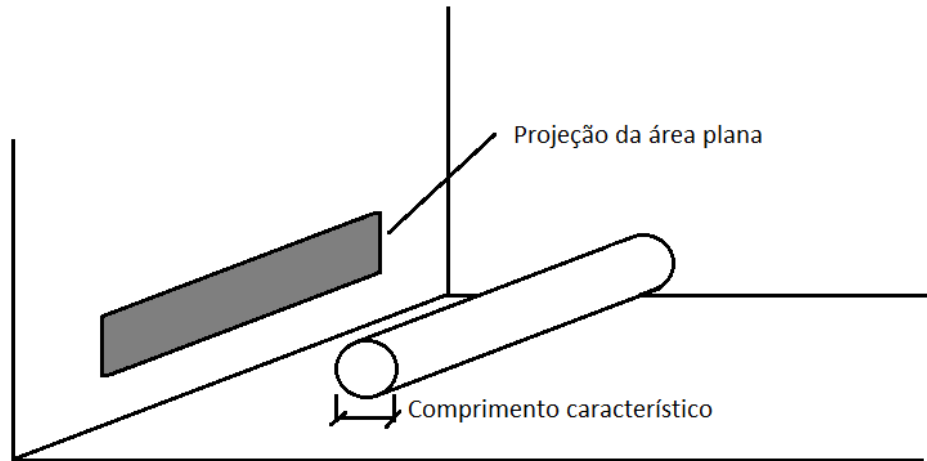


Figura 11. Área de projeção e comprimento característico

2.2.2 Efeitos do número de Reynolds

Na região rente à superfície a tensão de cisalhamento é máxima, e a velocidade tangencial do fluido é nula. Ao longo da direção normal a tensão de cisalhamento diminui, e a velocidade tende à velocidade do fluido. Existe assim uma camada de perfis de velocidades adjacentes a superfície chamada camada limite (Fig. 12).

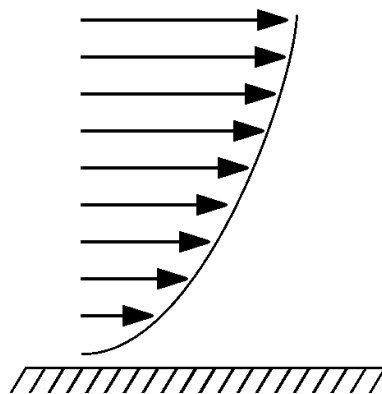


Figura 12. Camada limite

A camada limite é função da razão entre as forças inerciais e as forças viscosas que atuam no fluido. Essa razão gera um número adimensional conhecido como número de Reynolds.

$$Re = \frac{\text{forças inerciais}}{\text{forças viscosas}} \quad (9)$$

Ou seja:

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} l}{\nu} \quad (10)$$

onde:

- Re = número de Reynolds;
- U_{∞} = velocidade do escoamento não perturbado;
- l = comprimento característico (normalmente é o comprimento do modelo);
- ν = viscosidade cinemática do fluido;

Dessa forma, um valor baixo de número de Reynolds representa um escoamento onde as forças viscosas predominam em relação às forças inerciais, com a camada limite espessa. Em contraponto um valor alto de número de Reynolds representa um escoamento cuja as forças inerciais predominam. A camada limite é muito fina, e o efeito viscoso pode ser sentido apenas próximo à superfície.

A fim de garantir a similaridade entre um modelo em escala reduzida e um protótipo em escala real, o efeito do fluxo de ar que passa ao redor dos dois deve ser equivalente: dinamicamente com o número de Reynolds, cinematicamente com o triângulo de velocidades e geometricamente com as dimensões. O conjunto de detalhes existentes no protótipo, em escala real, deve ser reproduzido no modelo em escala reduzida, seguindo a redução escolhida. Por exemplo, se no modelo em escala real existe uma rugosidade na superfície, o modelo reduzido exige um polimento maior para manter a rugosidade reduzida na mesma proporção. As condições são cumpridas quando as forças e os momentos, oriundos do fluxo de ar, têm a mesma relação entre os dois casos. Dois fluxos são dinamicamente similares se a condição da Eq. (11) é válida [1].

$$\frac{U_{\infty 1} l_1}{\nu_1} = \frac{U_{\infty 2} l_2}{\nu_2} \quad (11)$$

2.3 ESTADO DA ARTE

Rind e Hu [15] investigaram o desempenho de um espelho retrovisor de um carro de formula 1 com diferentes ajustes do vidro do espelho. A investigação se conduziu experimentalmente e computacionalmente usando um modelo simplificado do retrovisor real. Nos referidos testes, foi utilizado o túnel de vento da universidade Southampton equipado com uma balança de túnel de vento. A balança foi utilizada para aferir as forças de arrasto no modelo de retrovisor. O trabalho concluiu que entre todas as posições testadas para o modelo, a melhor condição de arrasto é o vidro localizado mais no interior da estrutura.

Mohamed, Ramasamy e Hanipah [12] trabalharam com testes computacionais para analisar o comportamento do fluxo de ar através de um retrovisor automotivo. A velocidades de trabalho foi superior a 100 km/h. Para tanto foi criado um modelo em CATIA e simulado em Star-CD. Os testes concluíram que o componente gera muita turbulência, o que gera ruído excessivo no interior do veículo, principalmente em condições de chuva.

Alam, Jaitlee e Watkins [2] estudaram a flutuabilidade da pressão na região do retrovisor usando modelos em escala de 1:1, em túnel de vento fechado, utilizando um veículo cortado ao meio e um outro inteiro foram utilizados para os testes. Com os testes concluiu-se que a flutuação de pressão não é uniformemente distribuída pela superfície do vidro do espelho.

Hans Goetz [8] compara o desempenho entre carros com carrocerias diferentes, em diferentes condições, e analisa o comportamento aerodinâmico dos veículos. Para tanto foram utilizados modelos em escala de 1:5 e de 1:1. Para os testes em escala de 1:5 foi utilizado um túnel aberto e uma balança de túnel de vento mecânica a fim de medir as forças aerodinâmicas. Nos testes em escala real foi utilizado um túnel fechado. Concluiu-se que o comportamento aerodinâmico dos modelos interferem na capacidade de condução e cansaço do motorista, vários modelos foram testados e comparados.

Emmelmann, Berneburg e Schulze [7] estudam o desenvolvimento aerodinâmico Opel Calibra. Foram realizados testes computacionais e testes em túnel de vento com modelos em escala de 1:5 na fase *disining*. Em seguida, na fase de desenvolvimento foram realizados testes em escala de 1:1, com modelos de fibra de

vidro. Com o método, a Opel chegou a um coeficiente de arrasto de 0,26 para o Opel Calibra.

No trabalho de Wener e Frik [18] intitulado *Aerodynamic Optimization of the Opel Calibra Using Experiments and computational Fluid Dynamics* foram apresentadas as melhorias implementadas em um carro de corrida Opel Calibra ITC. As otimizações aerodinâmicas foram feitas utilizando análises computacionais e testes experimentais em túnel de vento. A ajuda dos resultados promoveu melhorias no radiador, na dianteira e traseira do corpo do veículo, na asa traseira e nos difusores. No trabalho, apresentou-se o quanto as modificações melhoraram o desempenho do carro quando comparado ao modelo de passeio. [6]

Heffley [9] investigou o efeito que um ônibus ou caminhão causa ao passar por um carro de passeio, realizando testes em um túnel de vento, com modelos em escala de 1:10. Nesse trabalho, para medir as forças sofridas pelos carros foram utilizados extensômetros. Como resultado, reuniu-se dados sobre as piores condições de vento quando um veículo grande passa por um veículo de passeio.

Mason, Beebe, e Schenkel [11] criaram uma instalação para testes aerodinâmicos para modelos em escala. O trabalho *An Aerodynamic Test Facility for Scale-Model Automobiles* detalha como foi montada as instalações, como podem ser administrados os testes e como é a aquisição de dados. O túnel tem capacidade para modelos de escala de 1:4 até 3:8 com uma velocidade máxima de 160 mph, onde um modelo 3:8 a 160 mph é similar a um modelo em escala real a 60 mph.

Kin, Han e Lim [10] estudaram o fluxo de ar através de um espelho retrovisor computacionalmente e experimentalmente, com foco na esteira do espelho. No referido trabalho, foi utilizado um túnel de vento aberto, no qual experimentos foram realizados com um número de Reynolds $Re=2.10^5$. Para medir a flutuação de pressão na superfície do espelho, a esteira foi construída separadamente do restante do modelo, onde foram feitos vários furos para tomadas de pressão. Para medir as características do fluxo de ar pela esteira foram usados anemômetros de fio quente e para medir a velocidade foi utilizado um laser Doppler de fibra ótica. Foram encontradas as regiões onde os vortex se formam, especialmente foi apresentado o como o fluxo se comporta nas bordas do retrovisor.

Barroso, [5] faz um estudo computacional de escoamentos turbulentos em torno de cilindros circulares e quadrados. Para a validação do método numérico escolhido, foram comparados os valores encontrados no escoamento entre duas placas planas, com o resultado analítico. O autor conclui que os modelos utilizados são válidos para situações específicas de escoamento.

Stroman, [16] estuda as forças aerodinâmicas sobre fios condutores, para tanto é utilizado um túnel de vento equipado com uma balança de túnel de vento. Jeffrey, faz uma comparação entre os fios condutores com cilindros, dessa forma, para validar a balança, foram realizados testes em alguns perfis conhecidos e comparados com a literatura. Como conclusão de sua tese Jeffrey analisou e descreveu uma enorme biblioteca de dados sobre o comportamento aerodinâmica para vários fios condutores.

3 TUNEL DE VENTO

3.1 DESCRIÇÃO DO TÚNEL DE VENTO

O túnel de vento utilizado no trabalho (Fig. 13), conhecido como “Túnel inglês”, está instalado no laboratório *Vortex*, do SG9, foi fabricado pela Plint and Partners LTD, impulsionado por um motor Alladays Peacock e controlado por um inversor de frequência SIEMENS, com área de teste de 0,45mX0,45mX1,21m. O túnel é equipado com um manômetro de coluna d’água com precisão de 0,5 mm, modelo 504 produzido pela Airflow developments LTD e alcança a velocidade máxima de trabalho de 16,8 m/s a 38 Hz. Ele possui suportes para instalação da balança, uma porta lateral e uma porta superior de 0,59mX0,25m, para acesso a área de testes.



Figura 13. Túnel Inglês

3.2 BALANÇA

Com o intuito de esclarecer o funcionamento da Balança de Túnel de Vento, o presente tópico foi dividido em três partes: a primeira descreve as especificações de fábrica da balança, a segunda descreve o estado em que a balança se encontrava antes da revitalização e, por fim, a terceira descreve os procedimentos realizados para revitalização a balança.

3.2.1 Especificações de fábrica da balança

A balança de túnel de vento TE 81/A, (Fig. 14) tem uma plataforma de força conectada a três suportes dispostos nos seus três cantos. Cada suporte é conectado entre a plataforma de força e a base por juntas esféricas universais. O efeito de usar

essa geometria é que a plataforma de força pode se mover paralela à base enquanto é livre para movimentar-se na horizontal, vertical e rotacionar⁴.

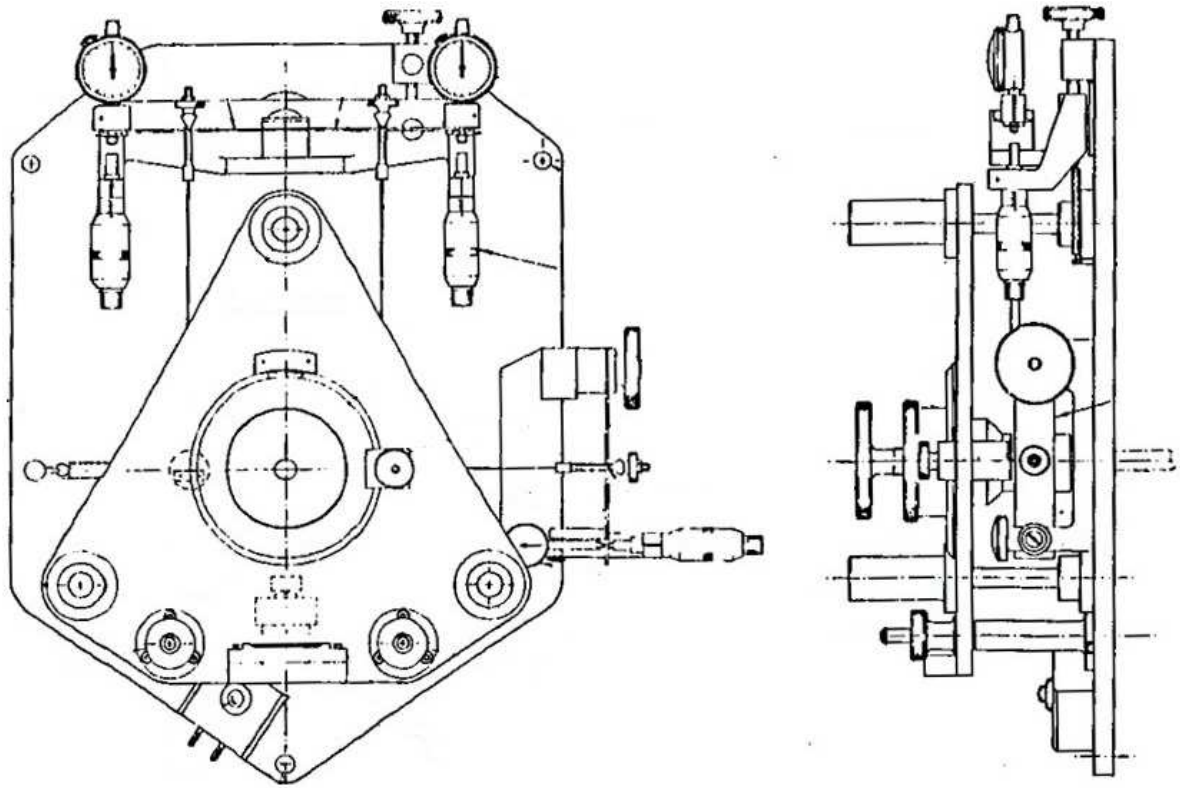


Figura 14. Desenho da balança [14]

Originalmente, as forças transmitidas à balança atuam sobre três molas em balanço (Fig. 15): a mola de arrasto⁵, a mola de sustentação anterior⁶ e mola de sustentação posterior⁷. As forças são transmitidas da plataforma para as molas por fitas de uma liga de cobre-berílio. A fita de arrasto, disposta na horizontal, atua na linha de centro do suporte, enquanto as duas fitas de sustentação atuam, verticalmente sobre pontos equidistantes ao centro do suporte e no mesmo plano horizontal do suporte. A distância entre a fita de sustentação anterior e a fita de sustentação posterior é de 0,127m (5,0 in). A sustentação é dada pela soma das forças de tração sobre essas fitas, enquanto o momento é dado pela diferença entre elas multiplicada por 0,127m. Duas molas de arrasto acompanham a balança, uma

⁴ Esses são os três graus de liberdade necessários para o funcionamento da balança.

⁵ Em inglês: *Drag spring*

⁶ Em inglês: *Fore lift spring*

⁷ Em inglês: *Aft lift spring*

para cargas entre 0 a 10 N (0 a 2 lbf), mais sensível, e uma para carga entre 0 a 50 N (0 a 10 lbf).

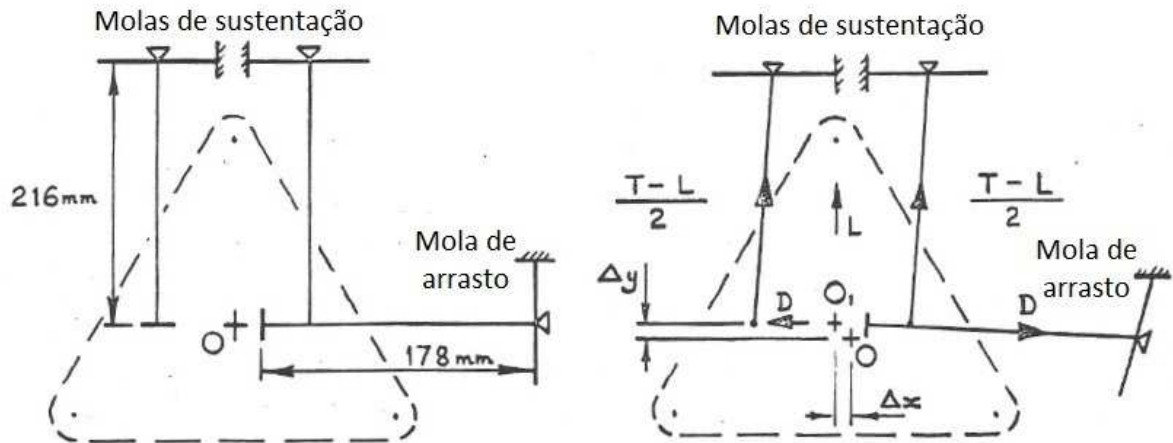


Figura 15. Interação entre arrasto e sustentação [14]

As forças de tração em cada fita eram transmitidas, de maneira similar, do centro do suporte até as molas. A deflexão das molas é medida a partir de um micrômetro que faz contato com um relógio comparador sobre cada mola. Ajusta-se o micrômetro até o limite de encostar no marcador e então, esse ponto passa a ser o zero do marcador. Em seguida, a deflexão sofrida pelas molas será indicada no marcador analógico a cada 0,05 mm. Uma vez conhecido o coeficiente elástico de cada mola, pela lei de Hooke⁸, obtêm-se a força sofrida em cada fita.

A balança vem equipada com um motor de 12 V d.c ligado a um excêntrico, responsável por reduzir a histerese nos componentes da balança, todavia, de acordo com o manual não é comum a necessidade da utilização do mesmo durante os testes, pois, geralmente surgem vibrações suficientes.

3.2.2 Condições da balança

A balança de túnel de vento TE 81/A do laboratório Vortex foi encontrada com componentes quebrados ou faltando. A balança basicamente era usada como apoio para os perfis ensaiados no túnel e não servia para nenhum fim de medição. Problemas foram encontrados nas seguintes peças:

- Relógios comparadores - não foram encontrados todos marcadores;
- Micrômetros - não foram encontrados todos os micrômetros;

⁸ A Equação 15, será apresentada mais a diante nesse Trabalho de Conclusão de Curso.

- Fitas - as fitas estavam todas quebradas;
- Suporte das fitas nas molas - alguns desses suportes que prendiam as fitas nas molas estavam faltando;
- Molas de arrasto - apenas uma mola de arrasto foi encontrada, mas estava danificada.

Desta forma, para que a balança voltasse a funcionar, algumas mudanças foram realizadas.

- Foram usinadas molas novas de aço inox para substituição das antigas;
- As fitas foram substituídas por cabos de aço;
- Novos suportes tiveram que ser usinados, tanto para prender os cabos nas molas, quanto para prender os cabos na plataforma de força;
- O sistema de medição feito por micrômetros e mostradores analógicos foi acrescido de um sistema eletrônico com extensômetros elétricos.

Medidas foram tomadas de forma a não prejudicar as funções originais das peças restantes e do conjunto total da balança.

3.2.3 Construção da balança

Nesse tópico são apresentadas soluções e processos realizados para a reconstrução da balança.

3.2.3.1 Molas

As novas molas, utilizadas para substituir as antigas, foram construídas com as mesmas dimensões das molas originais, todavia, foram usinadas a partir de placas de aço inox com espessura de 0,0015m (1,5 mm) como mostra a Fig. (16).



Figura 16. Molas em aço inox

3.2.3.2 Cabos e suportes

A ligação entre a plataforma de força e as molas na nova configuração é feita através de cabos de aço de 0,002 m (2 mm) de diâmetro. Os cabos são fixados na plataforma por novos suportes que possibilitam sua manutenção e troca, quando necessário. Os suportes são mostrados na Fig. (17).



Figura 17. Suportes da base

Para fixar os cabos nas molas foram desenvolvidos suportes que se fixam a parafusos, possibilitando assim, o ajuste fino da pré-carga. O modelo de suporte é mostrado na Fig. (14).



Figura 18. Suporte das molas

O conjunto mecânico montado é apresentado pela Fig. (19)



Figura 19. Montagem dos suportes

3.3 EXTENSÔMETROS E AQUISIÇÃO

A nova aquisição de dados foi convertida para célula de carga com extensômetros instalados na mola de arrasto. O modelo de extensômetro usado foi (Fig. 20) PA-06-125H-350-L da Excel Sensores, modelo uniaxial duplo, feito em base de polyamida com filme metálico de constantan, para aço inox, de 350Ω com fios nos terminais.



Figura 20. Extensômetro Excell Sensors

Os extensômetros foram instalados sobre a mola de arrasto a 0,031m do ponto de aplicação da força, em uma ponte de Wheatstone completa (Fig. 21), o que fornece uma alta sensibilidade de aquisição de dados.

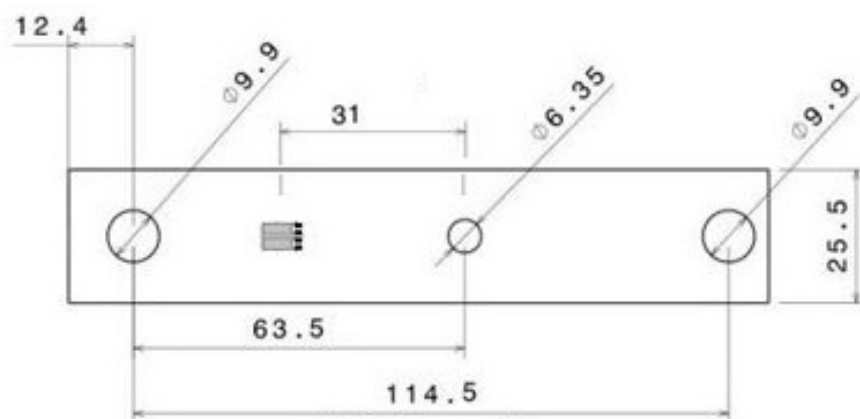


Figura 21. Dimensionamento da mola de arrasto

Ademais, para a instalação dos extensômetros é necessário preparar a superfície em que eles serão fixados. A preparação é realizada com lixas, ácidos e neutralizadores para garantir que a adesão do extensômetro à superfície seja completa. Na fixação é pincelada a cola no extensômetro, e então, aplica-se calor e pressão constante. O tempo de cura depende da temperatura. Com auxílio de um forno e morsas os extensômetros foram submetidos a alta pressão por 90 minutos a uma temperatura de 180°C.

Uma vez fixados, os extensômetros são conectados a cabos RJ50 que ligam a balança a um módulo de entrada analógica NI 9237 instalado em um rack NI cDAQ-

9172, (Fig. 22). O módulo converte o sinal e transmite via USB para o software LabVIEW instalado em um computador.

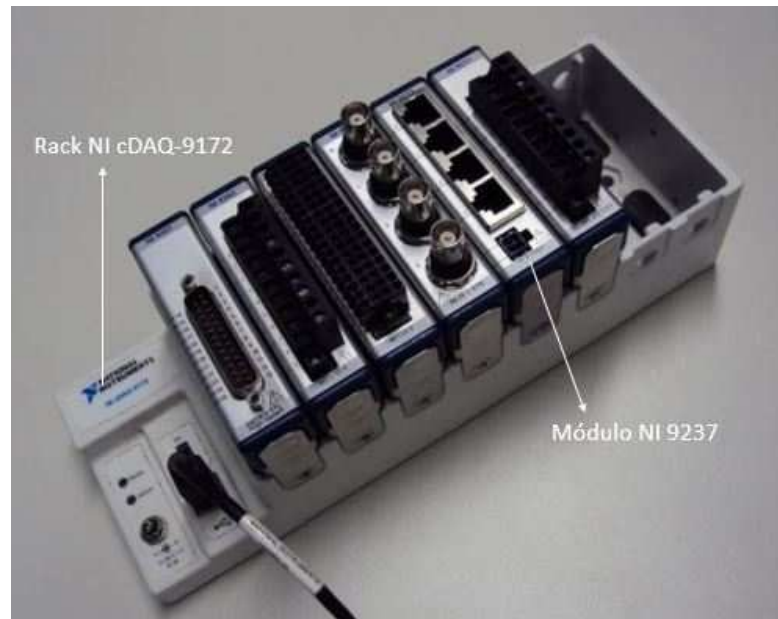


Figura 22. Módulo NI 9237 e Rack NI cDAQ 9172 [13]

3.4 RETROVISORES AUTOMOTIVOS

No presente Trabalho de Conclusão de Curso, foram utilizados seis modelos aerodinâmicos para testes com três retrovisores automotivos e três cópias planas, confeccionadas em MDF de 15mm de espessura, de mesmo formato, área e comprimento característico, que os respectivos retrovisores, como mostra a Fig. (23).



Figura 23. Retrovisores

Os modelos de retrovisor empregados foram:

Tabela 1. – Retrovisores

Modelo	Ano de fabricação	Projeção da área plana (m ²)	Comprimento característico (m)
Celta Life	2009-2012	0,02765	0,180
Corsa VHC	2003-2009	0,02585	0,170
Del Rey GL	1985-1991	0,02525	0,175

Os modelos aerodinâmicos, citados acima, são montados em placas de MDF de 15 mm de espessura e fixados à balança por uma barra de latão, como mostra a Fig. (24).



Figura 24. Cópia plana de retrovisor com haste

4 MÉTODOS E ENSÁIOS

Nesse tópico são apresentados os métodos e cálculos específicos utilizados no desenvolvimento prático do trabalho.

4.1 DIMENSIONAMENTO DAS MOLAS

4.1.1 Tensão

A tensão mecânica é definida pela força por unidade de área ou pela intensidade das forças distribuídas em uma seção transversal.

A tensão σ em uma barra de seção transversal A submetida à uma força axial F , é obtida a partir da divisão do módulo, F da força pela área, A , como demonstra a Eq. (12). [4]

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (12)$$

onde:

- F = Força aplicada;
- A = Área da seção transversal;

4.1.2 Deformação

Para a Mecânica dos Materiais, deformação é a mudança na configuração dimensional de um corpo submetido a uma ação externa. Identifica-se a deformação específica ε , representada pela expressão abaixo:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (13)$$

onde:

$$\delta = L - L_0 \quad (14)$$

E, em que:

- ε = deformação específica
- δ = deformação total;
- L_0 = comprimento inicial do corpo;

- L = comprimento final do corpo;

O diagrama tensão-deformação, típico de um material dúctil, Fig. (25).

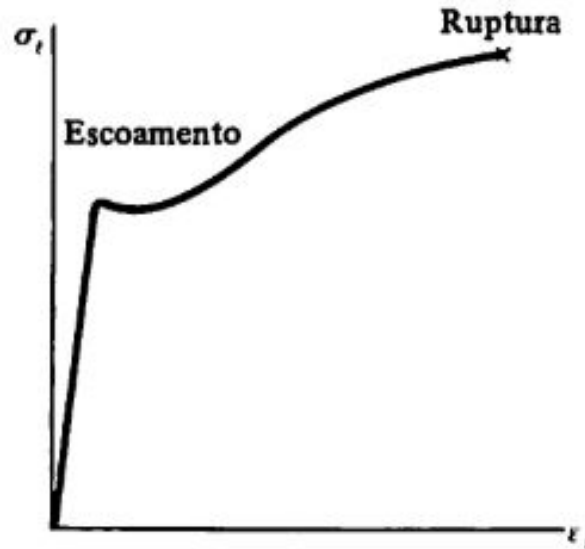


Figura 25. Diagrama tensão/deformação [6]

O trecho linear do diagrama acima corresponde a região elástica do material, onde a tensão, σ , é diretamente proporcional à deformação específica, ε . Essa relação é conhecida como lei de Hooke, (Eq. 15):

$$\sigma = E\varepsilon \quad (15)$$

onde:

- E = módulo de elasticidade do material (ou módulo de Young);

O valor absoluto da relação entre deformação específica transversal e deformação específica longitudinal é chamado de coeficiente de Poisson ν . [4]

$$\nu = \left| \frac{\text{deformação específica transversal}}{\text{deformação específica longitudinal}} \right| \quad (16)$$

Seguindo-se a orientação da Fig. (26), chega-se a Eq. (17):

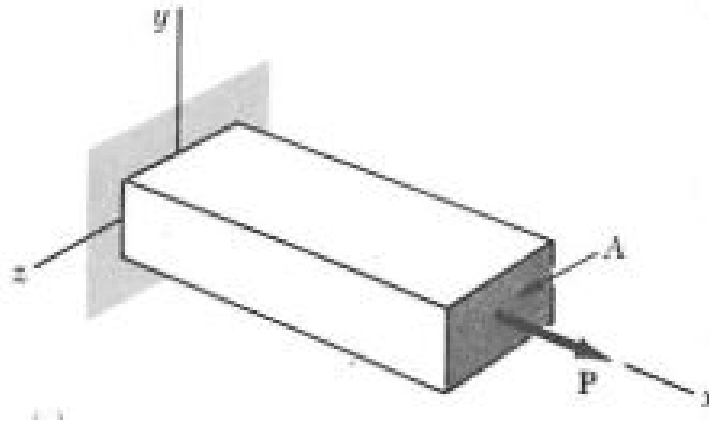


Figura 26. Sistema de orientação [5]

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (17)$$

4.1.3 Flexão

Na esfera da Mecânica dos Materiais, flexão é a deformação que ocorre em um corpo numa direção perpendicular ao seu eixo longitudinal. Em uma barra com plano de simetria nas direções vertical e horizontal, com seção transversal retangular, a linha neutra passa pelo centro geométrico da peça. [4]

Uma barra engastada, quando submetida a um momento, está sujeita a Flexão, de acordo com a Eq. (18).

$$\sigma = -\frac{My}{I} \quad (18)$$

Em que:

- M = momento fletor aplicado na barra;
- y = distância entre fibra analisada e a linha neutra da barra;
- I = momento de inércia da barra;

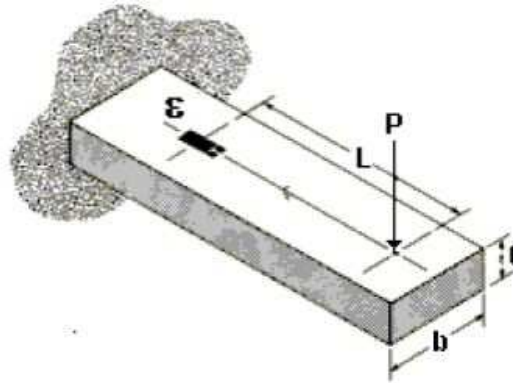


Figura 27. Barra engastada [5]

onde, de acordo com a Fig. (27):

$$M = -F \times L \quad (19)$$

$$y = \frac{t}{2} \quad (20)$$

$$I = \frac{bt^3}{12} \quad (21)$$

Dessa forma a tensão na superfície da barra é:

$$\sigma = \frac{6FL}{bt^2} \quad (22)$$

Considerando que $L \gg t$, aplicando a Lei de Hooke, tem-se que a deformação em um ponto sobre a superfície da barra é:

$$\varepsilon = \frac{6FL}{Ebt^2} \quad (23)$$

4.2 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE CISALHAMENTO

Na determinação do módulo de cisalhamento das molas, a balança foi montada com a configuração inicial, onde a deflexão da mola corresponde a uma força exercida sobre a mesma, como mostra a figura abaixo.



Figura 28. Aferindo a deflexão

Dessa forma, com o auxílio de um micrômetro e de um relógio comparador, foram realizados testes a fim de determinar o módulo de cisalhamento real da mola.

Uma vez sabendo que a flecha máxima de uma barra engastada é dada por:

$$Y_{max} = \frac{FL^3}{3EI} \quad (24)$$

O ângulo da extremidade em balanço é dado por:

$$\theta = \frac{FL^2}{2EI} \quad (25)$$

Nesse caso, a distância entre o engaste e a aplicação da força, e entre a aplicação da força e o ponto onde se mede a deflexão, são iguais, então:

$$Y_{Def} = \frac{FL^3}{3EI} + L \tan\left(\frac{FL^2}{2EI}\right) \quad (26)$$

Considerando $\tan \theta = \theta$, para ângulos muito pequenos tem-se que:

$$Y_{Def} = \frac{5FL^3}{6EI} \quad (27)$$

Isolando o módulo de elasticidade tem-se que:

$$E = \frac{5FL^3}{6Y_{Def}I} \quad (28)$$

Assim, foram realizados dois testes divididos em duas partes, a primeira aumentando a carga e a segunda diminuindo. Para cada carga, em cada teste, foram realizadas cinco tomadas de valor de deflexão. Como resultado, foi possível determinar o módulo de cisalhamento da mola.

4.3 CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA

Para a utilização da célula de carga foi criada uma rotina em LabVIEW, onde a ponte de Wheatstone é excitada com uma tensão de entrada de 10V e a taxa de aquisição da tensão de saída é 2 KHz. No mostrador aparece a cada segundo a média das 2 mil aquisições, como mostrado na Fig. (29).

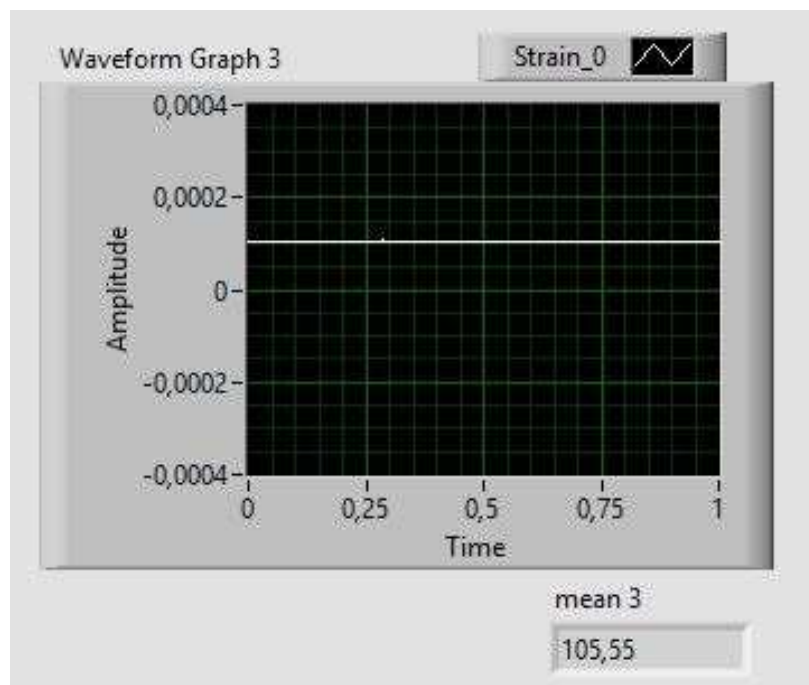


Figura 29. Interface LabVIEW

Na calibração da célula de carga (Fig. 30) foram utilizadas oito combinações diferentes de massas padrão, foram realizados cinco ensaios aumentando a carga sobre a mola e cinco ensaios diminuindo a carga sobre a mola, pois, é comum que exista uma pequena histerese nesse tipo de dispositivo. Antes de cada teste a ponte foi balanceada. A cada tomada de valor desligava-se o dispositivo, religava-o, em seguida aferia-se o valor.



Figura 30. Calibração da balança de túnel de vento

4.4 PREVISÃO TEÓRICA DE SAÍDA DE SINAL

Nesse tópico é apresentada a função de transferência teórica para a calibração da balança.

4.4.1 Resistência do extensômetro

A resistência elétrica em fio metálico varia de acordo com sua deformação, no caso em análise, um extensômetro apresentará sua resistência de acordo com a Eq. (29) [5].

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (29)$$

onde:

- A = área de seção transversal do fio;
- ρ = resistividade do material do fio;
- R = resistência elétrica;
- l = comprimento original do fio;

Para obter uma mudança relativa de resistência a Eq. (29) é diferenciada:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA \quad (30)$$

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA \quad (31)$$

$$dR = \frac{l}{A} d\rho + \frac{\rho}{A} dl - \frac{\rho l}{A^2} dA \quad (32)$$

Dividindo a equação (32) por R :

$$\frac{dR}{R} = \frac{l/A}{R} d\rho + \frac{\rho/A}{R} dl - \frac{\rho l/A^2}{R} dA \quad (33)$$

Substituindo pela Eq. (29):

$$\frac{dR}{R} = \frac{l/A}{\rho l/A} d\rho + \frac{\rho/A}{\rho l/A} dl - \frac{\rho l/A^2}{\rho l/A} dA \quad (34)$$

Resultando na expressão:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \quad (35)$$

Em um fio de seção retangular:

$$A = b \times t \quad (36)$$

Em um fio de seção circular:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (37)$$

Usando a área seção circular tem-se que:

$$dA = \frac{\pi D}{2} dD \quad (38)$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{\frac{\pi D}{2} dD}{\frac{\pi}{4} D^2} = 2 \frac{dD}{D} \quad (39)$$

Usando a área seção retangular tem-se que:

$$\frac{dA}{A} = \frac{db}{b} \frac{dt}{t} \quad (40)$$

Utilizando a Eq. (13) tem-se:

$$\frac{dD}{D} = \frac{db}{b} = \frac{dt}{t} = \varepsilon_t \quad (41)$$

$$\frac{dl}{l} = \varepsilon_a \quad (42)$$

onde:

- ε_t = deformação transversal do fio;
- ε_a = deformação axial do fio;

Multiplicando a Eq. (39) ou a Eq. (40) pela Eq. (17) chega-se em:

$$\frac{dA}{A} = -2\nu\varepsilon_a \quad (43)$$

Substituindo na Eq. (35).

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon_a - (-2\nu\varepsilon_a) \quad (44)$$

Arrumando a Eq. (44), tem-se:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_a \left(\frac{d\rho}{\rho\varepsilon_a} + 1 + 2\nu \right) \quad (45)$$

Em um extensômetro, o fator de sensibilidade K , também conhecido como *Gauge Factor*, é dado por:

$$K = \left(\frac{d\rho}{\rho\varepsilon_a} + 1 + 2\nu \right) \quad (46)$$

Dessa forma:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_a K \quad (47)$$

O valor de K depende do modelo de extensômetro utilizado e normalmente é fornecido pelo fabricante, nesse caso $K = 2,1$.

4.4.2 Circuito de medição

O circuito de medição de ponte completa é composto por quatro extensômetros ativos.

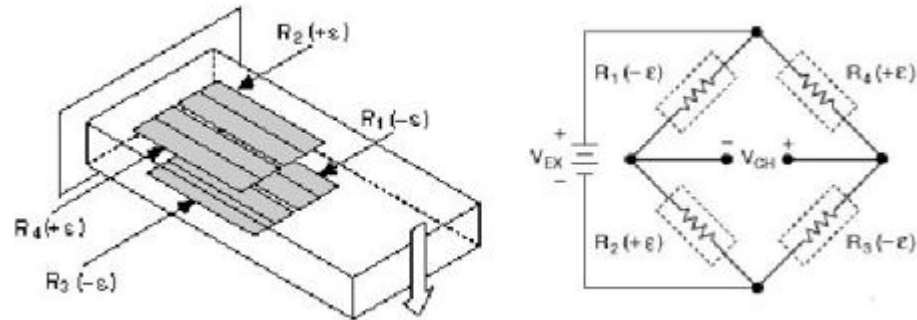


Figura 31. Circuito utilizado de ponte completa [4]

Substituindo R_1 e R_3 por $(R + \Delta R)$, e R_2 e R_4 por $(R - \Delta R)$ na Eq. (3), chega-se

a:

$$V_0 = V_e \left(\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R - \Delta R} - \frac{R - \Delta R}{R - \Delta R + R + \Delta R} \right) \quad (48)$$

Dessa forma obtêm-se:

$$\frac{V_0}{V_e} = \frac{\Delta R}{R} \quad (49)$$

Substituindo ΔR na Eq. (49) pela Eq.(47) chega-se a:

$$\frac{V_0}{V_e} = K\varepsilon \quad (50)$$

Substituindo-se ε da Eq. (50) pela Eq. (23) chega-se a:

$$V_0 = \frac{V_e 6KPL}{Ebt^2} \quad (51)$$

4.5 VALIDAÇÃO DA BALANÇA

Ao validar a calibração da balança foi utilizada a mesma rotina em LabVIEW citada no tópico anterior, balancear a ponte de Wheatstone antes do experimento, desligar e ligar a ponte para cada tomada de valor.

O primeiro perfil escolhido para os ensaios de validação foi o cilindro, pois, suas propriedades aerodinâmicas são bastante conhecidas na literatura. O perfil utilizado possui um comprimento de 0,45 m e um diâmetro de 3", foi ensaiado a quatro Reynolds diferentes, e para cada ensaio foram realizadas oito tomadas de valores.



Figura 32. Teste com cilindro

O Segundo perfil escolhido para os ensaios de validação foi o aerofólio NACA 0012, pois, suas propriedades aerodinâmicas também são bastante conhecidas na literatura. O perfil utilizado possui um comprimento de 0,45 m e uma corda de 0,152 m, foi ensaiado a dois Reynolds diferentes, com angulação de 0°, 5°, 10°, 15° e 20°, e para cada ensaio foram realizadas cinco tomadas de valores.



Figura 33. Teste com aerofólio NACA 0012

4.6 INVESTIGAÇÃO DOS ESFORÇOS AERODINÂMICOS EM RETROVISORES

Nos testes, os perfis foram fixados à balança e presos em posição de trabalho. Seguindo os procedimentos de balanceamento da ponte, como citado no item 3.2.2, foram feitas oito tomadas de valor para cada. Para a realização do teste impunha-se uma tensão inicial na mola, em seguida, ligava-se o túnel de vento com o auxílio do inversor de frequência, por fim, fixava-se a velocidade do fluxo de ar até a velocidade desejada. Na identificação da velocidade foi utilizado o manômetro do túnel de acordo com a Eq. (4).

Três velocidades foram utilizadas nos testes, 10,2; 12,5; 15,0 m/s, como não houveram significativas mudanças de temperatura e umidade no ambiente de testes, as velocidades correspondem a três valores de Reynolds diferentes para cada par de modelos aerodinâmicos, como mostra a Eq.(10).



Figura 34. Ensaio de cópia plana de retrovisor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados experimentais são apresentados e confrontados com os resultados teóricos. Os resultados dos ensaios são apresentados por meio de tabelas de dados e gráficos ilustrativos.

As incertezas dos dados são tratadas de acordo com a Eq. (52), como mostrado no anexo I.

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \sigma_a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \sigma_b\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial n} \sigma_n\right)^2} \quad (52)$$

5.1 MÓDULO DE CISALHAMENTO DA MOLA

A apresentação do presente tópico é importante devido a investigação de possíveis discrepâncias entre os resultados práticos e os resultados teóricos. Dessa forma, é possível aperfeiçoar a validação dos resultados experimentais obtidos nesse TCC.

No teste foram utilizadas quatro configurações de massa padrão, os valores de deflexão utilizados foram a média de cada ensaio. O módulo de cisalhamento em função da deflexão é dado de acordo com a Eq.(28). Os resultados obtidos estão apresentados na Fig. (35).

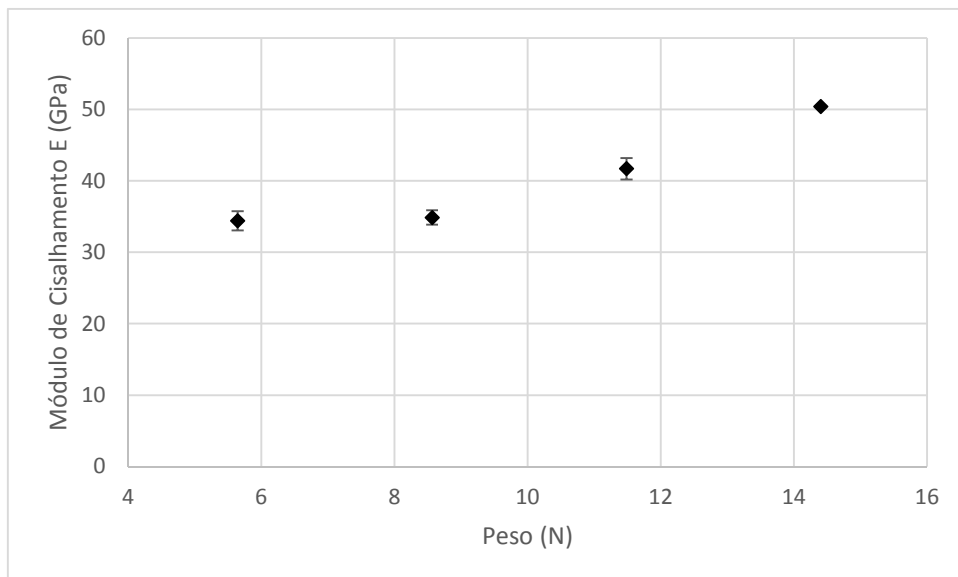


Figura 35. Módulo de cisalhamento experimental

O módulo de cisalhamento apresentado por:

$$E = (40 \pm 4) \text{ GPa}$$

O mensurando acima corresponde à média dos quatro valores apresentados no Fig. (35). A incerteza é a soma das incertezas de cada valor de E .

5.2 DADOS EXPERIMENTAIS DA CALIBRAÇÃO

A calibração da balança tem como objetivo vincular os valores de tensão, de saída na célula de carga, a uma determinada força aplicada à balança. Dessa maneira, para cada valor de tensão obtido há uma força associada.

Nessa etapa, os valores teóricos obtidos, com o auxílio dos cálculos realizados no capítulo anterior, são confrontados com os valores resultantes dos ensaios experimentais.

O resultado teórico, de acordo com a aplicando o valor de E na Eq.(51), é apresentado pelo Fig. (36).

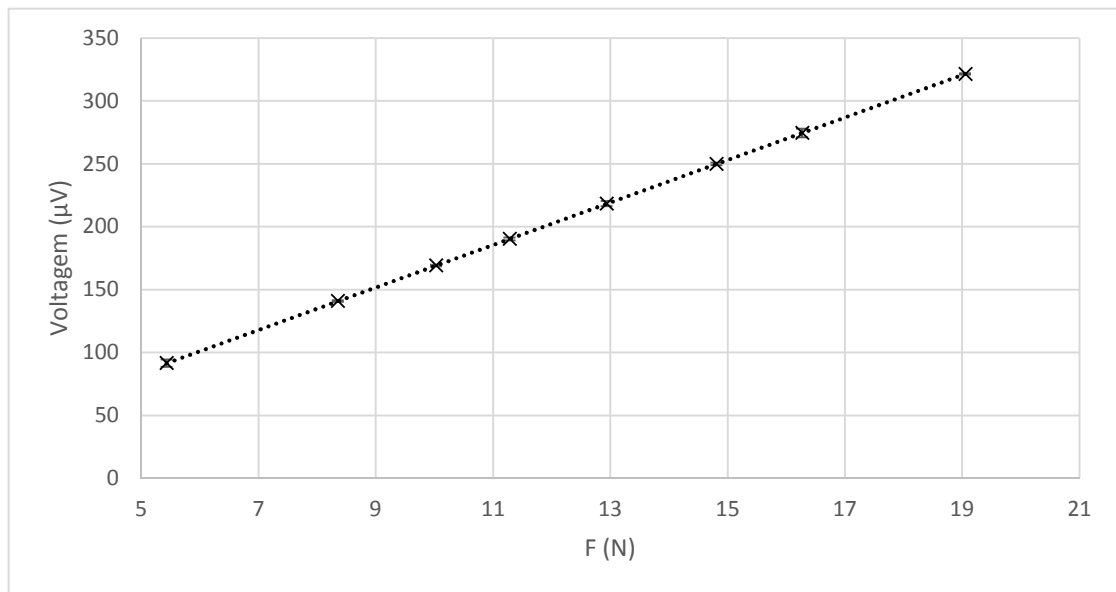


Figura 36. Curva teórica de calibração

Na calibração da balança, o coeficiente angular da reta exibida acima, representa a função de transferência, que relaciona a tensão de saída da célula de carga a uma força aplicada. Nesse caso, a função de transferência teórica encontrada é:

$$V_0 = 16,874 F \tag{53}$$

Os valores experimentais que relacionam a tensão de saída a uma certa massa padrão, são apresentados nas Fig. (37) e (38).

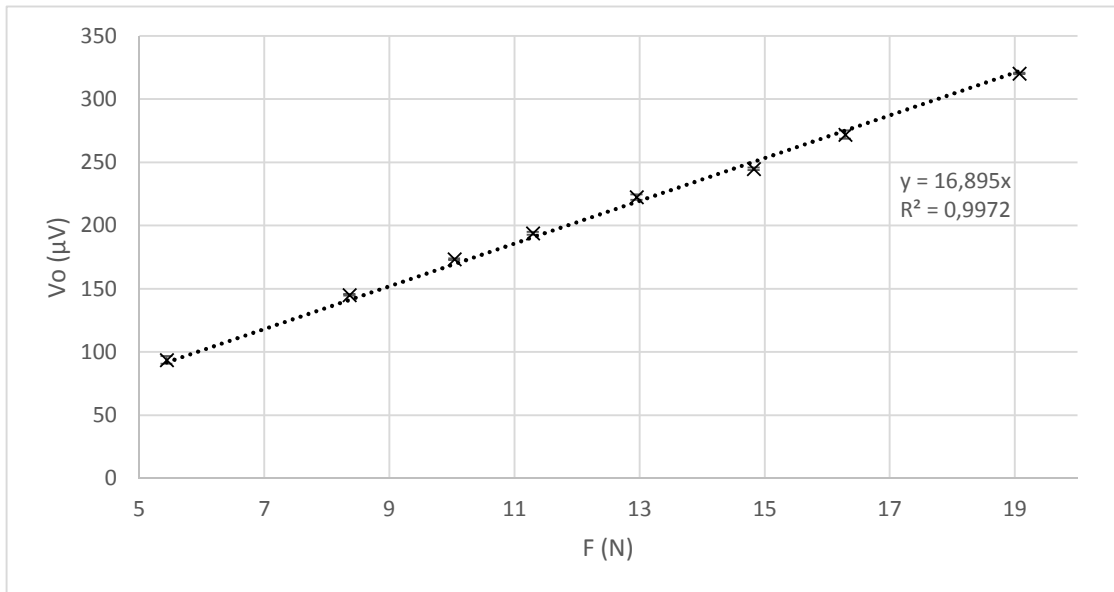


Figura 37. Calibração subindo

A Figura (37) expõe os resultados de calibração seguindo uma rotina de aumento carga sobre a balança.

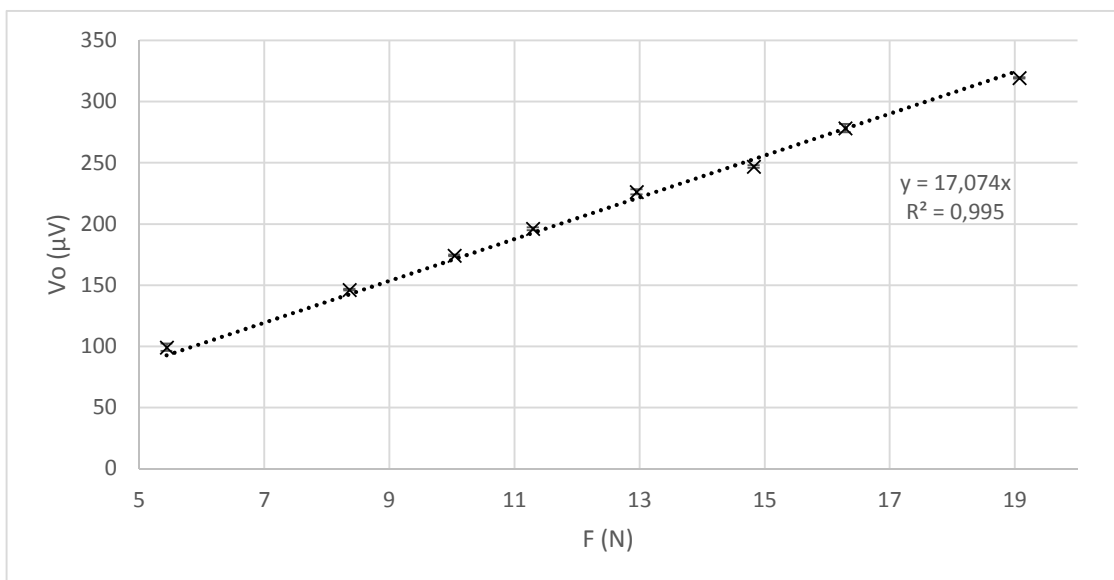


Figura 38. Calibração descendo

A Figura (38) expõe os resultados de calibração seguindo uma rotina de diminuição de carga sobre a balança.

Observa-se pelos gráficos apresentados, uma pequena diferença no coeficiente angular das duas curvas, o que indica a existência de uma pequena histerese na célula de carga.

O resultado encontrado para a equação característica da calibração, aumentando (subindo) a carga sobre a mola, com um $R^2= 0,9972$, é:

$$V_0 = 16,912 F \quad (54)$$

Da mesma forma, o resultado encontrado para a equação característica da calibração diminuindo (descendo) a carga sobre a mola, com um $R^2= 0,9950$, é:

$$V_0 = 17,091 F \quad (55)$$

Com o propósito de simplificar a escolha de qual equação adotar para ensaios, pode-se utilizar o valor médio de todos os resultados obtidos durante o experimento.

Dessa forma, o resultado da calibração da célula de carga é dado pelo Fig. (39).

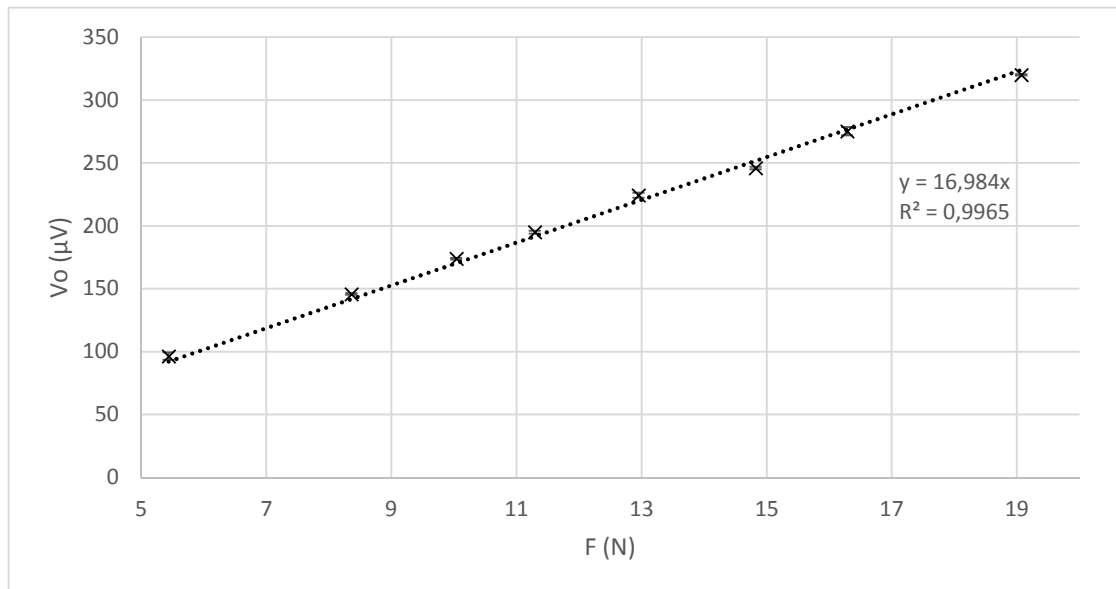


Figura 39. Resultado experimental da calibração

De acordo com o gráfico acima, com um $R^2= 0,9965$, obtém-se a equação característica média que rege a célula de carga:

$$V_0 = 17,002 F \quad (56)$$

Percebe-se, como esperado, que o valor do coeficiente angular da Eq. (56) é o valor médio dos coeficientes angulares das Eq. (54) e (55). É evidenciado com os

resultados de R^2 muito próximos de 1, que as curvas de calibração da célula de carga são extremamente lineares.

Com o auxílio da Fig.(40), pode-se confrontar os resultados teóricos esperados com os resultados obtidos pela calibração da balança.

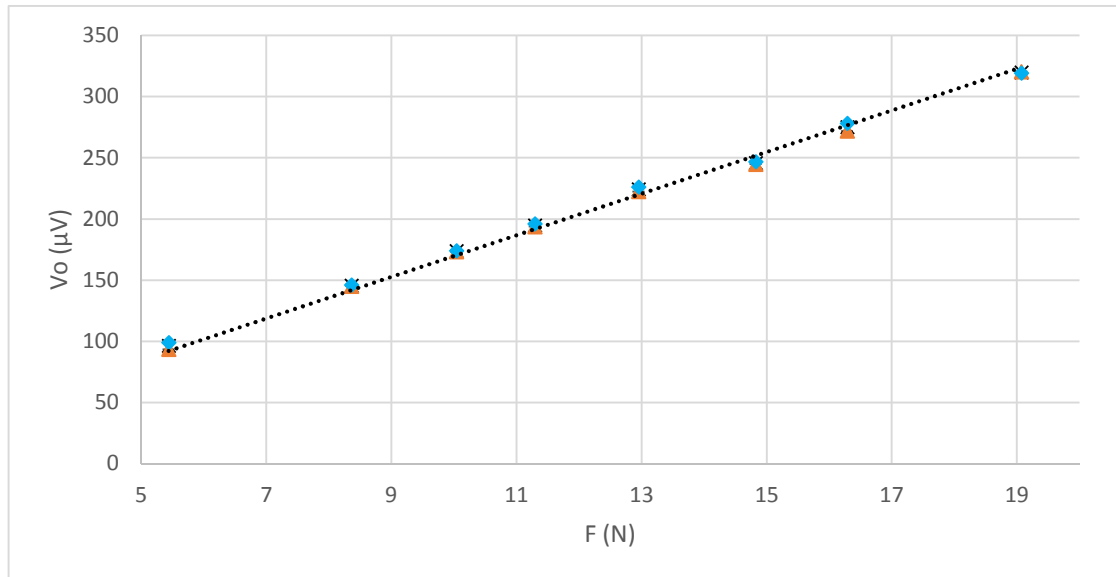


Figura 40. Curvas de calibração

Pela Figura (40), observa-se que a tensão de saída esperada, se aproxima bastante dos valores obtidos com a calibração da balança. Isso se dá graças a investigação do módulo de cisalhamento da mola.

5.3 VALIDAÇÃO DA RECONSTRUÇÃO DA BALANÇA

Esse tópico é de extrema relevância para o presente Trabalho de Conclusão de Curso, uma vez que, com a comparação entre valores encontrados nos ensaios realizados em perfis conhecidos, e valores encontrados na literatura, é possível assegurar a validade dos resultados da balança.

Com o equipamento utilizado nesse trabalho foi possível trabalhar com velocidades entre 5 e 15 m/s. Velocidades fora dessa faixa, se mostraram impraticáveis de serem aferidas com o manômetro do túnel de vento do laboratório. Não obstante, a fim de comparar o coeficiente de arrasto de um cilindro encontrado na literatura, com valores encontrados a partir da balança de túnel de vento, foram feitos ensaios com quatro velocidades diferentes, 5 m/s; 10,2 m/s, 12,5m/s e 15 m/s. Por conseguinte foram realizados ensaios na faixa de $0,8 \cdot 10^5$ até $2,5 \cdot 10^5$ Reynolds.

Para possibilitar o confronto de valores obtidos com auxílio da balança de túnel de vento, com valores teóricos, os valores de coeficiente de arrasto, de um cilindro, em função do número de Reynolds foram extraídos da tese de Jeffrey C. Stroman [16] de acordo com a tabela apresentada no anexo 3. Na Figura. (41), são apresentados resultados teóricos de coeficiente de arrasto para um cilindro, junto aos resultados ensaiados.

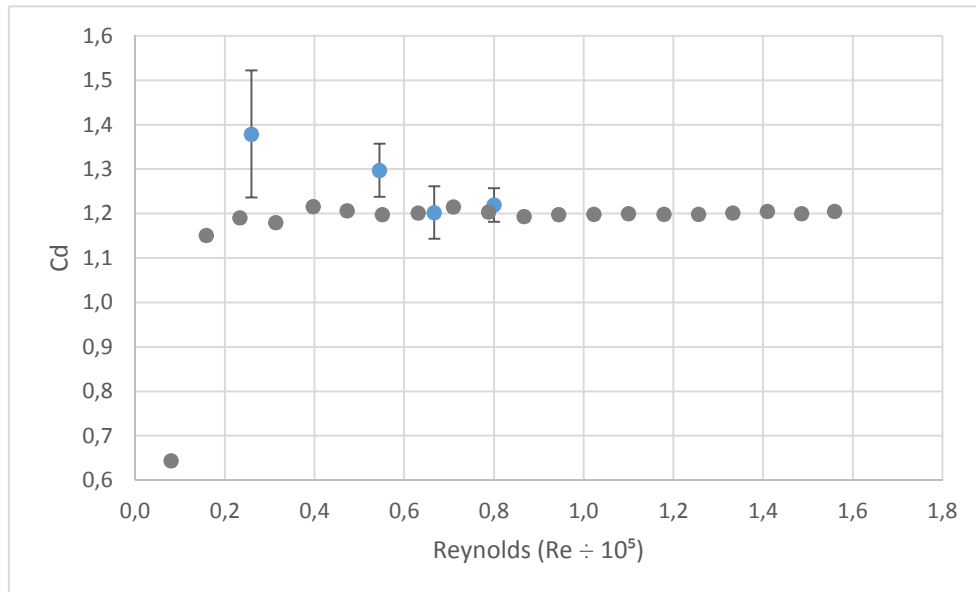


Figura (41). Coeficiente de arrasto do cilindro

Como esperado, os valores de coeficiente de arrasto apresentados nos ensaios não estão muito diferentes do que é aguardado de acordo com a literatura.

Para possibilitar o confronto de valores de coeficiente de arrasto em um perfil NACA 0012, complementando a validação da balança. Os resultados teóricos de coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque foram extraídos do portal airfoiltools.com, de acordo com a tabela apresentada no anexo III.

Os ensaios para esse perfil foram realizados a duas velocidades diferentes, 12,5 e 15,0 m/s, que correspondem, nesse caso $1,4 \cdot 10^5$ e a $1,7 \cdot 10^5$ Reynolds respectivamente. Os resultados esperados com um Reynolds de $5 \cdot 10^5$ são confrontados com os valores obtidos nos ensaios de acordo com o Fig. (42).

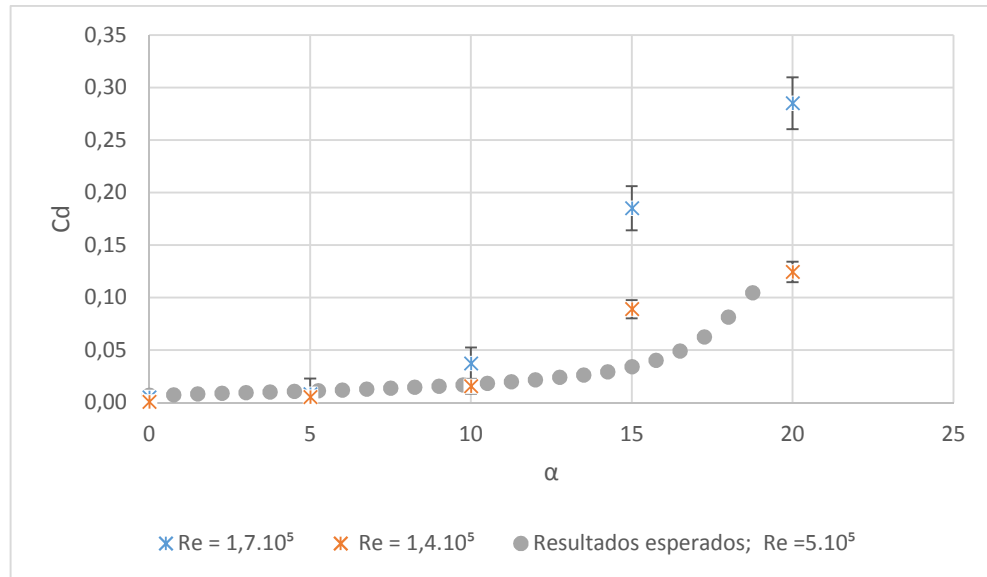


Figura 42. Coeficiente de arrasto NACA 0012

Observa-se pelo gráfico acima, que os resultados obtidos a partir dos ensaios no perfil NACA 0012, estão de acordo com o resultado esperado. Nota-se que para os pontos de α acima de 12° o valor do coeficiente de arrasto aumenta rapidamente, isso se dá por conta do fenômeno de estol.

O confronto dos dados obtidos, tanto a partir dos cilindros, quanto a partir do perfil NACA 0012 a partir do cilindro, atestam a validade dos dados obtidos a partir da referida balança.

5.4 ENSAIOS COM MODELOS DE RETROVISORES AUTOMOTIVOS

O objetivo desse tópico é apresentar os coeficientes de arrasto de alguns modelos de retrovisores automotivos, compará-los com coeficientes de chapas planas e analisar os esforços aerodinâmicos sobre eles. Todos os ensaios foram realizados com uma velocidade constante e conhecida, primeiro com 10,2 m/s, em seguida 12,5/s e por último 15,0 m/s. Desta forma a equação característica de calibração utilizada nos testes foi a Eq. (54).

Para a apresentação dos resultados, os valores de coeficiente de arrasto do retrovisor e da cópia plana são exibidos no mesmo gráfico.

A partir dos ensaios, os resultados de coeficiente de arrasto em função de Reynolds encontrados são:

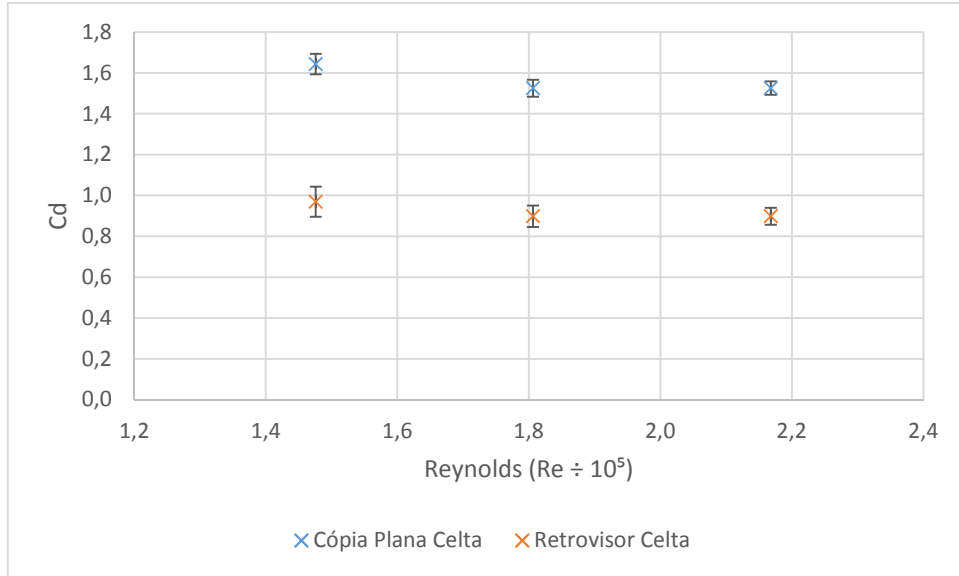


Figura 43. Coeficiente de arrasto Celta

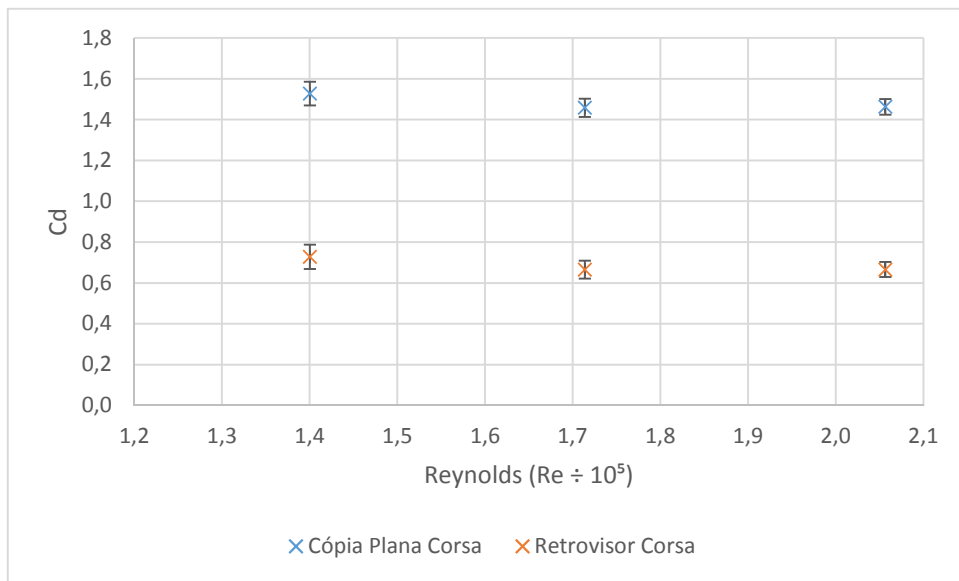


Figura 44. Coeficiente de arrasto Corsa

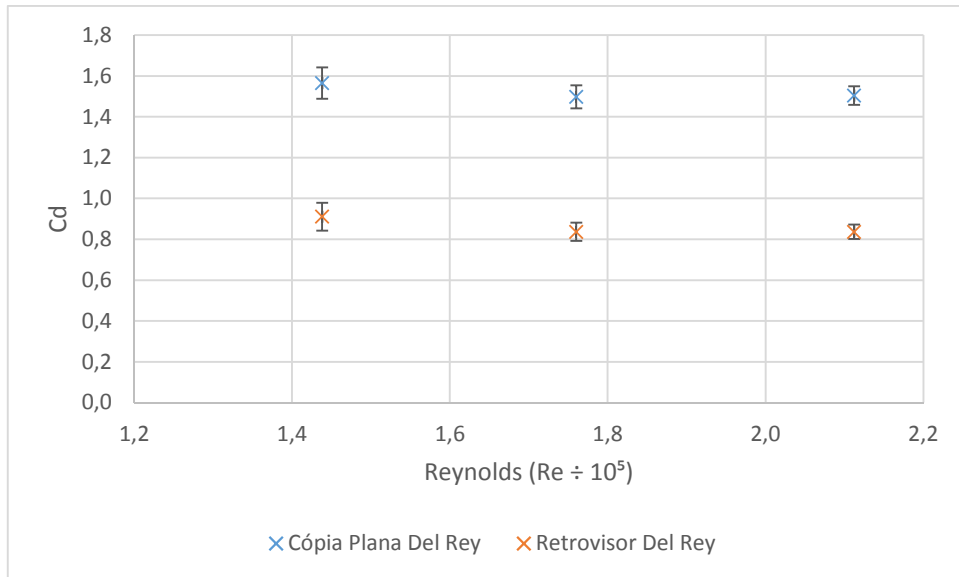


Figura 45. Coeficiente de arrasto Del Rey

Observa-se que existe o mesmo padrão nos três gráficos acima apresentados, para o mesmo número de Reynolds a os retrovisores aerodinâmicos apresentam um coeficiente de arrasto significativamente menor que as cópias planas, provando que a geometria dos retrovisores é de grande importância para o coeficiente de arrasto. Os resultados apontam que para diferentes Reynolds o coeficiente de arrasto permanece praticamente constante, evidenciando que o coeficiente de arrasto é uma grandeza adimensional que caracteriza o quanto o corpo sofre os efeitos aerodinâmicos de arrasto.

Para os três retrovisores os valores de coeficiente de arrasto não variaram muito indicando que o comportamento aerodinâmico dos três modelos não é muito diferente apesar das diferenças de modelo e de ano de fabricação, em contra ponto quando comparados com as cópias planas, evidencia-se que se não for dada a devida atenção no projeto desse elemento automotivo o coeficiente de arrasto pode ser bastante elevado.

6. CONCLUSÃO

Os estudos realizados no decorrer desse TCC, demonstraram que uma das maiores dificuldades em trabalhos experimentais é a aleatoriedade de situações que podem ocorrer durante as etapas do trabalho. Com frequência, é necessário reajustar algum parâmetro, refazer alguma parte do trabalho que sofreu algum dano, ou ainda, criar soluções para problemas inesperados que surgem durante a realização do trabalho. Essas dificuldades tornaram muito mais desafiador e interessante, esse trabalho experimental, exigindo muita criatividade e persistência.

Esse trabalho apresenta um breve estudo sobre os esforços aerodinâmicos em retrovisores. Para que fosse possível a realização dos experimentos, foi necessário realizar a reconstrução da Balança de Túnel de Vento localizada no laboratório Vortex. A balança foi reconstruída e está em funcionamento pronta para ensaios. A reconstrução contou com a restauração da parte mecânica; instalação de extensômetros para aferição de força de arrasto; instalação de mecanismos eletrônicos capazes de coletar dados através do módulo NI 9237 e do software LabVIEW; e ainda, instalação para coleta de dados utilizando material de baixo custo, no caso o arduino. Como primeiramente observado, a restauração da Balança de Túnel de Vento fica como legado para a Universidade de Brasília, para os docentes e discentes; como ferramenta de ensino, principalmente para os cursos de Mecânica dos Fluidos I e II; e como ferramenta de pesquisa para futuros projetos, dissertações e teses.

Após a fase inicial de revitalização, foi realizada a calibração e a validação da Balança de Túnel de Vento, confrontando os resultados obtidos, a partir de ensaios executados, com a literatura. Os modelos utilizados para esses ensaios foram um cilindro e um aerofólio NACA 0012. Como conclusão da validação, ficou explicitado que os resultados obtidos com a Balança são confiáveis e compatíveis com a literatura.

Sequencialmente, foi executada a investigação de esforços aerodinâmicos em retrovisores automotivos, para tal, foram dispostos na Balança de Túnel de Vento, retrovisores de diferentes modelos de veículo e réplicas em chapa de MDF. Como a investigação principal desse TCC, conclui-se com que para os modelos testados, mesmo com grandes variações de modelo e ano de fabricação, o coeficiente de arrasto não varia muito. Porém, comparando-se as placas planas de MDF com os

retrovisores originais, conclui-se que para a mesma área refletida o coeficiente de arrasto pode variar bastante. Destaca-se que, apesar das conclusões obtidas no presente trabalho, ainda há espaço para muita pesquisa na área.

Ademais, no Trabalho de Conclusão de Curso I foi apresentada uma discrepância entre os valores teóricos do sinal de saída da célula de carga e dos valores obtidos nos testes. Para investigar as possíveis causas da discrepância, um ensaio para obter o módulo de cisalhamento da mola foi realizado e diagnosticado. Em decorrência da investigação, os valores encontrados pelo ensaio foram utilizados para os cálculos no decorrer do projeto.

Por fim, vale a pena destacar que, para um aluno de Engenharia Automotiva, realizar todas etapas deste TCC foi de extrema importância para a compreensão dos conceitos ensinados ao longo do curso de graduação, mais precisamente, restou claro que a junção entre o estudo e a prática possibilitam a formação de um Engenheiro mais capacitado para o mercado de trabalho.

6.1 SUGESTÕES PARA FUTURO TRABALHO

Em futuras pesquisas realizadas com a Balança, ou relacionadas à temática abordada no presente trabalho, seguem abaixo algumas sugestões que possam complementar esse trabalho de conclusão de curso.

- Conversão da parte analógica da aquisição de dados de sustentação, de mecânica para eletrônica;
- Testes em mais modelos de retrovisor;
- Análise de esforços aerodinâmicos para diferentes customização em retrovisores;
- Análise de esforços aerodinâmicos para diferentes elementos automotivos, como antenas e calhas de chuva;
- Análise de esforços aerodinâmicos em capacetes.
- Implementação do arduino

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ahmed, S, R.Hucho, Wolf-Heinrich., Sovran, Gino. 1993. *AERODYNAMIC OF ROAD VEICLES* Annual. Reviews Inc. Fluid Mech. 1993.25 :485-537
- [2] Alam,R. Jaitlee and Watkins. 2004. *AERODYNAMIC EFFECTS ON AN AUTOMOTIVE REAR SIDE VIEW MIRROR*. School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engeneering RMT University.
- [3] Andolfato, R. P.; Camacho, J. S.; Brito, G. A. 2004. *EXTENSOMETRIA BÁSICA*. Universidade Estadual Paulista - Júlio Mesquita Filho - Unesp. Ilha Solteira,
- [4] Barreto, Jr., E. 2005. *O EXTENSOMETRO ÉLETRICO DE RESISTÊNCIA*, Editora, São Paulo.
- [5] Barroso, Alexandre, P. B. 2010 *ESCOAMENTO TURBULENTO EM TORNO DE UM CILINDRO DE BAIXO NÚMERO DE REYNOLDS* .Dissertação de MIEM, Universidade de Porto
- [6] Beer, F. P. 2008. *RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS*. McGraw-Hill do Brasil LTD, 3ª edição.
- [7] Emmelmann, Hans J., Berneburg, Helmut, Schulze, Josef .1990. *THE AERODYNAMIC DEVELOPMENT OF THE OPEL CALIBRA* Technical Development of GM Europe Russelsheim, Fed. Republic of Germany.
- [8] Goetz, Hans,. 1971. *THE INFLUENCE OF WIND TUNNEL TESTS ON BODY DESIGNING, VENTILATION, AND SURFACE DEPOSITS OF SEDANS ANS SPORT CRAS*. Daimler-Benz AG.
- [9] Heffley, R.. 1973. *AERODYNAMICS OF PASSENGER VEHICLES IN CLOSE PROXIMITY TO TRUCKS AND BUSES*. Systems Technology, Inc.
- [10] Kim, J., Han, Y., Lim, B. 2009. *EXPERIMENTAL STUDY OF STATISTICAL AND SPECTRAL CHARACTERISTICS OF WAKE FLOW AROUND THE REAR VIEW SIDE MIRROR OF A PASSENGER CAR*. EACWEE 5, Florença, Italia.
- [11] Mason, William T., Beebe, Jr. Paul S, Schenkerl, Franz K,. 1973. *AN AERODYNAMIC TEST FACILITY FOR SCALE-MODEL AUTOMOBILES* .Research Laboratories, General Motors Carp.

[12] **Mohamed Zamri, Ramasamy D., Hanipah M. Razali. 2010.** *SIDE MIRROR AERODYNAMICS ANALYSIS*. Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang.

[13] **Oliveira Thiago. 2011.** *ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESTOL DINÂMICO EM UM AERROFOLIO NACA 0018*, Dissertação de mestrado, departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília.

[14] **Plint and Partners. 2007.** *THREE COMPONENT BALANCE INSTRUCTIONS*. Manual do fabricante da balança de túnel de vento.

[15] **Rind E. Hu W. Z., 2007.** *AERODYNAMICS OF F1 CAR SIDE MIRROR*- School of Engineering, University of Southampton.

[16] **Stroman, Jeffrey C. 2007.** *AERODAYNAMIC DRAG COEFFICIENTS OF A VARIETY OF ELECTRICAL CONDUCTORS*- Thesis in Mechanical Engineering Submitted to the Graduted Faculty of Texas Thec University.

[17] **Werneke, M M. 1996.** *TRANSDUTORES E INTERFACES*. Universidade Federal do Rio, Editora LTC, 1ª edição.

[18] **Werner, Frank, Frik, Steffen., 1998.** *AERODYNAMIC OPTIMIZATION OF THE OPEL CALIBRA ITC RACING CAR USING EXPERIMENTS AND COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*. Society of Automitive Engineers. Inc

[19] 2014, <http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-n0012-il-500000>

ANEXOS

ANEXO I: Análise de Incertezas

A incerteza associada às medições realizadas nos ensaios foi obtida a partir da Eq.(52).

A calibração da célula de carga foi realizada, com o auxílio de uma balança digital de 1 grama de precisão. O valor adotado para a gravidade, foi:

$$g = 9,81m/s^2$$

Dessa forma a incerteza associada à força peso é dada por:

$$\sigma_P = \sigma_m \cdot g \quad I.(1)$$

onde:

- σ_P = Incerteza associada ao peso;
- σ_m = Incerteza relacionada à massa;
- g = aceleração da gravidade.

$$\sigma_P = 0,01 N$$

A incerteza associada aos valores de V_0 , aferidos é dada pelo desvio associado.

Por conseguinte os resultados obtidos a partir da calibração são:

Tabela I.A. – Calibração da Balança

Peso $\pm 0,01$ (N)	Ensaios Subindo			Ensaios Descendo		
	Vo médio (μV)	σ , Vo (μV)	σ , Vo (%)	Vo médio (μV)	σ , Vo (μV)	σ , Vo (%)
5,43	93,68	0,22	0,23	99,32	0,08	0,08
8,36	145,18	0,08	0,06	146,38	0,13	0,09
10,04	173,42	0,48	0,28	174,36	0,09	0,05
11,29	193,94	0,11	0,06	196,10	0,29	0,15
12,95	222,52	0,26	0,12	226,38	0,29	0,13
14,82	244,90	0,23	0,10	246,86	0,11	0,05
16,28	272,02	0,18	0,07	278,42	0,08	0,03
19,07	320,42	0,26	0,08	319,52	0,22	0,07

A função de transferência encontrada é dada pela Eq (54), dessa forma para os ensaios o a força é o inverso do coeficiente angular da reta. A incerteza associada à tensão de saída, utilizada no TCC é dada pelo maior desvio encontrado na calibração, assim:

Considerando o coeficiente angular da função de transferência como α , tem-se:

$$F = \frac{V_0}{\alpha}$$

Por conseguinte, a incerteza associada à força aferida com a balança é apresentada por:

$$\sigma(F) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial V_0} \sigma V_0\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \alpha} \sigma \alpha\right)^2}$$

$$\sigma(F) = \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha} \sigma V_0\right)^2 + \left(-\frac{V_0}{\alpha^2} \sigma \alpha\right)^2}$$

A aferição da velocidade do escoamento, para os ensaios, de validação, e com retrovisores, é feita com o auxílio de um manômetro com precisão de 0,25 mm de coluna de água. De acordo com a Eq.(4), onde ΔP , é dado por:

$$\Delta P = \frac{gh\rho_{\text{água}}}{1000}$$

onde:

- g = aceleração da gravidade.
- h = altura da coluna d'água em mm
- $\rho_{\text{água}}$ = Massa específica da água

Destarte, a incerteza associada a velocidade de escoamento pode ser expressa por:

$$\sigma(U) = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial h} \sigma h\right)^2}$$

$$\sigma(U) = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial h} \left(\sqrt{\frac{2g\rho_{\text{água}}}{\left(1 - \left(\frac{A_2^2}{A_1^2}\right)\right)\rho_{ar}}} h \right) \sigma h \right)^2}$$

$$\sigma(U) = \frac{g\rho_{\text{água}}}{\sqrt{2} \left(\frac{A_2^2}{A_1^2} + \rho_{ar} - 1 \right)} \frac{1}{\sqrt{\frac{2g\rho_{\text{água}}}{\frac{A_2^2}{A_1^2} + \rho_{ar} - 1}}} \sigma h$$

O número de Reynolds é expresso pela Eq. (10), tomando como verdade que todas as grandezas da equação são conhecidas, com exceção de U, tem que a incerteza associada à Reynolds é expressa por:

$$\sigma(Re) = \sqrt{\left(\frac{\partial Re}{\partial U} \sigma U \right)^2}$$

$$\sigma(Re) = \frac{l\rho_{ar}}{\nu} \sigma U$$

As incertezas associadas ao coeficiente de arrasto, Expresso pela Eq. (6), são obtidas a partir de:

$$\sigma(Cd) = \sqrt{\left(\frac{\partial Cd}{\partial F} \sigma F \right)^2 + \left(\frac{\partial Cd}{\partial U} \sigma U \right)^2}$$

$$\sigma(Cd) = \sqrt{\left(\frac{2}{AU^2\rho_{ar}} \sigma F \right)^2 + \left(\frac{-4F}{AU^3\rho_{ar}} \sigma U \right)^2}$$

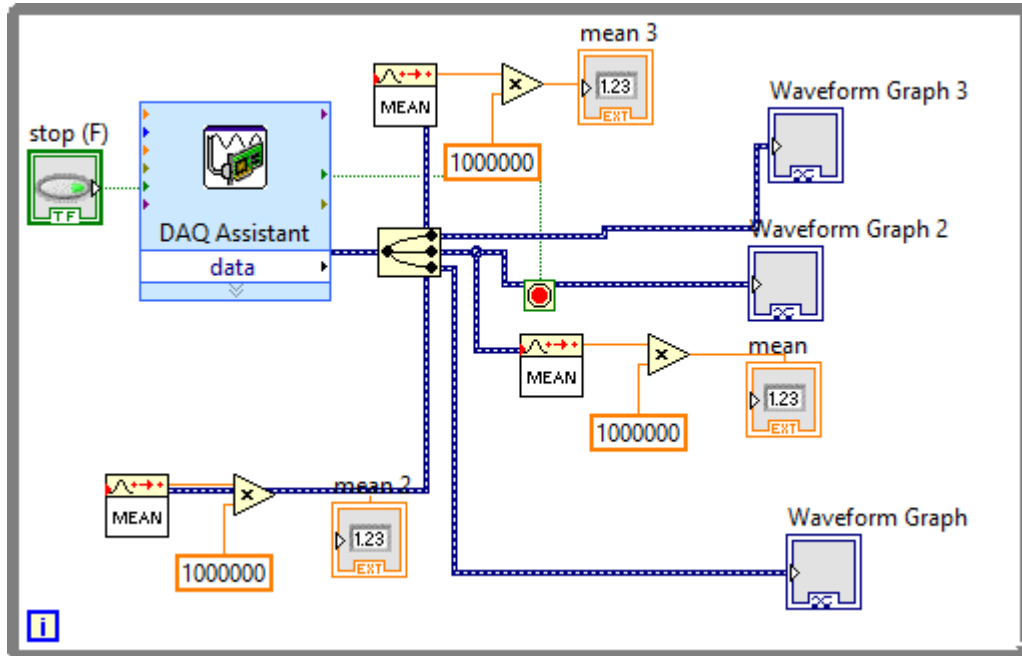
Tabela I.B. – Resultados experimentais do Cilindro

Re	$\sigma(Re)$	$\sigma(\%)$	Cd	$\Sigma(Cd)$	%
25924,67	2,16	0,01	2,30	0,24	10,37
54503,51	1,03	0,00	2,16	0,10	4,60
66702,53	0,84	0,00	2,00	0,10	4,91
80045,27	0,70	0,00	2,03	0,06	3,09

Tabela I.C. – Resultados experimentais do perfil NACA 0012

Re	$\sigma(\text{Re})$	Cd	$\sigma(\text{Cd})$
140816,5	1,772614	0,000931	0,011238
140816,5	1,772614	0,008912	0,011263
140816,5	1,772614	0,025968	0,011561
140816,5	1,772614	0,148257	0,014654
140816,5	1,772614	0,207406	0,016466
Re	$\sigma(\text{Re})$	Cd	$\sigma(\text{Cd})$
168984,5	1,477137	0,00821	0,008191
168984,5	1,477137	0,013281	0,024893
168984,5	1,477137	0,061816	0,025629
168984,5	1,477137	0,308716	0,035049
168984,5	1,477137	0,475329	0,041171

ANEXO II: Diagrama de Blocos do LabVIEW



ANEXO III: Dados NACA 0012

Os dados referentes ao perfil NACA 0012, apresentados nesse anexo, foram retirados do site, airfoiltools.com [19]. O link para o site é:

<http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-n0012-il-500000>

Tabela III.A. – Cd NACA 0012 [19]

NACA 0012 Reynolds 500000							
α	Cd	α	Cd	α	Cd	α	Cd
0,000	0,00699	5,000	0,01116	10,000	0,01723	15,000	0,03414
0,250	0,00692	5,250	0,01143	10,250	0,01794	15,250	0,03592
0,500	0,00704	5,500	0,01156	10,500	0,01836	15,500	0,03792
0,750	0,00727	5,750	0,01174	10,750	0,01877	15,750	0,04018
1,000	0,00766	6,000	0,01204	11,000	0,01923	16,000	0,04275
1,250	0,00803	6,250	0,01219	11,250	0,01983	16,250	0,04571
1,500	0,00825	6,500	0,01242	11,500	0,02073	16,500	0,04913
1,750	0,00843	6,750	0,01277	11,750	0,02118	16,750	0,05308
2,000	0,00861	7,000	0,01295	12,000	0,02171	17,000	0,05766
2,250	0,00879	7,250	0,01321	12,250	0,02228	17,250	0,06263
2,500	0,00898	7,500	0,01365	12,500	0,02298	17,500	0,06831
2,750	0,00916	7,750	0,01386	12,750	0,02416	17,750	0,07461
3,000	0,00938	8,000	0,01412	13,000	0,02484	18,000	0,08146
3,250	0,00962	8,250	0,01455	13,250	0,02552	18,250	0,08882
3,500	0,00985	8,500	0,01491	13,500	0,02628	18,500	0,09653
3,750	0,01006	8,750	0,01520	13,750	0,02712	18,750	0,10474
4,000	0,01031	9,000	0,01554	14,000	0,02809		
4,250	0,01052	9,250	0,01621	14,250	0,02936		
4,500	0,01074	9,500	0,01647	14,500	0,03126		
4,750	0,01101	9,750	0,01682	14,750	0,03260		

Os dados de coeficiente de arrasto abaixo foram retirados da tese de Jeffrey C. Stroman, B. S. M. E. [16].

Tabela III.B. – Cd Cilindro

CD Cilindro	
Re	Cd
7995	0,644
15860	1,151
23380	1,191
31330	1,180
39680	1,216
47250	1,207
55150	1,198
63090	1,202
70940	1,215
78830	1,204
86710	1,194
94460	1,198
102300	1,199
110000	1,200
117900	1,199
125600	1,199
133300	1,202
141000	1,205
148600	1,200
156000	1,205