



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
*August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil*

## BALANÇA AERODINÂMICA DE PRINCÍPIO ELETROMECAÂNICO PARA INSTRUMENTAÇÃO EM TÚNEL DE VENTO

**Ribeiro, Fernanda Alves, ladha\_ar@yahoo.com.br<sup>1</sup>**  
**Lima, Rudson de Souza, rudsonsouza@yahoo.com.br<sup>1</sup>**  
**Ford, Elmo Thiago Lins Cöuras, courasreich@hotmail.com<sup>1</sup>**  
**Mendes, José Ubiragi de Lima, ubiragi@ct.ufrn.br<sup>1</sup>**

UFRN - Centro de Tecnologia- Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal do Rio G. Norte  
Caixa Postal 1524 - Campus Universitário, Lagoa Nova  
CEP 59072-970 Natal - RN – Brasil

***Resumo:** Balanças aerodinâmicas são empregadas para a determinação das cargas aerodinâmicas atuantes nos modelos ensaiados em túnel de vento; sendo seus resultados, devido a sua confiabilidade, em muitas situações utilizados como base de comparação frente aos de outros métodos como os da variação da quantidade de movimento e da integração do campo de pressão. Neste projeto desenvolveu-se um modelo de balança aerodinâmica cujo princípio de funcionamento é baseado na deformação mecânica das molas e os ajustes e posicionamentos necessários são feitos automaticamente a partir de acionamento elétrico integrado. Com isto, trabalha-se com um modelo alternativo, de medição simples e direta, sem interferência do operador e de baixo custo, para a determinação de grandezas como a resistência aerodinâmica e a sustentação.*

***Palavras-chave:** Balança Aerodinâmica; Arrasto; Sustentação*

### 1. INTRODUÇÃO

Ensaio realizados em túneis de vento são indispensáveis no desenvolvimento de projetos de aeronaves, sendo triviais para avaliação prévia do desempenho do modelo ou perfil. Não somente na indústria aeronáutica, mas também na automobilística, a determinação dos parâmetros aerodinâmicos em ensaio de túnel aerodinâmico é exigida para a comprovação da segurança.

Neste contexto, as balanças aerodinâmicas desempenham seu protagonismo sendo empregadas para medição das cargas (forças e momentos) atuantes nos modelos sob teste.

São muitos os modelos de balança disponíveis; contudo, há ainda muita pesquisa para seus aperfeiçoamentos e desenvolvimento de novos modelos. Dentre as balanças mais comuns estão as baseadas no princípio das células de carga: os extensômetros (strain gages) 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, com isto, sua aerodinâmica. Outros modelos também disponíveis na literatura são as balança Sting; a baseada na Viga de Cantilever; a de bloco; a de três pontos; dentre outras.

Neste projeto foi proposto um modelo de balança cujo funcionamento se constitui no uso da deformação mecânica de molas, caracterizando uma balança genuinamente mecânica.

### 2. DESENVOLVIMENTO

#### 2.1. Revisão Literária

Um corpo de qualquer forma, quando imerso em um fluido em escoamento, fica sujeito a forças e momentos (White, 2002). Estas forças são três: o arrasto, que age numa direção paralela à direção da corrente livre, e duas forças de sustentação, que agem em direções ortogonais.

Em termos gerais, a interação fluido-corpo é descrita por forças de superfície (contato) associadas às tensões tangenciais (cisalhamento) e às tensões normais, que se identificam com a distribuição de pressões sobre a mesma. A integração da distribuição das tensões de cisalhamento e das pressões somadas resultará na Força Resultante, com componentes de arrasto e de sustentação.

Segundo Assy (2004), o Arrasto é uma força aerodinâmica que impõem resistência ao movimento de um corpo para diante. A forma do corpo aumenta a força de arrasto. Aos corpos fabricados com formas destinadas a produzir o mínimo possível de arrasto dão-se o nome de aerodinâmicos. A indústria aeronáutica desenha os aviões de modo a reduzir ao mínimo o arrasto. Os aviões construídos segundo esses princípios precisam de motores menos potentes para voar, e a redução do arrasto também melhora o desempenho do avião. Outros meios de transporte também estão sujeitos ao arrasto.

A Sustentação é uma força aerodinâmica produzida pelo movimento de um aerofólio “asa” através do ar. A sustentação dá a um aeroplano a capacidade de subir no ar e aí se manter durante o vôo. Um aerofólio que se move no ar produz a sustentação porque exerce em sua superfície inferior uma pressão maior do que na superfície superior. Um aerofólio cria essa diferença de pressão por causa de sua forma especial, chamada curvatura, e da deflexão (desvio) do ar. A quantidade de sustentação produzida por uma asa depende em parte de seu ângulo de ataque e de seus dispositivos de alta sustentação (ASSY, 2004).

O ângulo de ataque, formado entre a corda da asa e a direção do fluxo de ar relativo, desempenha importante papel na segurança de vôo, haja visto que tem grande influência na determinação da sustentação. Ele varia na medida em que haja mudança na atitude da aeronave, sendo em função dele as primeiras considerações quando se projeta um aerofólio (em um aerofólio projetado adequadamente, a sustentação é aumentada na medida em que o ângulo de ataque aumenta). Quando um ângulo de ataque é aumentado gradativamente para um ângulo positivo, o componente da sustentação aumenta rapidamente até um certo ponto, e, então, repentinamente começa a diminuir. Durante essa ação, o componente de arrasto aumenta primeiro vagarosamente, e depois rapidamente, conforme a sustentação começa a diminuir. Quando o ângulo de ataque aumenta para o ângulo de máxima sustentação, o ponto crítico conhecido como ângulo crítico, é atingido. O ar então cessa de fluir suavemente na superfície superior do aerofólio começando a turbulência; ou seja, o ar se desprende da cambra superior da asa e o que outrora era uma área de baixa pressão, está agora cheia de ar turbulento, diminuindo a sustentação e o tornando o arrasto excessivo (fenômeno conhecido como stall). Em uma aeronave em situação de stall, a força de gravidade empenna-se em jogar o nariz da aeronave para baixo, de modo que se o ângulo de ataque não for prontamente diminuído o avião pode cair.

Em experimentação em túnel de vento as forças que se exercem sobre os perfis ou modelos são medidas através de uma balança aerodinâmica. Com seu uso é possível evidenciar a estabilidade e construir a polar de arrasto do perfil, simulando um vôo real. A polar de arrasto sendo a curva que expressa a relação entre arrasto e sustentação de uma aeronave para toda a sua faixa de operação, tem relação direta com as características de desempenho da aeronave.

## 2.2. Projeto da Balança

A concepção do projeto de uma balança genuinamente mecânica se deu no interesse de trabalhar com sistemas simples e que pudessem oferecer resistência mecânica, durabilidade, baixo tempo de resposta, leitura fácil e direta, além de fácil manuseio; garantindo assim a sua confiabilidade com ressaltos no baixo custo de construção.

O funcionamento da balança pode ser facilmente entendido quando se compreende a mecânica das molas. Quando o perfil de asa é fixado à balança e recebe a força da ação do vento, ocorre a tendência ao movimento, que pode provocar nas hastes um deslocamento. O movimento apenas será realizado se a força atuante for suficiente para “decolar” a carga (o perfil de asa). Com o perfil já tendendo a subir há o movimento das hastes que o sustentam, de modo a deformar as molas que inicialmente foram ajustadas para a situação de carga zero, ou seja, a deformação quando o perfil está em repouso. Um pequeno motor acoplado a um par de engrenagens compõem o mecanismo responsável por manter o perfil na sua posição inicial, ou seja, ele faz com que as molas retornem automaticamente ao ponto de tara quando uma carga aplicada as retiram desta situação. Desta forma, o perfil tem liberdade para “flutuar” em função das forças atuantes do fluido, sendo garantido seu retorno automático a sua posição de repouso. Os valores de sustentação são calculados então a partir das leituras de deslocamento da mola, feita em função da carga aplicada.

Em vista destas premissas optou-se pelo uso da deformação mecânica das molas como principal propulsor para geração dos dados de saída do sistema. O planejamento de construção da balança foi dividido em etapas segundo a análise da atuação das forças no perfil. Assim, neste primeiro momento do projeto foi desenvolvido o circuito responsável pela aquisição de dados da sustentação. Sendo a etapa seguinte a implementação de um sistema para coleta de dados a cerca do arrasto. A metodologia abaixo descreve as fases de execução desta primeira etapa:

- Desenvolvimento de suporte para o perfil;
- Desenvolvimento do mecanismo propulsor;
- Desenvolvimento de sistema de ajuste e posicionamento integrado.

A principal necessidade ao se posicionar o perfil, ou modelo, no túnel é satisfazer a condição de que seu método de fixação não afetará o escoamento fluido, de modo a minimizar erros e não mascarar resultados. A utilização de uma barra roscada traspassante ao perfil garante este tipo de fixação. Para o livre movimento do perfil ao longo do eixo vertical apenas, é necessário evitar rotações em torno dos outros eixos. A barra roscada age neste sentido fixando-se às chapas laterais do perfil. Estas chapas são presas a hastes internas que como longarinas garantem rigidez a asa. Desta forma, ajustado e fixo em três pontos, o perfil sofre deslocamento apenas em um eixo.

As extremidades da barra roscada são conectadas a hastes deslizantes que permitem o movimento do perfil no túnel. Estas hastes atravessam a parede inferior do túnel onde recebem um conjunto de molas, que em ligação ao mecanismo propulsor são deformadas na haste em função da força gerada.

Um motor elétrico CC alimentado por uma bateria de 9V, acoplado ao engrenamento redutor é o responsável pela transmissão do movimento. Este é limitado por ajustes inicialmente conferidos ao sistema, de modo que, uma vez iniciado o ensaio, seu posicionamento é automático pelo uso de ligações elétricas. A Figura (1) esboça o modelo descrito.

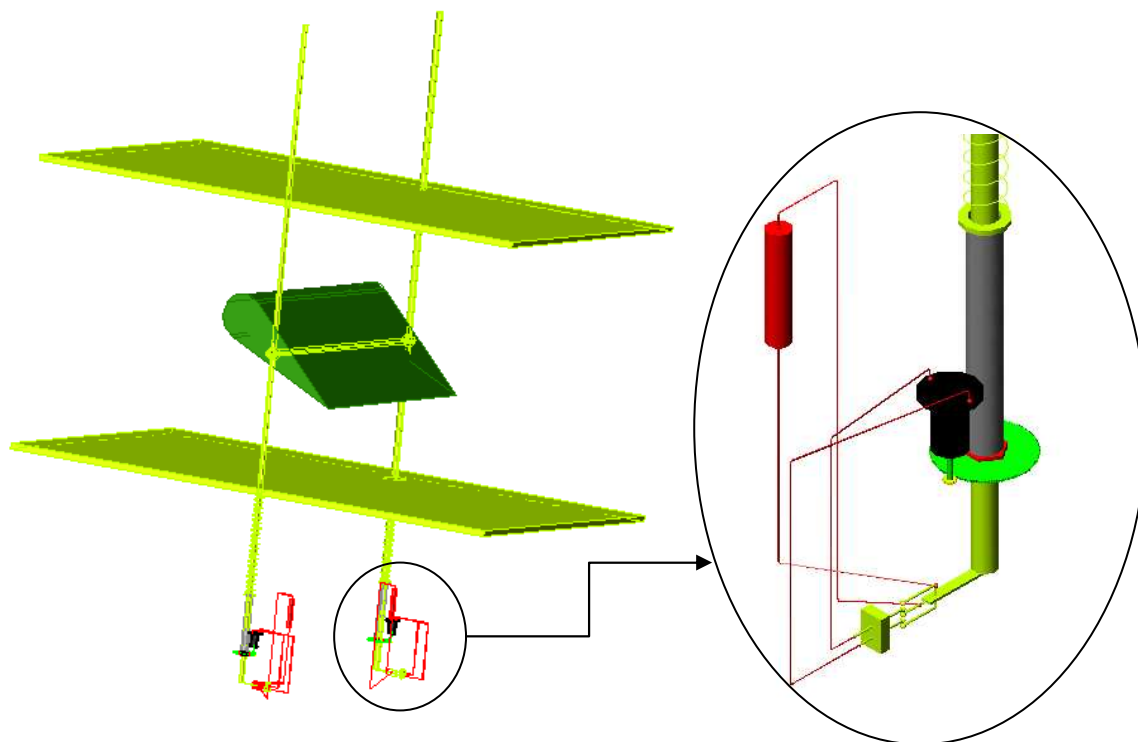


Figura 1. Esboço do modelo da balança proposta

A balança aerodinâmica foi projetada para experimentação no túnel de vento do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRN. Dentre as configurações de túneis aerodinâmicos disponíveis, optou-se por trabalhar com um de circuito aberto, devido a menor complexidade de instalação e manuseio; sendo do tipo soprador, para aproveitar uma maior eficiência do motor; e com difusor para que o fluido de ar ganhe velocidade antes de atingir a seção de ensaios. O projeto do túnel utilizado foi parte integrante da dissertação de mestrado de Cöuras Ford (2008).

Com a configuração em circuito aberto, o túnel apresenta as seguintes características: comprimento total de 4,5m; seção de ensaio com dimensões de 0,50m x 0,50m; velocidade máxima de aproximadamente 6,3m/s, obtida usando um motor elétrico monofásico, com potência máxima de 5HP (3.7kW); difusor com razão de contração de 2:1 que segundo Catalano (1998) aumenta a velocidade do fluido devido à diminuição da pressão. A Figura (2) mostra túnel aerodinâmico utilizado.

No túnel aerodinâmico utilizado, o ar é soprado por um ventilador centrífugo, movido por um motor elétrico de corrente alternada. O ar passa por um difusor no qual há em sua extremidade de saída a uma caixa do tipo colméia, Fig (3). Nesse momento, o ar sofre uma perda de pressão em decorrência da colméia e do atrito com as paredes. A função da colméia é diminuir as grandes perturbações (vórtices), proporcionando um escoamento mais uniforme (laminar) na saída do difusor. A caixa de uniformização do tipo colméia foi construída com 625 tubos de PVC de 20mm de diâmetro cada um, com 200mm de comprimento. Para união dos tubos foi utilizado cola de PVC, a fim de garantir que os tubos não sofressem movimentação devido ao fluxo de ar.



Figura 2. Túnel Aerodinâmico



Figura 3. Caixa de uniformização tipo colméia.

Após o difusor, o escoamento sofre uma aceleração devido a presença de uma contração na qual o escoamento sofre uma perda de pressão, isto é, converte-se em energia cinética (velocidade) que se dirige à seção de ensaio. Toda a construção das estruturas do túnel (difusor, contração, seção de ensaio), foram realizadas mediante técnicas utilizadas por Catalano (1998). Partes como: a caixa de uniformização do escoamento; a coifa para reter as vibrações provenientes do motor e a hélice do motor para geração do vento, foram realizadas mediante técnicas utilizadas no Laboratório de Aerodinâmica de Carrocerias de Veículos da Universidade Luterana do Brasil – ULBRA. A Figura (4) mostra o modelo esquemático do túnel aerodinâmico.

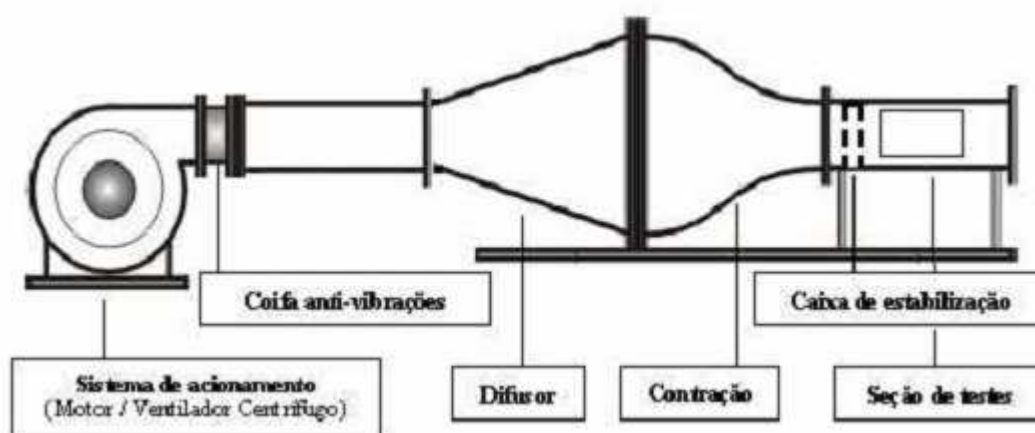


Figura 4. Modelo esquemático do túnel aerodinâmico.

Com o perfil fixado no túnel, é realizado seu ajuste e posicionamento, conferindo o valor de tara para o posicionamento preliminar das molas. O aferimento da balança é feito com base nas especificações dos principais elementos responsáveis pelo deslocamento, as molas. Deste modo, para aplicação de uma determinada carga, conhecendo-se o coeficiente de elasticidade da mola, pode-se conferir a resposta do seu deslocamento esperado. Verificando-se assim se o sistema responde de forma legítima quando ensaiado com o perfil real.

Iniciado o ensaio, o perfil tende a reagir às forças inerentes ao escoamento fluido provocando a deformação das molas. Neste instante o mecanismo propulsor é acionado, movimentando-se no sentido de deslocar as molas até o ponto de estabilidade do perfil. Com o deslocamento gerado pode-se obter o valor de sustentação do modelo sob teste. A fixação do perfil permite seu posicionamento para diferentes ângulos de ataque, propiciando a obtenção de dados para geração da polar de arrasto. Na Figura (5) pode-se observar a balança montada no túnel aerodinâmico. É válido ressaltar que os mecanismos construídos são referentes a primeira etapa do projeto, como já dito anteriormente; sendo responsável pela obtenção de dados pertinentes apenas a sustentação do perfil.





Figura 5. Balança Aerodinâmica em Túnel de vento

### 2.3. Conclusões

Considerando a formação de fluxo gerada em função das características do túnel, esta primeira etapa de construção da balança satisfaz o ideal proposto; haja visto que para a faixa de velocidade de trabalho, a intensidade das forças atuantes mesmo sendo relativamente baixa possibilitou o movimento das hastes de sustentação do perfil, que tiveram seu retorno automático garantido e seu deslocamento passível de medição. Ou seja, o mecanismo para medição da sustentação do perfil respondeu de forma coerente com o esperado.

Pode-se comprovar também que para a carga aplicada, considerando o peso do perfil, a especificação dos materiais para seleção dos componentes se fez de forma coerente, possibilitando o funcionamento dos mecanismos dentro das diretrizes pré-especificadas.

É válido, contudo, frisar mais uma vez que, como exposto em vários pontos do artigo, o projeto desta balança aerodinâmica consta de várias etapas, sendo a construção dos dispositivos para obtenção de dados de sustentação apenas a primeira delas. Para se obter uma polar de arrasto são necessários dados sobre outras forças atuantes no perfil, como o arrasto, por exemplo. De modo que, racionalmente percebe-se que é necessária a conclusão da segunda etapa da balança para que se possam efetuar ensaios completos. Com isto, serão então realizados ensaios e coletados dados para que se possa finalmente validar a confiabilidade da balança quanto ao seu real fim, obter a polar de arrasto de perfis de asa. Assim, o sucesso na conclusão desta primeira etapa foi trivial para as subseqüentes do projeto.

### 3. REFERÊNCIAS

- Arildomá, L. Peixoto, J. Estudo do escoamento em Torno de um Perfil Naca 0012, Nova Friburgo, 2004.  
Assy, T. Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e Aplicações. Editora LTC. 2ª Ed. Rio de Janeiro, 2004.  
Carregari, A. L. Estudo do escoamento de ar sobre a carroceria de um ônibus usando programa de CFD e comparação com dados experimentais. USP: São Carlos, 2006.  
Catalano, F. M. Projeto, construção e calibração em túnel aerodinâmico de circuito aberto tipo N.P.L. de seção transversal hexagonal. USP: São Carlos, 1988.  
Cöuras Ford, E. T. Análise quali-quantitativa do deslocamento da camada-limite em carrocerias veiculares. UFRN: Natal, 2008.  
Fox, R.W. Introdução à mecânica dos fluidos. McDonald, LTC: Rio de Janeiro, 2001.  
Nicolazzi, L. C; Rosa, E. Introdução à modelagem de veículos automotores. GRANTE-UFSC: Florianópolis, 2001.  
White, F. M. Mecânica dos fluídos. 4 ed., McGraw-Hill, 2002.

### 4. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no trabalho.



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
*August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil*

## **AERODYNAMIC BALANCES OF ELECTROMECHANICAL PRINCIPLE FOR INSTRUMENTATION IN WIND TUNNEL**

**Ribeiro, Fernanda Alves, ladha\_ar@yahoo.com.br<sup>1</sup>**

**Lima, Rudson de Souza, rudsonsouza@yahoo.com.br<sup>1</sup>**

**Ford, Elmo Thiago Lins Cöuras, courasreich@hotmail.com<sup>1</sup>**

**Mendes, José Ubiragi de Lima, ubiragi@ct.ufrn.br<sup>1</sup>**

UFRN - Centro de Tecnologia- Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal do Rio G. Norte  
Caixa Postal 1524 - Campus Universitário, Lagoa Nova  
CEP 59072-970 Natal - RN – Brasil

***Abstract.** Aerodynamic balances are used to determinate the aerodynamic weight acting on the models tested in wind tunnel; being its results, due the confusability, in many situations used as a comparison to others methods like the momentum and the pressure field. On this paper were developed a model of aerodynamic balance witch the operate principle is based in the mechanic deformation of the springs and the adjustments and positioning necessary are made automatically from electrical actuation integrated. So, we worked with an alternative model, with a easy and direct measurement, without operator interference and low cost to determine the magnitudes like the aerodynamic resistance and the sustentation.*

**Keywords:** Aerodynamic Balances, Drag, Sustentation)