

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MARCOS HENRIQUE SALAME DE ANDRADE**

**PROJETO DE UMA BALANÇA AERODINÂMICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO  
2016**

MARCOS HENRIQUE SALAME DE ANDRADE

## **PROJETO DE UMA BALANÇA AERODINÂMICA**

Proposta para Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Mecânica, da Coordenação de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Fernando Henrique De Oliveira Câmara

**CORNÉLIO PROCÓPIO**  
**2016**



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Mecânica**  
**Curso de Engenharia Mecânica**



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Marcos Henrique Salame De Andrade**

**Projeto de uma balança aerodinâmica**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:20hs do dia 31/05/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Me(a). Fernando Henrique de Oliveira Camara - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Adailton Silva Borges - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Rubens Gallo - (Membro)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por ter me concedido saúde, força, sabedoria e por ter colocado no meu caminho pessoas maravilhosas que me ajudaram a chegar até aqui.

Agradeço à toda minha família, em especial meu pai Waldir, minha mãe Lúcia, meus irmãos Lucas e Danilo, meus avós Urbano e Leonor, minha tia “Moçona” e minha namorada Izabella pelo amor, carinho e apoio que sempre me ajudaram a enfrentar os desafios da vida.

Agradeço ao meu orientador, Professor Mestre Fernando Henrique de Oliveira Câmara, pela confiança, atenção e ajuda que me concederam para a realização deste trabalho.

Agradeço também aos meus amigos, em especial ao Matheus Prevelato por sua contribuição a este trabalho, e colegas de classe pelo o apoio e amizade que por diversas vezes me ajudaram a enfrentar as complicações do cotidiano.

## RESUMO

ANDRADE, M. H. S de. **Projeto de uma Balança Aerodinâmica**. 2016. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Este trabalho consiste na realização de um projeto de uma balança aerodinâmica. O projeto consiste na escolha da plataforma de forças mais adequada para testes em Túnel de Vento, sua subsequente modelagem no software SolidWorks 2013, terminando com simulações no software SolidWorks Simulation para determinar pontos de instalação dos extensômetros que serão os dispositivos de medição da balança.

**Palavras-chave:** Plataforma de Forças, Túnel de Vento, Balança Aerodinâmica

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Plataforma de forças de Cunningham e Brown.....	11
Figura 2- Plataforma de forças de Petersen.....	12
Figura 3- Plataforma de força de Gola.....	13
Figura 4- Plataforma de força de Lywood et al.....	13
Figura 5- Modelagem do protótipo.....	14
Figura 6- Balança Sting proposta por Pastore.....	15
Figura 7- A balança aerodinâmica e a posição dos sensores.....	16
Figura 8- Diagrama simplificado de um transdutor de força utilizando extensômetros.....	25
Figura 9- Extensômetros de resistência elétrica.....	27
Figura 10- Ponte de Wheatstone.....	28
Figura 11- Circuito de Ponte Completa.....	29
Figura 12- Balança Aerodinâmica.....	30
Figura 13- Balança Deformada Pelo o Esforço $F_z$ .....	31
Figura 14- Balança Deformada Pelo o Esforço $F_x$ .....	32
Figura 15- Balança Deformada Pelo o Esforço $F_y$ .....	32
Figura 16- Balança Deformada Pelo o Esforço $M_x$ .....	33
Figura 17- Balança Deformada Pelo o Esforço $M_z$ .....	34
Figura 18- Balança Deformada Pelo o Esforço $M_y$ .....	35
Figura 19- Posicionamento dos Extensômetros.....	35
Figura 20- Posicionamento dos Extensômetros.....	36

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>9</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	9
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
<b>3</b>	<b>ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>10</b>
3.1	PLATAFORMA DE FORÇAS.....	10
3.2	BALANÇAS AERODINÂMICAS.....	13
<b>4</b>	<b>CRITÉRIOS DE PROJETO E ESCOLHA DA PLATAFORMA DE FORÇAS.....</b>	<b>17</b>
4.1.1	COMPONENTES DE FORÇAS MEDIDAS.....	17
4.1.2	PRECISÃO DO SISTEMA – SENSIBILIDADE.....	17
4.1.3	FREQUÊNCIA NATURAL.....	17
4.1.4	DESACOPLAMENTO ENTRE COMPONENTES DE FORÇA E MOMENTOS.....	18
4.1.5	INDEPENDÊNCIA DAS CONDIÇÕES EXTERNAS.....	18
4.2	ESCOLHA DA PLATAFORMA DE FORÇAS.....	18
<b>5</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....</b>	<b>20</b>
5.1	ESFORÇOS AERODINÂMICOS.....	20
5.2	TÚNEL DE VENTO.....	21
5.3	TRANSDUTORES DE FORÇA.....	23
5.3.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS TRANSDUTORES.....	24
5.3.2	EXTENSÔMETRO.....	25
5.2.3	PONTE DE WHEATSTONE.....	26
<b>6</b>	<b>ANÁLISE COMPUTACIONAL DA BALANÇA AERODINÂMICA.....</b>	<b>29</b>
6.1	MODELAGEM DA BALANÇA AERODINÂMICA.....	29
6.2	DETERMINAÇÃO DAS POSIÇÕES DE COLAGEM DOS EXTENSÔMETROS.....	30
6.2.1	INFORMAÇÕES DA MALHA.....	30
6.2.2	APLICAÇÃO DA FORÇA $F_z$ .....	31
6.2.3	APLICAÇÃO DA FORÇA $F_x$ .....	32
6.2.4	APLICAÇÃO DA FORÇA $F_y$ .....	32
6.2.5	APLICAÇÃO DO MOMENTO $M_x$ .....	33
6.2.6	APLICAÇÃO DO MOMENTO $M_z$ .....	34
6.2.7	APLICAÇÃO DO MOMENTO $M_y$ .....	34
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>37</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	37
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Muitas são as aplicações de engenharia onde os efeitos aerodinâmicos devem ser analisados e considerados. Nesse contexto é importante utilizar metodologias de análise, teóricas e experimentais, para se quantificar esses efeitos em vista ao escoamento do fluido e sua interação com as estruturas presentes no interior do escoamento (ÉGEA; COIMBRA, 2008). Dentre as diversas aplicações, pode-se citar os esforços provocados pela interação do escoamento com asas e aerofólios, o que é vital para a engenharia aeronáutica e automobilística, pois carros e aviões precisam, progressivamente, ser mais rápidos e gastarem menos combustível.

Os túneis de vento são considerados como uma das mais importantes ferramentas na pesquisa dos fenômenos aerodinâmicos em corpos expostos a escoamentos. Mesmo com o crescente avanço da Dinâmica dos Fluidos Computacional através do aumento da capacidade tecnológica empregada em computadores ao longo dos anos, os túneis de vento ainda desempenham papel fundamental na aquisição de dados durante os experimentos aerodinâmicos, pois não é possível reproduzir computacionalmente, de maneira efetiva, muitas das condições do escoamento, como é o caso da influência da turbulência no escoamento (ÉGEA; COIMBRA, 2008).

Para realizar um teste em túnel de vento é necessário que o mesmo esteja munido de instrumentos de aquisição de dados calibrados e de alta precisão (SOETHE *et al.*, 2011). Vários instrumentos permitem a obtenção das forças e momentos aerodinâmicos, tanto de forma direta quanto indireta. A Balança Aerodinâmica é um desses instrumentos e, durante o ensaio, é responsável por informar quais são os esforços aerodinâmicos que atuam no modelo. Balanças aerodinâmicas frequentemente são confeccionadas por componentes microeletrônicos ou células de carga que permitem, por meio de uma interface computacional, adquirir informações sobre os efeitos do fluxo de ar sobre o modelo no momento do teste (CAIXETA, 2014). Geralmente esses sensores são projetados para medir esforços em dois eixos coordenados, no mínimo, para que sejam medidas, simultaneamente, as forças de arrasto e sustentação.



Com o desenvolvimento de um dispositivo deste tipo, ou seja, que crie parâmetros de comparação em análises fluidodinâmicas espera-se contribuir com as atividades de extensão propostas na universidade, com a formação dos alunos envolvidos e com toda a comunidade acadêmica, que poderá fazer uso deste equipamento em disciplinas no decorrer do curso, bem como, cooperar de forma expressiva com possíveis projetos de pesquisa que venham a ser desenvolvidos por meio de parcerias entre a universidade e empresas.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral e os específicos do trabalho são apresentados a seguir:

### 2.1 OBJETIVO GERAL

- Realizar o projeto de uma balança aerodinâmica

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Abaixo estão listados os objetivos específicos:

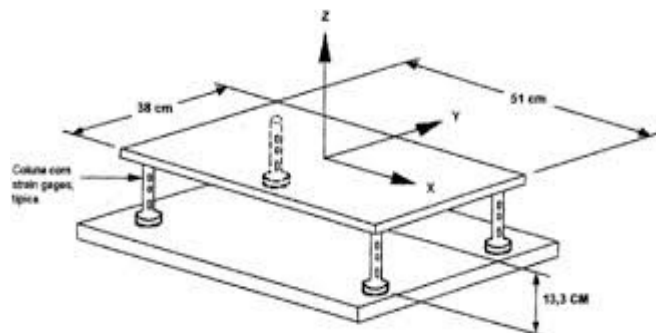
- Estudo de esforços aerodinâmicos em estruturas;
- Desenho detalhado da balança aerodinâmica em software CAD comercial;
- Análise computacional dos esforços na estrutura;
- Análise dos Resultados

### 3 ESTADO DA ARTE

#### 3.1 PLATAFORMA DE FORÇAS

A ideia de medir esforços com uma plataforma de forças não é recente Eftman (1938) construiu uma plataforma para medir os esforços verticais e horizontais do caminhar humano. A balança consistia em uma base fixa por molas que quando solicitadas permitiam um certo deslocamento e, em um ponto fixo próximo a este deslocamento, era realizada a medição do deslocamento permitindo, assim, o cálculo do esforço.

Em 1952, Cunningham e Brown desenvolveram uma plataforma com o emprego de extensômetro como uma forma de medir os esforços, como pode ser observado na Figura 1. A plataforma consistia de uma base de aço e quatro colunas e, em cada coluna, foram colados seis extensômetros que tinham como função medir os esforços nos três eixos. Esta plataforma tinha uma frequência natural muito baixa na direção transversal.

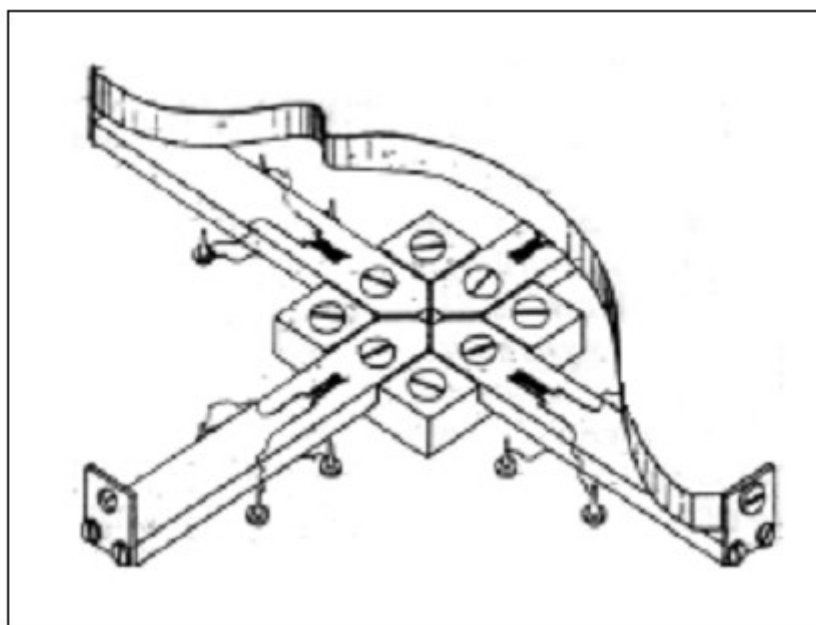


**Figura 1: Plataforma de forças de Cunningham e Brown**  
**Fonte: Cerruti (2003).**

No ano de 1959 surge a primeira plataforma de forças utilizando sensores do tipo transformador linear diferencial variável (LVDT) de funcionamento indutivo. O LVDT é constituído de bobinas e um núcleo interno. O deslocamento do núcleo no interior da bobina induz a circulação de corrente proporcional ao deslocamento.

Greene e Petersen (1964) confeccionou uma plataforma de forças composta por quatro vigas engastadas na forma de cruz, com as extremidades fixas na base e

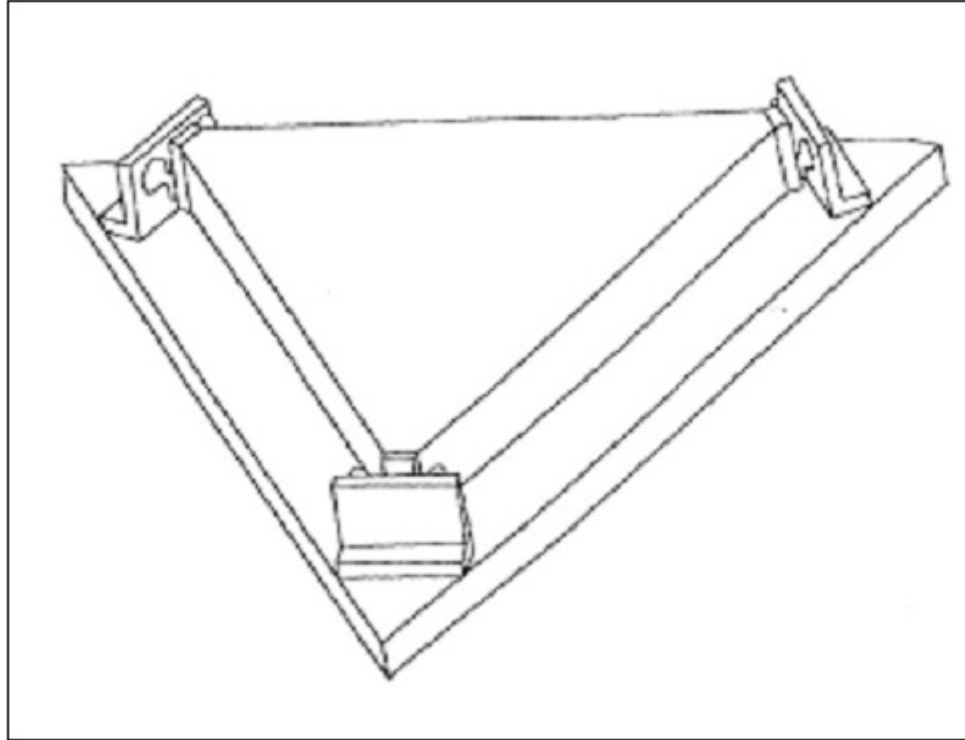
o centro fixo na superfície de contato, ou seja, consiste de uma placa quadrada com os cantos suportados pela extremidade livre de vigas em balanço instrumentadas. Essa plataforma possuía alta linearidade e utilizava ponte de Wheatstone completa. A resposta de saída era independente do ponto de aplicação da carga sobre a superfície de contato. Quanto a desvantagens cita-se o fato de que somente esforços verticais eram mensuráveis. O posicionamento dos strain gauges e o modelo da plataforma podem ser vistos na Figura 2.



**Figura 2 : Plataforma de forças de Petersen**  
**Fonte: Cerruti (2003).**

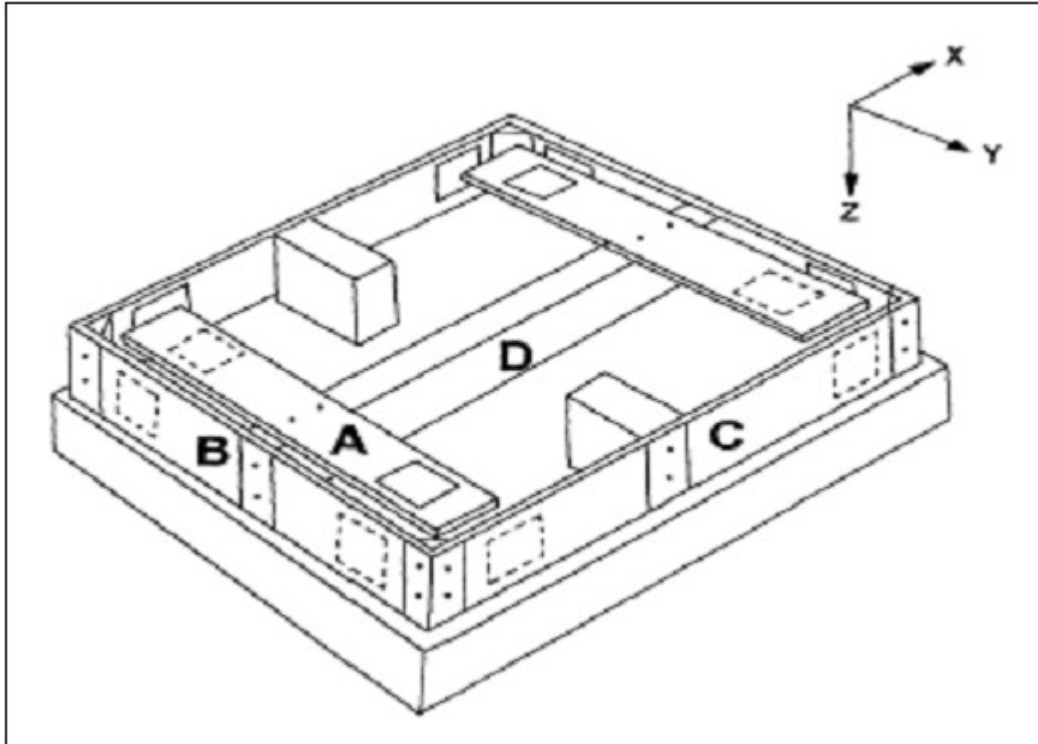
Surgiu, então, um novo conceito de plataforma de forças, em que Gola (1980) mostrou que a plataforma poderia ser suspensa. Nesse projeto, ao invés de a plataforma se apoiar sobre os elementos transdutores, ela é suspensa por eles. Gola classificou as plataformas em dois grupos: plataformas suportadas e plataformas suspensas. Forças e momentos nos três eixos podem ser medidos com esse tipo de plataforma. A grande vantagem desse modelo é que os esforços envolvidos podem ser separados em diferentes eixos, com bastante eficácia. Lâminas são utilizadas para colagem dos extensômetros sem problema de flambagem ou instabilidade dinâmica. Porém, tem-se como desvantagens a dificuldade de fabricação e

alinhamento das estruturas laterais. Essa plataforma é triangular equilátera com 620 mm de lado, conforme observado na Figura 3.



**Figura 3 :Plataforma de força de Gola**  
**Fonte: Cerutti (2003).**

Lywood et al.(1987) construíram uma plataforma de forças para pesquisa e monitoração da postura de pequenos animais. A plataforma media forças nos três eixos ortogonais. Segundo Roesler (1997), para componentes horizontais, este sistema emprega o princípio de transferência dos componentes de forças por meio de um membro não ativo suspenso, relativamente rígido para membros ativos suspensos colocados perpendicularmente ( $F_x$ ) e paralelamente ( $F_y$ ) a esse membro rígido. Assim os membros ativos funcionam como vigas que se deformam no plano vertical. A plataforma é composta por uma base na qual são engastados os blocos "C". Estes são unidos aos elementos "B", que ligam a viga "D" e as barras "A". Nos elementos "A", "B" e "C" são colados os extensômetros para medição dos esforços. Essa plataforma é apresentada na Figura 4, bem como o posicionamento dos strain gauges colados na estrutura.



**Figura 4 : Plataforma de força de Lywood et al.  
Fonte: Lywood et al.(1987).**

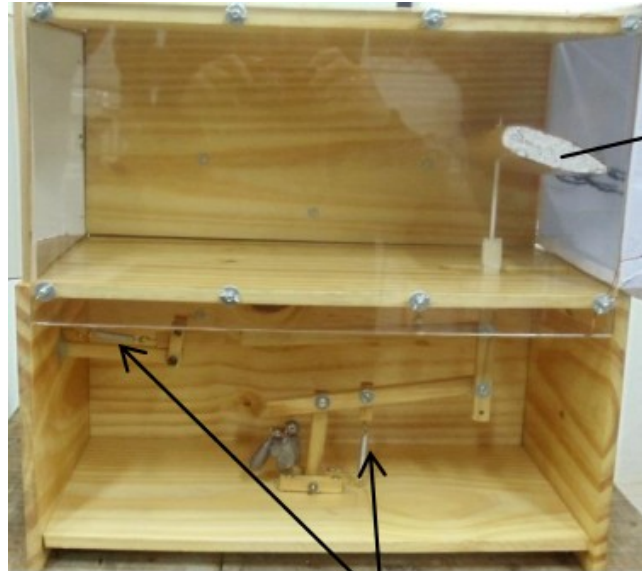
Facilidade de instrumentação, posicionamento dos sensores, saídas individuais para cada variável medida de acordo com as direções preferenciais de deformações e linearidade são algumas das vantagens que podem ser citadas para esse tipo de plataforma de força.

### 3.2 BALANÇAS AERODINÂMICAS

Soethe et al (2011) desenvolveu um protótipo relativamente simples para quantificar esforços aerodinâmicos em túnel de vento que pode ser visto na Figura 5. As deformações das molas, durante o ensaio, possibilitam avaliar quantitativamente parâmetros como arrasto e sustentação na balança. No protótipo, as molas ficaram dispostas perpendiculares entre si, sendo uma afixada na parte inferior da bancada e em uma das hastes, e a outra afixada na parede lateral da bancada, e em outra haste.

Basicamente, durante o funcionamento do túnel de vento, ocorre a aplicação de uma força sobre um modelo, colocado na sessão de testes, devido a passagem de um fluido. Neste caso, o ar, com uma dada velocidade, provoca um deslocamento do objeto que se encontra neste ambiente. Essa variação na sua posição fará com

que as molas sejam deformadas. Com isso, será possível a obtenção de parâmetros dimensionais que ilustrem valores relativos aos esforços aerodinâmicos.



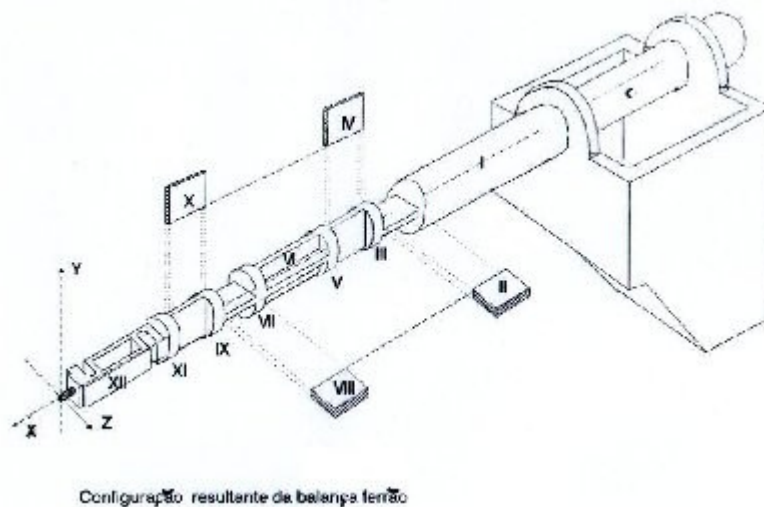
**Figura 5 : Modelagem do protótipo.**  
**Fonte: Soethe et al. (2011).**

Devido à evolução da tecnologia com o acesso a transdutores de forças e a outros métodos de aquisição de dados tornou-se mais fácil realizar estudos envolvendo plataformas de forças. Dessa forma a qualidade das medidas também foi significativamente melhorada.

Pastore (1995) desenvolveu uma balança do tipo Sting, baseada em extensômetros, para um túnel de vento de dimensões relativamente grandes quando comparadas às do túnel de vento em questão. Portanto, o uso da mesma arquitetura de balança significaria o uso de corpos de prova com dimensões superiores àquelas aceitáveis para aos ensaios neste túnel de vento.

A balança do tipo "Sting" é utilizada em ensaios de aerodinâmica em túneis de vento. Este modelo apresenta vantagens perante à disposição tradicional da maioria das balanças que não são desta natureza existente no Brasil. Por permitir o giro total em "roll" acaba criando uma resistência ao fluxo de ar e interferindo nas medições. O nome "Sting" em português significa "ferrão", ou seja, uma barra de aço inserida no interior de modelos, que inicialmente foi projetado para aeronaves, nas medições de forças e momentos aerodinâmicos, devido ao escoamento (atrito do ar) sobre a fuselagem.

A barra tem o formato como mostrado na Figura 6, a qual pode-se ver elementos sensores extensométricos colados, juntamente com fiação. Pode-se observar que a balança tem seções com formato de cruz. O "Sting" ou ferrão serve para todos e quaisquer tipos de veículos a serem testados no túnel de vento. Os extensômetros (strain gauges), colados ao longo da balança, têm a característica de variarem sua resistência elétrica conforme a pressão a eles aplicadas. Uma disposição destas resistências em forma de "Ponte de Wheatstone", permite a medição de mínimas diferenças de potenciais elétricos e, assim, consegue-se avaliar a pressão em diferentes pontos do modelo em teste, e assim sua aerodinâmica. A balança tipo ferrão (sting - compound) presta-se a medir forças e momentos aerodinâmicos, a qual são fixados modelos em tuneis de vento. O momento  $M_x$  (de roll) é medido pela deformação elástica do material no sentido radial.



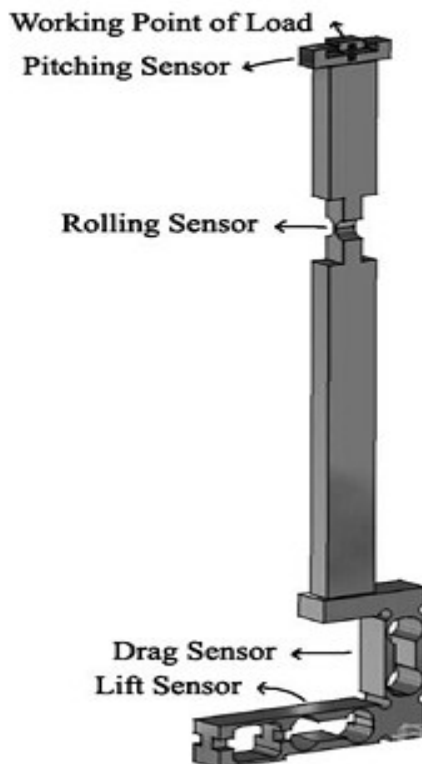
**Figura 6 :Balança Sting proposta por Pastore  
Fonte: Pastore (1995).**

Suhariyono et al (2005) desenvolveu uma balança aerodinâmica para mensurar as características de micro veículos aéreos. Os MAVs são muito pequenos e operam a um baixo número de Reynolds, assim os esforços aerodinâmicos a serem medidos nessas estruturas são de valor baixo e por isso é necessário um dispositivo de alta precisão.

A balança é composta por 4 sensores: um sensor para medir a força de arrasto, o sensor para medir a força de empuxo, um sensor para medir o momento de rolagem e um sensor para medir o momento de arfagem. Além disso, a balança



pode produzir mudança no ângulo de ataque de 10 graus ate 40 graus em intervalos de 2 graus. A configuração da balança e a posição dos sensores podem ser vistos na Figura 7.



**Figura 7: A balança aerodinâmica e a posição dos sensores**  
Fonte: Suhariyono et al (2005)

Analisando os estudos mencionados neste capítulo, observa-se que os critérios para o desenvolvimento de plataformas de forças para túneis de vento ou biomecânicas são os mesmos. Desse modo, segue abaixo os critérios utilizados na seleção da balança aerodinâmica .

## 4 CRITÉRIOS DE PROJETO E ESCOLHA DA PLATAFORMA DE FORÇAS

### 4.1.1 Componentes de Forças Medidas

Cada sistema, conforme suas necessidades, requer um certo grau de componentes a serem medidas, que podem ser forças ou momentos no sentido dos 3 eixos coordenados:  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ . Para aplicações em túnel de vento é interessante que a plataforma seja capaz de medir esses seis componentes .

### 4.1.2 Precisão do Sistema – Sensibilidade

A precisão da plataforma de forças depende da aplicação a que esta se destina. A fim de evitar a destruição em estradas de rodagem, os responsáveis pelo trânsito fazem eventualmente verificações na quantidade de peso que veículos de carga transportam. Para tanto se utilizam de balanças que medem a componente da força vertical dos veículos. Sabendo que o peso destes veículos fica na casa das centenas de kN, não seria interessante e nem viável (construtiva e economicamente) projetar-se um sistema capaz de medir com precisão de décimos de N.

No caso de balanças projetadas para túnel de vento, a magnitude de forças medidas se encontra na faixa de 500 N a 600 N, de forma que uma precisão de 5 N se torna bastante razoável (CERRUTI, 2003).

### 4.1.3 Frequência Natural

A frequência fundamental ou natural da balança deve ser muito maior que a máxima frequência medida, a fim de evitar que uma parte do sinal lido seja amplificada pelo sistema mecânico, quando se tratar de análises dinâmicas (CERRUTI, 2003).

Levando em consideração o fato de que quanto mais rígida for a estrutura mais alta será sua frequência natural, para reduzir efeitos dinâmicos é interessante elevar ao máximo a rigidez da balança.

O ideal seria a balança possuir grande sensibilidade e grande rigidez, proporcionando medições bastante fiéis à excitação. Desde já fica evidenciado uma contradição entre boas condições de sensibilidade e frequência natural. Uma vez que estas duas grandezas são inversamente proporcionais, a condição ideal não é realizável. Assim, na prática, trabalha-se com essas variáveis até atingir-se um ponto ótimo, adequado à utilização desejada (CERRUTI, 2003).

#### 4.1.4 Desacoplamento entre Componentes de Força e Momentos

O carregamento em um eixo não pode ocasionar distorções no carregamento de outro eixo. Chamado de interferência entre componentes (cross talk), o acoplamento de forças e momentos deve ser minimizado pelo projeto mecânico cuidadoso. Pode-se, inclusive, também desacoplar os esforços numericamente, com o auxílio de um programa computacional, no pós-processamento do sinal (CERRUTI, 2003).

#### 4.1.5 Independência das condições externas

A independência de fatores externos como temperatura, pressão e umidade é obtida através de um projeto mecânico e elétrico cuidadoso. Se entende neste critério que a temperatura externa, ou suas variações, por exemplo, não devem interferir no resultado das medições.

### 4.2 Escolha da Plataforma de Forças

Dentre os vários tipos de plataformas de forças apresentados na revisão bibliográfica e compatíveis com extensômetros, o modelo escolhido para ser desenvolvido neste trabalho é o de Lywood et al (figura 3) A justificativa para esta escolha reside nos seguintes fatos:

- Sistema mecânico simples de ser construído;

- Apresenta baixo acoplamento entre os diferentes eixos;
- Pode ser facilmente modelado computacionalmente;
- Cada componente é medida por uma ponte de wheatstone completa e independente, isto é, a medição de uma direção específica é feita através de uma única ponte, evitando operações analíticas entre as saídas de cada conjunto de sensores

## 5 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

### 5.1 Esforços Aerodinâmicos

A aerodinâmica é o estudo do movimento de fluidos gasosos, relativo às suas propriedades e características, e às forças que exercem em corpos sólidos neles imersos.(RODRIGUEZ,2013) De uma forma geral a aerodinâmica, como ciência específica, só passou a ganhar importância industrial com o surgimento dos aviões e dos automóveis pois estes precisavam se locomover tendo o menor atrito possível com o ar pois assim seriam mais rápidos e gastariam menos combustível. O estudo dos fenômenos que envolvem a aerodinâmica é de fundamental importância para o projeto global da aeronave, pois muitos aspectos estudados para se definir a melhor configuração aerodinâmica da aeronave serão amplamente utilizados para uma melhor análise de desempenho e estabilidade da aeronave. Esses aspectos também serão utilizados para o cálculo estrutural da aeronave, uma vez que existem muitas soluções entre um bom projeto aerodinâmico e um excelente projeto total da aeronave.(RODRIGUEZ,2013) . A determinação das forças e momentos que atuam num corpo em vôo é uma tarefa possível, porém difícil do ponto de vista prático. Isso é feito em túneis de vento e as medidas lidas têm o propósito de obter forças e momentos produzidos somente pela ação do escoamento sobre o corpo, isto é, obter a força e o escoamento aerodinâmico.

Tais medidas são obtidas em modelos em escala e tornam possível estimar as cargas aerodinâmicas que vão atuar no avião (escala real), auxiliando no cálculo estrutural e na previsão do desempenho do mesmo.

Há duas categorias de cargas atuando num avião em vôo, ou num modelo em túnel de vento: cargas estáticas e cargas dinâmicas. As cargas estáticas são aquelas resultantes da ação de um escoamento estacionário sobre o corpo e as dinâmicas são aquelas resultantes da ação de um escoamento não-estacionário. Por exemplo, em um túnel de vento onde o escoamento é uniforme na seção de ensaio, o modelo sofrerá uma carga estática se ele estiver com alinhamento fixo em relação ao escoamento, isto é, os ângulos de ataque, derrapagem e rolamento forem constantes. Caso contrário, se um dos ângulos varia o modelo será submetido a um carregamento dinâmico. (ÉGEA; COIMBRA, 2008)

A determinação dos esforços aerodinâmicos pode ser feita através da medida de pressão em pontos da superfície do modelo, mas esse é um método muito menos preciso e confiável do que aquele que utiliza balanças para túnel de vento. As balanças para túnel de vento devem medir não só forças aerodinâmicas cuja direção e ponto de aplicação são conhecidos, mas também momentos aerodinâmicos. A principal característica de uma balança usada em túnel de vento é o número de componentes, de um determinado esforço, capaz de ser medido pelo uso da mesma. Pode-se ter balanças de 1 a 6 componentes dependendo do ensaio que se queira fazer. Por exemplo, em um ensaio em que se deseja obter arrasto produzido pelo escoamento em torno de um míssil, uma balança de um componente para medida de arrasto é suficiente. No caso de um avião em vôo, faz-se necessário o uso de uma balança de seis componentes que meça sustentação, arrasto, força lateral, momento de arfagem, momento de guinada e momento de rolagem. (ÉGEA; COIMBRA, 2008)

## 5.2 Túnel de Vento

Os túneis de vento são ferramentas de estudo que simulam um escoamento de ar em laboratório sob condições controladas. O túnel de vento pode ser considerado como uma das mais importantes ferramentas nas pesquisas de fenômenos aerodinâmicos em corpos expostos a escoamentos. É usado em novos tipos de ensaios aerodinâmicos uma vez que muito ainda não se consegue produzir efetivamente em simulações realizadas por computadores.

Ao realizar um teste de túnel de vento faz-se necessário ter como principais preocupações: a simulação das condições requeridas de escoamento do ar e a aquisição de dados durante os experimentos, para isso, deve-se ter presente instrumentos devidamente calibrados, que imprimam confiabilidade metrológica aos resultados. (CAIXETA, 2014)

Em relação ao formato, um túnel de vento pode ser dividido em três categorias: Circuito Aberto, que geralmente possui um ventilador em uma extremidade e é aberto na outra, Circuito Fechado, que o ar circula dentro dele sem contato com a atmosfera, o que faz com que o túnel necessite de menos energia para movimentar o fluido, e o Túnel Semifechado, que é uma mistura dos dois

anteriores, esse tipo de túnel necessita de menos força do motor que o modelo aberto e é menos complicado de construir do que o modelo fechado. (CAIXETA, 2014)

Os túneis de vento também são categorizados com relação a velocidade do ar na seção de teste. Túneis subsônicos, são túneis em que a velocidade de trabalho do fluxo de ar é bem abaixo da velocidade supersônica que é 340 m/s a 1 atm. Túneis de vento transônicos são capazes de chegar a velocidades bastante próximas da velocidade do som. Túneis supersônicos, operam em velocidades acima da velocidade do som. Existem, ainda, túneis classificados como hipersônicos, que possuem velocidade de até 15 vezes a velocidade do som. (CAIXETA, 2014)

A seção de testes de um túnel de vento é a região onde os modelos são posicionados para os ensaios, normalmente construída de forma que não perturbe o escoamento, enquanto possibilita a visualização do teste e o manuseio do modelo. A geometria da seção, pode variar de acordo com o objetivo do túnel, normalmente, adoçamentos nos cantos com filetes são usados para minimizar os efeitos de borda. Esse tipo de túnel é muito comum na indústria aeronáutica, pois a maioria dos aviões operam próximos a essa velocidade. (CAIXETA, 2014)

Com a assistência de um túnel de vento é possível simular e investigar como é 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, ainda, ser dotado de equipamentos adicionais tais como:

- Força de tração – dinamômetro;
- Fluxo de ar quente – boiler;
- Umidade – gerador de vapor;

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.

Existem várias técnicas para a visualização do padrão de escoamento sobre o corpo do veículo, quais sejam: a disposição de vários tufo de lã sobre a superfície do modelo; aplicação de um filme de óleo contendo pigmentos coloridos ou luminescentes, sobre a superfície; gerar fios de fumaça usando um gerador de fumaça, que torna visível os padrões de escoamento mesmo em fluxos separados, sendo a técnica mais comum para a visualização do fluxo de ar; existe, também, o uso do laser, em que o feixe pode percorrer toda a superfície do veículo; ademais tem-se uso de gerador 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.

### 5.3 Transdutores de força

Transdutores são dispositivos que, quando excitados por força, fornecem uma resposta (saída) proporcional à excitação (entrada). A grandeza que se quer medir, no caso a força, é processada pelo transdutor que a transforma em uma grandeza de outra natureza. São equipamentos eletromecânicos que medem cargas estáticas ou dinâmicas nas situações que não ocorrem grandes deslocamentos, e as convertem em sinais elétricos para posterior análise. (ROESLER, 2013)

O princípio de funcionamento dos transdutores de força ou carga é baseado na deformação que sofre o material quando submetido à aplicação de uma força. Ou seja, por meio de materiais como strain gauges, dispostos em um pequeno conjunto mecânico, mede-se a deformação, convertendo o sinal elétrico em força ou carga. Outra definição similar foi estabelecida por Dally (1993): “Transdutores são dispositivos eletromecânicos que convertem uma alteração mecânica, como deslocamento ou força, em uma alteração em um sinal elétrico que pode ser monitorado depois de um apropriado condicionamento”. A Figura 8 apresenta esquematicamente o funcionamento de um transdutor de forças.



O elemento elástico de um transdutor extensométrico pode estar simultaneamente sob a ação de grandezas mecânicas, efeitos de temperatura e perturbações diversas, provocando cada uma dessas ações deformações em pontos da superfície do elemento elástico. Os valores dessas deformações superficiais dependem do ponto considerado sobre o elemento elástico e da orientação considerada sobre a superfície do elemento elástico (TOSO *et al.*, 2013).

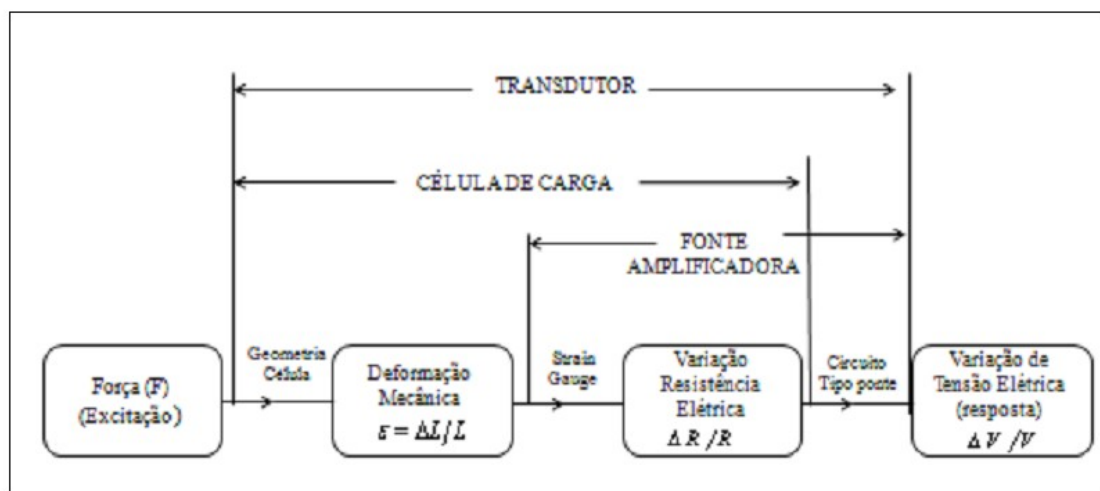


Figura 8: Diagrama simplificado de um transdutor de força utilizando extensômetros  
Fonte: Roesler (1997).

Na prática, a orientação da deformação será definida pela orientação da grade dos extensômetros, o qual medirá uma deformação média que estará ocorrendo sobre a superfície na qual ele está colado.

### 5.3.1 Características gerais dos transdutores

Em geral, deseja-se que os transdutores mecânicos de força possuam: (i) elevada rigidez mecânica; (ii) boa linearidade; (iii) baixa histerese; (iv) boa capacidade de repetição; (v) alta sensibilidade com boa resolução; (vi) trabalho em condições adversas.

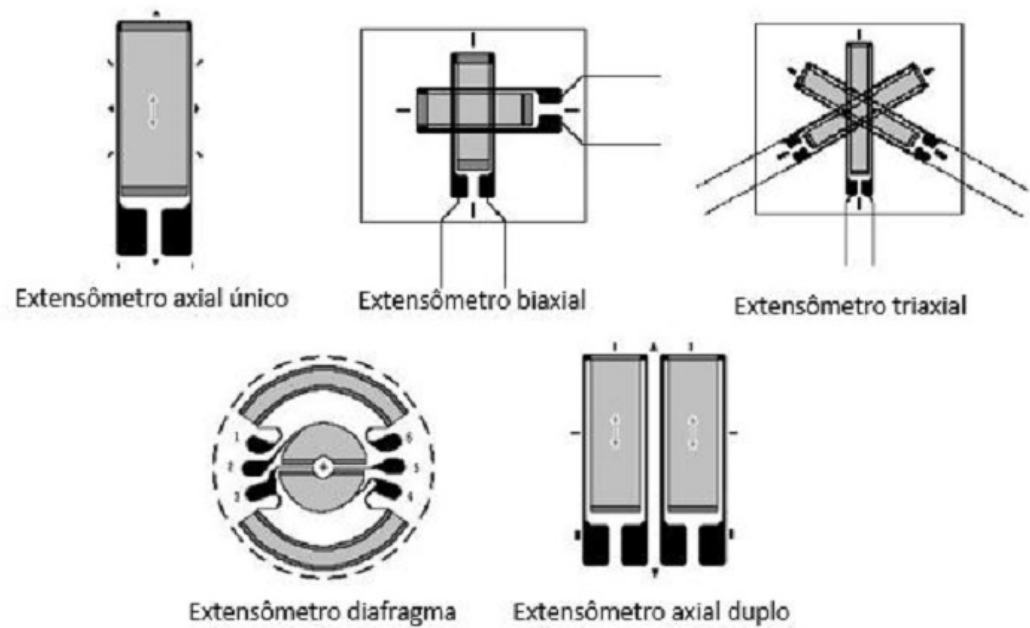
- **Rigidez mecânica:** a rigidez de uma estrutura é a medida de como essa estrutura se distorce pela ação de cargas atuando sobre ela;
- **Linearidade:** é a aproximação com a qual uma curva de calibração acompanha uma reta ideal;

- **Histerese:** é a tendência de um material ou sistema de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou. É definida como a máxima diferença entre as saídas lidas para a mesma carga aplicada, uma leitura sendo realizada com o aumento da carga de zero ao valor máximo e outra leitura pela diminuição desse valor máximo até zero;
- **Repetibilidade:** é a diferença máxima entre os sinais de saída para aplicações de uma mesma grandeza em iguais condições ambientais e de aplicação de grandeza;
- **Sensibilidade:** é a variação da resposta do transdutor de medição dividida pela correspondente variação de seu estímulo. É restringida pela rigidez necessária mínima para manter as tensões máximas e a frequência fundamental da estrutura dentro de limites admissíveis, assim como a linearidade desejável.

### 5.3.2 Extensômetro

Extensômetro significa sensor de deformação. No presente trabalho, serão utilizados extensômetros de resistência elétrica, que medem deformações através da variação da resistência elétrica, alguns modelos podem ser visualizados na Figura 9.

Utilizado com sucesso desde a segunda guerra mundial em diferentes áreas da engenharia, o extensômetro de resistência elétrica, ou strain gage, é um sensor capaz de medir deformações mecânicas relativas localizadas com grande precisão. Tem como vantagem sua utilização em locais de difícil acesso, como por exemplo na asa de um avião em voo, peças internas de equipamentos e medições dinâmicas em geral. (CAIXETA, 2014)



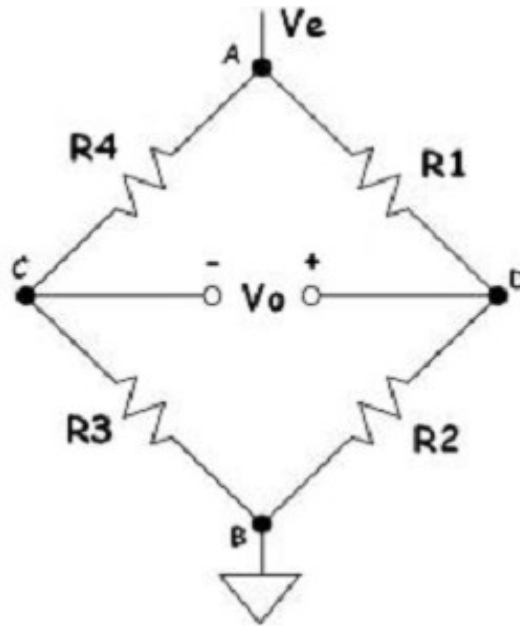
**Figura 9: Extensômetros de resistência elétrica**  
**Fonte: Caixeta(2014)**

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.

### 5.2.3 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, como ilustrado na Figura 10



**Figura10: Ponte de Wheatstone**  
**Fonte: Caixeta (2014)**

A ponte de Wheatstone consiste em quatro resistores montados, de acordo com a Figura 10, submetidos a uma tensão de excitação  $V_e$ , que gera uma tensão de saída  $V_o$ , entre os pontos C e D.

Dois resistores montados em série são divisores de tensão, dessa forma, a corrente que passa por eles é idêntica. Quando montados em paralelo, a tensão a que estão submetidos, é a mesma, enquanto, a corrente que passa por cada um, varia. Dessa forma, aplicando o divisor de tensão, percebe-se que  $V_o$  é função da tensão de excitação e dos resistores da ponte.

No caso da extensometria, em uma barra submetida a flexão, a ponte de Wheatstone pode ser montada em várias configurações, de acordo com o número de extensômetros ativos. O mais utilizado, por garantir maior sensibilidade à medição, é o circuito de ponte completa. O circuito de ponte completa possui quatro sensores ativos como pode ser visto na Figura 11.

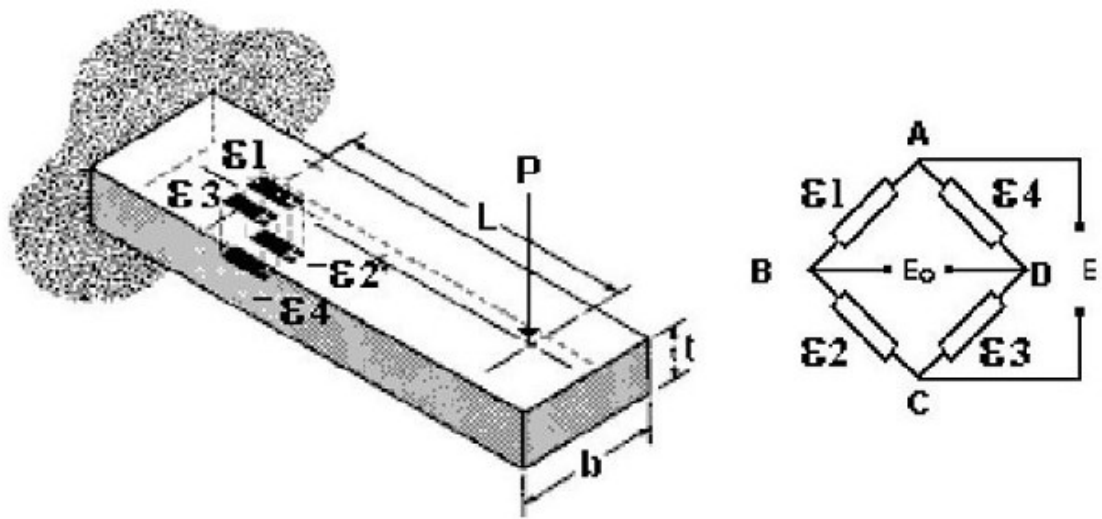


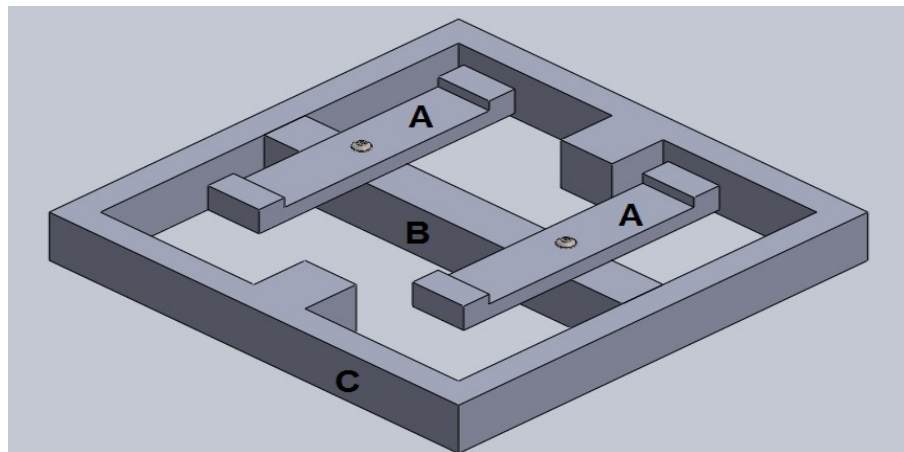
Figura 11: Circuito de Ponte Completa  
Fonte: Caixeta (2014)

## 6. ANÁLISE COMPUTACIONAL DA BALANÇA AERODINÂMICA

Este capítulo aborda a análise computacional da plataforma escolhida. O programa computacional utilizado para fazer a modelagem e a simulação da balança sob o efeito de esforços foi o SolidWorks 2013.

### 6.1 Modelagem da Balança Aerodinâmica

Na Figura 12 pode ser observado o modelo computacional da balança selecionada.



**Figura 12: Balança Aerodinâmica**  
**Fonte: Autoria Própria.**

As seções das barras mostradas na figura acima são:

- Barra A –  $14 \times 6 \text{ mm}^2$
- Barra B –  $20 \times 16 \text{ mm}^2$
- Barra C –  $10 \times 20 \text{ mm}^2$

O comprimento externo do quadro formado pelas barras C é de 160 mm. As barras A são fixadas à barra B por meio de dois parafusos, engastando uma à outra.

## 6.2 Determinação das Posições de Colagem dos Extensômetros

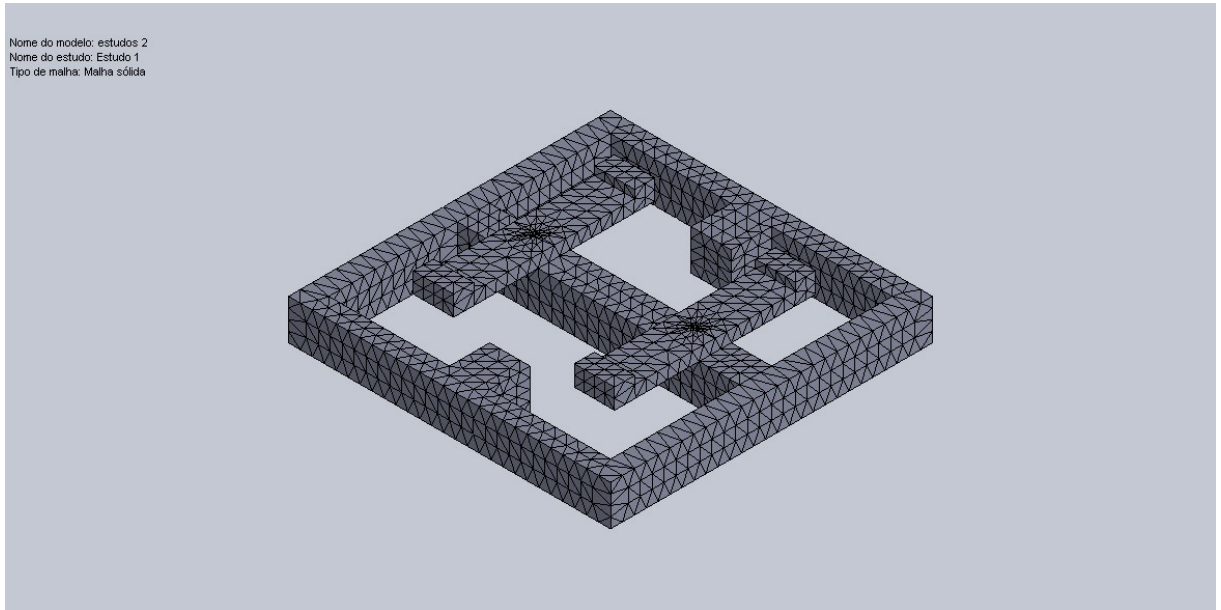
Para determinar a posição mais efetiva para cada conjunto de extensômetros, foram realizadas seis simulações com a balança modelada no SolidWorks Simulation. Em cada simulação buscou-se verificar o local em que a estrutura da balança tinha sua deformação máxima ao ser submetida a determinado esforço.

Foram utilizados para a simulação os seguintes parâmetros:

- O material da balança é de Aço Inox forjado. Este material apresenta Módulo de Elasticidade de 200GPa.
- O modelo estudado foi tratado como corpo sólido e a malha gerada pelo o estudo também é sólida.
- Os ressaltos do quadro formado pelas barras C estão fixos à base onde a balança será posicionada.
- No caso de balanças projetadas para túnel de vento, a magnitude de forças medidas se encontra na faixa de 500 N a 600 N, assim os esforços aplicados em cada simulação se encontrarão nessa faixa.

### 6.2.1 Informações da malha

Na figura 13 abaixo pode ser observado a malha sólida gerada durante a simulação pelo SolidWorks Simulation. Essa malha possui um total de 16728 nós e um total de 9533 elementos.

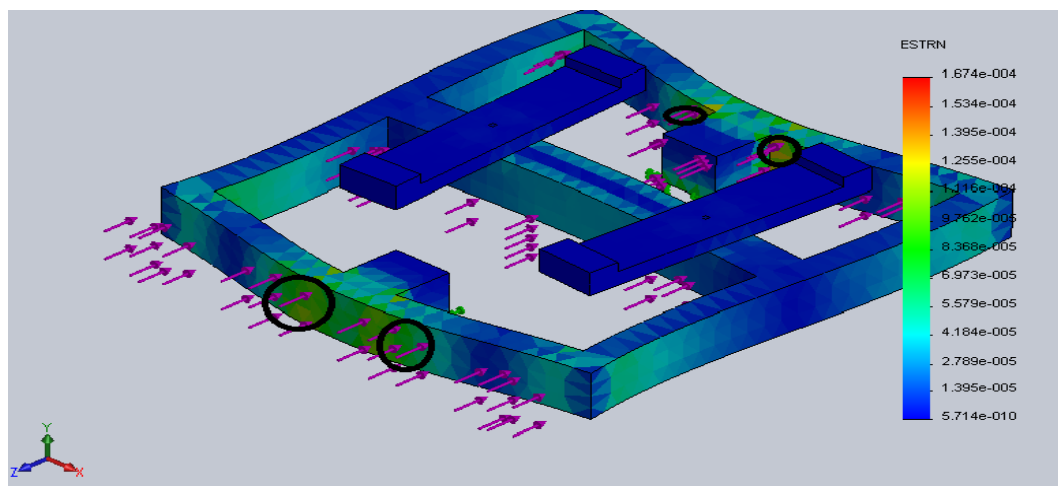


**Figura 13: Malha Sólida**

Fonte: Autoria Própria.

### 6.2.2 Aplicação da Força $F_z$

Ao aplicar uma força de 500 N na direção do eixo z, o modelo demonstrou o seguinte estado de deformação mostrado na Figura 13.



**Figura 14: Balança Deformada Pelo o Esforço  $F_z$**

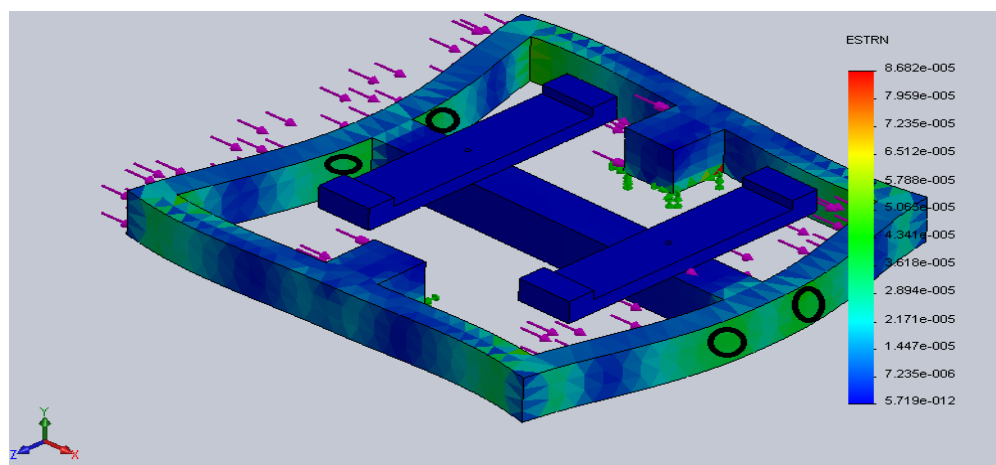
Fonte: Autoria Própria.



Podem ser observados na ilustração os pontos onde a deformação é máxima. O conjunto de extensômetros para a medição da força  $F_z$  podem ser instalados nesses pontos.

### 6.2.3 Aplicação da Força $F_x$

Ao aplicar uma força de 500 N na direção do eixo x, o modelo demonstrou o seguinte estado de deformação mostrado na Figura 14.



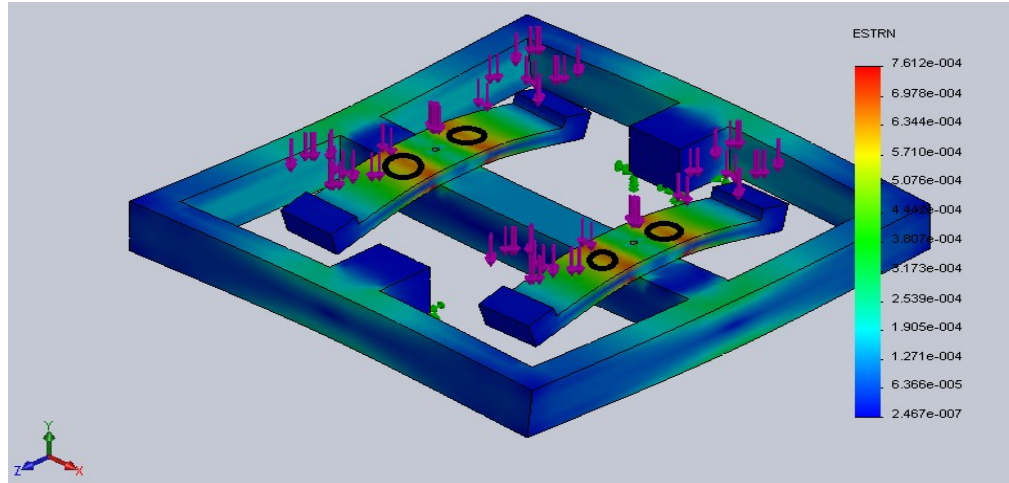
**Figura 15: Balança Deformada Pelo o Esforço  $F_x$**

**Fonte: Autoria Própria.**

Podem ser observados na ilustração os pontos onde a deformação é máxima. O conjunto de extensômetros para a medição da força  $F_x$  podem ser instalados nesses pontos.

### 6.2.4 Aplicação da Força $F_y$

Ao aplicar uma força de 500 N na direção do eixo y, o modelo demonstrou o seguinte estado de deformação mostrado na Figura 15.

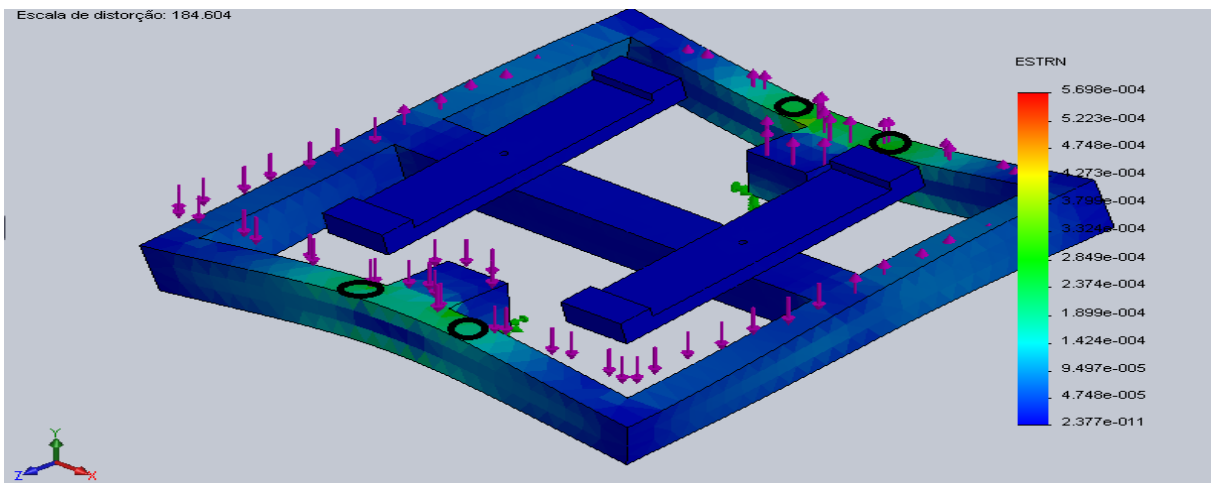


**Figura 16: Balança Deformada Pelo o Esforço  $F_y$**   
**Fonte: Autoria Própria.**

Podem ser observados na ilustração os pontos onde a deformação é máxima. O conjunto de extensômetros para a medição da força  $F_x$  podem ser instalados nesses pontos.

#### 6.2.5 Aplicação do Momento $M_x$

Ao aplicar um momento de 500 N.m na direção do eixo x, o modelo demonstrou o seguinte estado de deformação mostrado na Figura 16

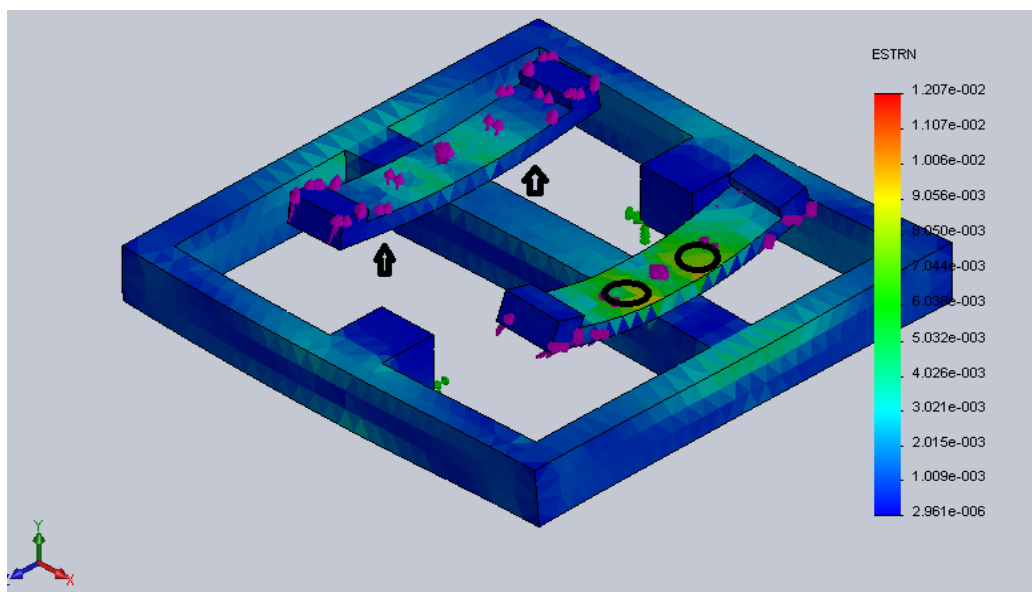


**Figura 17: Balança Deformada Pelo o Esforço  $M_x$**   
**Fonte: Autoria Própria.**

Podem ser observados na ilustração os pontos onde a deformação é máxima. O conjunto de extensômetros para a medição da força  $M_x$  podem ser instalados nesses pontos.

#### 6.2.6 Aplicação do Momento $M_z$

Ao aplicar um momento de 500 N.m na direção do eixo z, o modelo demonstrou o seguinte estado de deformação mostrado na Figura 17

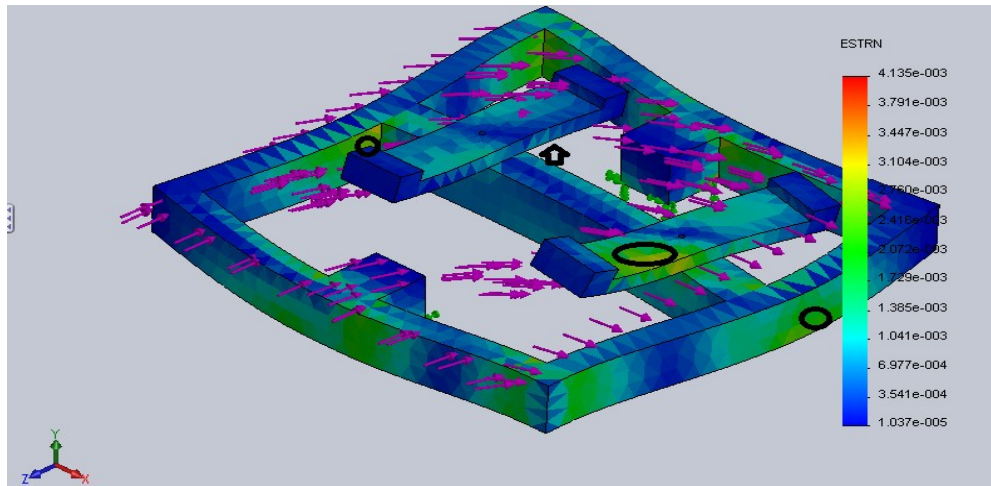


**Figura 18: Balança Deformada Pelo o Esforço  $M_z$**   
**Fonte: Autoria Própria.**

Podem ser observados na ilustração os pontos onde a deformação é máxima. O conjunto de extensômetros para a medição da força  $M_z$  podem ser instalados nesses pontos. As flechas pretas mostram os pontos de instalação dos extensômetros que não estão visíveis na figura.

#### 6.2.7 Aplicação do Momento $M_y$

Ao aplicar um momento de 500 N.m na direção do eixo y, o modelo demonstrou o seguinte estado de deformação mostrado na Figura 18

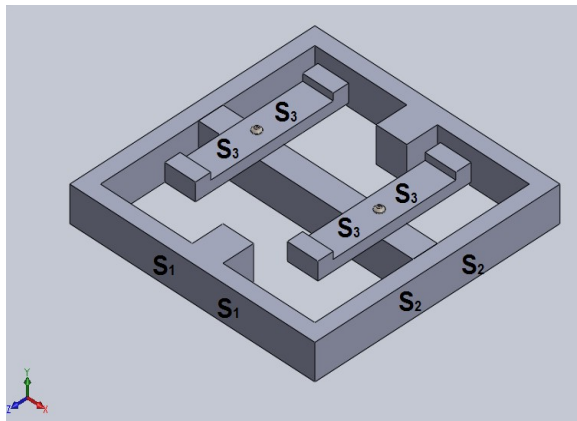


**Figura 19: Balança Deformada Pelo o Esforço  $M_y$**   
**Fonte: Autoria Própria.**

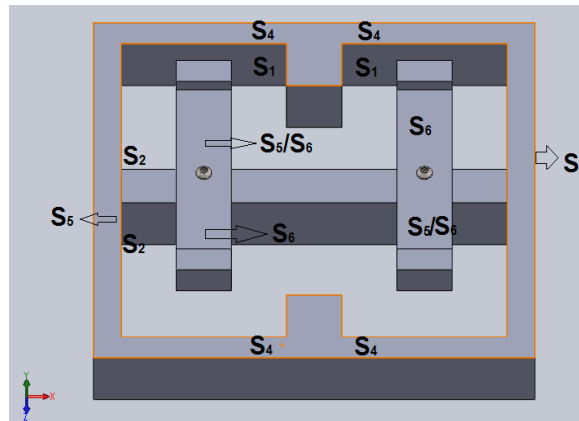
Podem ser observados na ilustração os pontos onde a deformação é máxima. O conjunto de extensômetros para a medição da força  $M_y$  podem ser instalados nesses pontos. As flechas pretas indicam que os locais apontados não se encontram visíveis na figura.

#### 6.2.8 Posicionamento dos Extensômetros

A configuração do modelo computacional da balança aerodinâmica com o posicionamento dos extensômetros podem ser vistos nas figuras 19 e 20.



**Figura 20: Posicionamento dos Extensômetros**  
**Fonte: Autoria Própria.**



**Figura 21: Posicionamento dos extensômetros**  
**Fonte: Autoria Própria.**

## 6 CONCLUSÃO

Os objetivos propostos neste trabalho de conclusão de curso foram alcançados.

Primeiramente realizou-se uma revisão bibliográfica afim de escolher o melhor modelo de plataforma de forças para uso no túnel de vento do Laboratório de Dinâmica dos Fluídos da UTFPR Cornélio Procópio.

O modelo escolhido foi modelado computacionalmente através do software SolidWorks 2013 e em seguida realizou-se sucessivas simulações do modelo no SolidWorks Simulation, determinando os pontos de máxima deformação onde serão instalados os extensômetros na plataforma de forças.

### 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros, a seguir estão listadas algumas possibilidades que podem ser realizadas:

- Construção da Balança Aerodinâmica;
- Condicionamento do sinal dos extensômetros;
- Calibração e Validação da Balança Aerodinâmica como instrumento de medida de esforços em Túnel de Vento.

## REFERÊNCIAS

- CAIXETA, L. G. R. **Investigação Experimental de Esforços Aerodinâmicos em Retrovisores Automotivos**. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso- Engenharia Automotiva, Universidade de Brasília: Brasília, 2014.
- CERRUTI, M. V. **Desenvolvimento de um Sistema para Medição do Carregamento Devido ao Vento em Edificações Alteadas**. 2003. 75 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.
- DALLY, J. W.; RILEY, W. F.; MCCONNELL, K. G. **Instrumentation for Engineering Measurements**. 2. edição. Iowa: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- ÉGEA, F. S. O.; COIMBRA, R. F. F. **Projeto de uma Balança Aerodinâmica para o Túnel de Vento Subsônico da FEAU**. Universidade do Vale do Paraíba, 2008.
- LYWOOD, D. W.; ADAMS, D. J.; VAN EYKEN, A.; MACPHERSON, J. M. **Small, Triaxial Force Plate**. Med.& Biol, Eng & Comp. 1987
- PASTORE, P.L. **Desenvolvimento de uma Balança tipo Ferrão para Medições de Forças e Momentos Aerodinâmicos**. 1995. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.
- RODRIGUEZ, L. E. M. J. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica - Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign**. 1. ed. São Paulo, SP. 2013
- ROESLER, H. **Desenvolvimento de plataforma subaquática para medições de forças e momentos nos três eixos coordenados para utilização em biomecânica**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- SOETHE, V. L.; QUADROS, H. B.; REJAS, P. E. B.; LINEMBURG, H. F.; BUSNARDO, E. R.; PIRES, M. C.; DIRCKSEN, J. H. S.; BACKES, B.; DEMBOSKI, F. R. **Projeto de Construção de uma Balança Aerodinâmica**. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE). 2011.
- SUHARYONO, A.; HYUN KIM, J.; SEO GOO, N.; PARK, H. C.; JOON YOON, K. **Design of precision balance and aerodynamic characteristic measurement system for micro aerial vehicles**. Aerospace Science and Technology. 2005.