



## BALANÇA AERODINÂMICA PARA TÚNEL DE VENTO SUBSÔNICO DA UFSM

---

**Luiz Henrique Silva Marques Soares<sup>a</sup>; Fortunato Martins Neto<sup>a</sup>; André Luis da Silva<sup>a</sup>**

[a] Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Av. Roraima, 1000 - Camobi, Santa Maria-RS, 97105-900

**Resumo:** *O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de projeto de uma balança para o túnel de vento subsônico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Para o presente projeto, comparam-se as características e os tipos de aplicações das balanças existentes, com objetivo de auxiliar na tomada de decisão da escolha do modelo mais factível para aplicação na demanda. Além disso, discorre-se à respeito da escolha de outros componentes que são necessários para a mensuração de forças nos modelos ensaiados. O resultado do artigo é um desenho que permite observar a disposição física da balança projetada.*

**Palavras-chave:** *Túnel de Vento, Balança, Ensaio, Aerodinâmica.*

---

### 1. INTRODUÇÃO

Na Engenharia Aeroespacial, é muito importante a realização de cálculos analíticos e numéricos no estudo do comportamento dinâmico de veículos. No entanto, o resultado desses cálculos não garante a fidelidade dos comportamentos verificados na prática, pois muitas vezes são utilizados métodos semi-empíricos para estimar a dinâmica dos modelos. Desse modo, foram desenvolvidas ferramentas capazes de avaliar de maneira experimental, por exemplo, o comportamento de aviões e foguetes, por meio do uso de Túnel de Vento.

O Túnel de Vento é uma ferramenta importante para estudos aerodinâmicos, com o intuito de observar o escoamento do ar em torno de objetos, tornando possível a obtenção de coeficientes aerodinâmicos.

Os coeficientes são obtidos por meio da análise das forças e momentos atuantes no modelo durante os ensaios, que são mensurados por intermédio de balanças. Desse modo, as balanças configuram-se como uma parte essencial do Túnel de Vento, pois extraem esforços que o escoamento exerce sobre o objeto em estudo. Para obtenção experimental de coeficientes de sustentação ( $C_L$ ), arrasto ( $C_D$ ) e momento ( $C_M$ ) é imprescindível o uso destes dispositivos.

Discentes da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) realizaram o projeto de um Túnel de Vento subsônico didático para uso na instituição, ver Figura 2. A motivação do presente trabalho constitui-se na necessidade do desenvolvimento da última fase do projeto, propiciando a operação do Túnel de Vento da UFSM com o uso da balança aerodinâmica.

O desenvolvimento do projeto permitirá que sejam realizadas análises fluidodinâmicas, de maneira experimental, nas disciplinas do curso de Engenharia Aeroespacial da UFSM, contribuindo para melhor formação dos discentes. Além do uso em projetos de pesquisa e de extensão, que necessitem obter coeficientes aerodinâmicos de modelos, como as equipes de competição da Universidade, bem como projetos de Iniciação Científica. A garantia de operação completa do Túnel também poderá fomentar parceria entre empresas privadas e a universidade por meio de projetos desenvolvidos pelos alunos.

Figura 1. Túnel de Vento Subsônico da UFSM.



Figura 2. \*  
Autores

## 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo: realizar o projeto de uma balança para uso no túnel de vento subsônico da UFSM, que seja capaz de estimar dados de veículos ensaiados, por meio da avaliação de forças atuantes no modelo. Ao final do projeto é mostrado um modelo de desenho assistido por computador (*computer aided design, CAD*) da balança.

### 1.1.1 JUSTIFICATIVA

O alcance das metas auxiliará no desenvolvimento de atividades experimentais de disciplinas nos cursos de Engenharia Aeroespacial e Mecânica, como Aerodinâmica, Desempenho de Aeronaves e etc. Espera-se também contribuir para o fomento a projetos de iniciação científica na área e colaboração à projetos de extensão, como as equipes de Aerodesign e Fórmula presentes na instituição.

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo (Barlow et al., 1999) a função de uma balança de túnel de vento é separar componentes de momentos e forças de uma maneira simples de ser avaliada, considerando que esses efeitos variam conforme a velocidade do ar incidente no modelo de ensaio. O autor ainda afirma que as cargas esperadas em ensaios variam em função do tamanho da seção de testes do túnel de vento.

De modo geral, existem dois tipos de balanças aerodinâmicas: internas e externas. Cada uma com suas vantagens e desvantagens para o desenvolvimento de um projeto específico.

Segundo (Égea and Coimbra, 2017) balanças internas são instaladas e localizadas no interior dos modelos utilizados para ensaio no túnel de Vento. O tipo mais comum de balanças internas, é o modelo *sting*, que constitui-se como uma viga onde uma extremidade é unida na parede do túnel de vento e a outra possui o modelo ensaiado. Neste tipo, geralmente utiliza-se *strain gages* para a mensuração das forças de reação provenientes do modelo. De modo comum, as balanças internas são utilizadas para testes envolvendo modelos em velocidades

supersônicas e ultrassônicas.

As balanças externas, por sua vez, são localizadas fora da seção de testes do Túnel de Vento. Segundo (Égea and Coimbra, 2017) a determinação das forças por esse modelo é realizada por meio de elementos mecânicos (cabos, roldanas, mancais e etc), além disso este tipo é mais aplicado à Túneis de Vento que operam em regimes de velocidades subsônicas.

Balanças internas e externas possuem vantagens e desvantagens nas aplicações que são destinadas, devendo ser consideradas questões de compromisso entre os aspectos que justifiquem sua escolha. O Quadro 1 realiza uma comparação entre os modelos de acordo com (Égea and Coimbra, 2017).

-	<b>BALANÇAS INTERNAS</b>	<b>BALANÇAS EXTERNAS</b>
<b>Vantagens</b>	Cargas medidas próximas aos pontos de aplicação; Mecanismo de transmissão simples, pouca influência nas medidas; Sistema rígido, sendo possível medir processos dinâmicos.	Não há limitação de carga ou modelo; Construção simplificada.
<b>Desvantagens</b>	Não servem para todos tipos de modelos que podem ser ensaiados; São de difícil construção, peças requerem maior precisão de construção.	Cargas medidas longe do ponto de aplicação; Montante do modelo influencia na medida; Baixa eficiência para detectar processos dinâmicos.

Quadro 1: Comparativo entre balanças internas e externas.

## 2. PROJETO

Como passo inicial para o projeto é importante discorrer a cerca dos requisitos de funcionamento do modelo, além disso deve-se conhecer a estrutura e configuração da seção de testes do túnel de vento, Figura 4, com dimensões mostradas na Tabela 1.

A balança deve ser capaz de medir forças de arrasto e sustentação, bem como momento de arfagem. O usuário deve ser capaz de alterar o ângulo de ataque do modelo. A balança também deve fornecer o valor atual de ângulo de ataque ao usuário. A medição das três reações aerodinâmicas e do ângulo de ataque, bem como o comando de variação do ângulo de ataque, devem ocorrer por meio de sinais elétricos. A pressão interna na balança deve ser isolada da pressão atmosférica, para evitar recirculação de ar na seção de testes.

A solução encontrada para satisfazer os requisitos é uma balança que contém um motor elétrico acoplado à placa de força, o qual realiza de forma automática a variação do ângulo de ataque do modelo, a partir de comando elétrico enviado pelo usuário. Esse motor também deve suportar o momento de arfagem, de modo a manter uma orientação constante do modelo com respeito à placa de força.

Figura 3. Seção de testes do Túnel de Vento da UFSM.

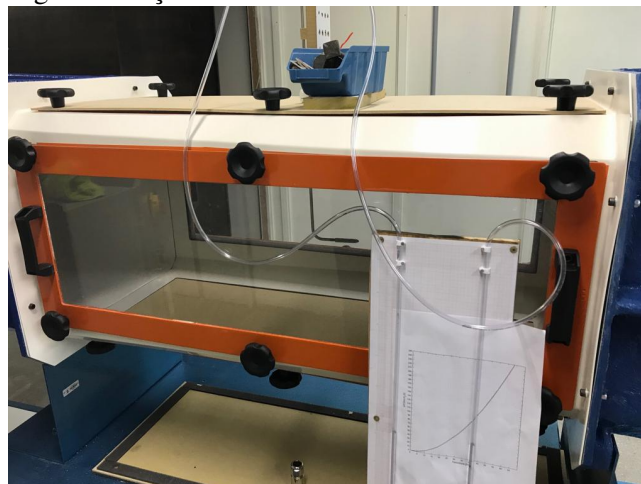


Figura 4. \*  
Autores

Tabela 1. Dimensões da seção de testes do Túnel de Vento.

DIMENSÃO	VALOR	UNIDADE
Comprimento	1	m
Altura	0.46	m
Largura	0.46	m

## 2.1 Considerações iniciais do projeto

A partir das dimensões consideradas da seção de testes e da necessidade de implementação da balança para total funcionamento do túnel de vento, realizou-se as seguintes considerações:

- Como as análises seguirão conceito didático, a balança se encaixa na mesma ideia;
- Conceito simples que atenda à necessidade de estimar forças e momentos atuantes atrelado à facilidade do projeto;
- Projeto robusto e duradouro, proporcionando uso em diferentes aplicações sem dano à balança;
- Projeto de baixo custo.

## 2.2 Modelo de referência adotado

Tendo em vista as dimensões disponíveis e as considerações adotadas, selecionou-se o modelo de balança externa que apresenta menor restrição de tamanho, por situar-se fora da seção de testes e apresentar conceito simplificado e custo reduzido de fabricação e compra de material.

A partir das condições de projeto definidas, investigou-se modelos de balanças externas que se encaixavam nas especificações de projeto e adotando-se a balança externa, Figura 6, utilizada no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), como modelo base do projeto, a partir de recomendações de usuários deste modelo.

Figura 5. Modelo de Balança Externa utilizada no ITA.

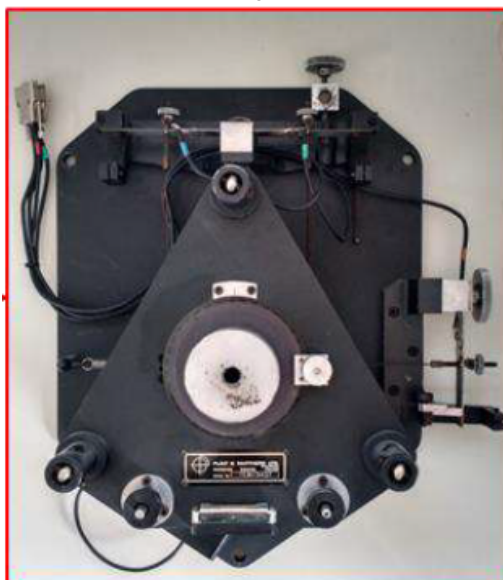


Figura 6. \*  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica

## 2.3 Esboço do Projeto

A partir da referência de balança adotada, considerou-se o esboço inicial, Figura 8, onde há utilização de duas placas, sendo uma fixa e outra móvel, responsável por receber os esforços, e três células de carga de flexão em dois sentidos.

Figura 7. Esboço Inicial da Balança Aerodinâmica.

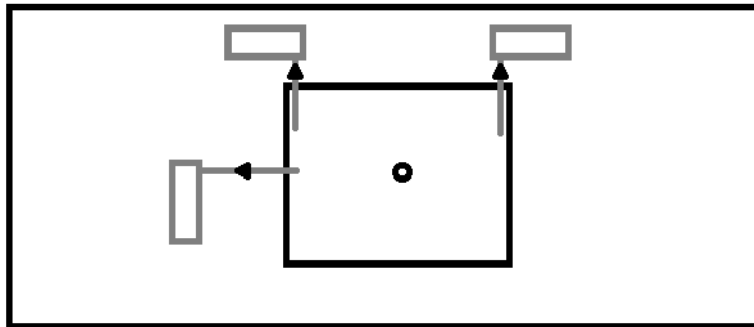


Figura 8. \*  
Autores

Porém, verificou-se que as células de carga para flexão em dois sentidos, ou células que funcionavam de maneira semelhante, atrelavam custo excessivo ao projeto. Dessa maneira optou-se por utilizar quatro células de flexão em sentido único para captar as reações verticais.

Dessa forma, tornou-se necessário alterar o esboço e verificou-se que a configuração da Figura 10 estava mais adequada às considerações gerais do projeto. A seguir  $C_{LL}$  é a célula de carga superior esquerda,  $C_{LR}$  é a célula superior direita,  $C_{LL2}$  a célula inferior esquerda,  $C_{LR2}$  inferior direita e a  $C_D$  a célula do arrasto.

Figura 9. Esboço alterado da Balança Aerodinâmica.

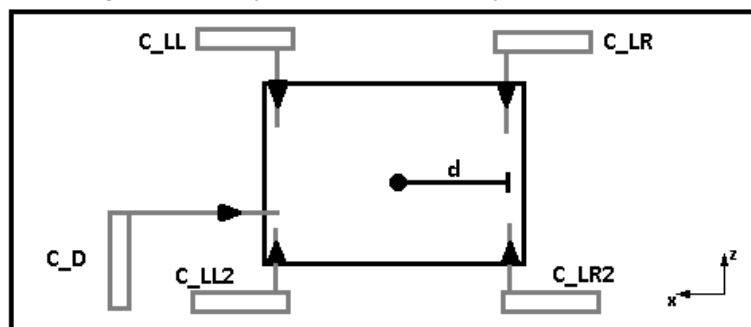


Figura 10. \*  
Autores

## 2.4 Equações

A partir do modelo especificado, é necessário equacionar o desacoplamento das forças a partir das medições realizadas pelas células de carga. As equações que relacionam as variáveis de forças resultantes do modelo foram baseadas nas deduções realizadas por Girardi (2005), onde considera-se o projeto da balança da Figura 6.

### 2.4.1 Condições iniciais

Nas condições iniciais, considera-se o túnel de vento desligado e somente a força peso atuando. A força peso compreende o peso do conjunto compreendido pela placa interna, motor de passo, conexão da balança com o modelo e o respectivo modelo. Dessa maneira as forças ( $F$ ) atuantes nas células de carga são determinadas de acordo com as Equações 1 a 5, considerando o sentido positivo do eixo 'Z' para cima e momento em torno do eixo 'Y' positivo no sentido anti horário e o centro de massa do modelo, no sentido 'X' coincidindo com o eixo que o liga a balança.

$$F_{C_{LL}}^1 = \frac{-P}{2}; \quad (1)$$

$$F_{C_{LR}}^1 = \frac{-P}{2}; \quad (2)$$

$$F_{C_{LL2}}^1 = 0; \quad (3)$$

$$F_{C_{LR2}}^1 = 0; \quad (4)$$

$$F_{C_D}^1 = 0; \quad (5)$$

### 2.4.2 Túnel Ligado

Para o túnel ligado, as forças resultantes na captação da sustentação e momento de arfagem em cada célula se resumem em dois casos: Quando o peso do conjunto é maior que a sustentação gerada, somente as células superiores atuarão para captar as reações; Quando o peso do conjunto é menor que a sustentação, somente as células inferiores atuarão na captação das reações. Isso ocorre pelo fato das células de carga trabalharem com flexão em sentido único.

- Para o caso em que o peso do conjunto é maior que a sustentação gerada:

$$F_{C_{LL}}^2 = \frac{-P}{2} + \frac{L}{2} - \frac{M}{2d}; \quad (6)$$

$$F_{C_{LR}}^2 = \frac{-P}{2} + \frac{L}{2} + \frac{M}{2d}; \quad (7)$$

$$F_{C_{LL2}}^2 = 0; \quad (8)$$

$$F_{C_{LR2}}^2 = 0; \quad (9)$$

$$F_{C_D}^2 = D; \quad (10)$$

Subtraindo a Equação 1 da Equação 6, a Equação 2 da Equação 7 e a Equação 5 da Equação 10 tem-se:

$$L = (F_{C_{LR}}^2 - F_{C_{LR}}^1) + (F_{C_{LL}}^2 - F_{C_{LL}}^1); \quad (11)$$

$$M = d((F_{C_{LL}}^1 - F_{C_{LL}}^2) + (F_{C_{LR}}^2 - F_{C_{LR}}^1)); \quad (12)$$

$$D = F_{C_D}^2 - F_{C_D}^1; \quad (13)$$

- Para o caso em que o peso do conjunto é menor que a sustentação gerada, seguindo a mesma metodologia:

$$L = (F_{C_{LR2}}^2) + (F_{C_{LL2}}^2); \quad (14)$$

$$M = d((-F_{C_{LL2}}^2) + (F_{C_{LR2}}^2)); \quad (15)$$

$$D = F_{C_D}^2 - F_{C_D}^1; \quad (16)$$

## 2.5 Condições críticas

Obtidas as equações que permitem a mensuração das forças de reação dos modelos ensaiados no Túnel, decidiu-se estimar condições críticas de ensaios de modelos no Túnel de Vento, com este no máximo regime de operação ( $V_{max} = 58 \text{ m/s}$ ).

Figura 11. Modelo didático confeccionado para validação do Túnel.

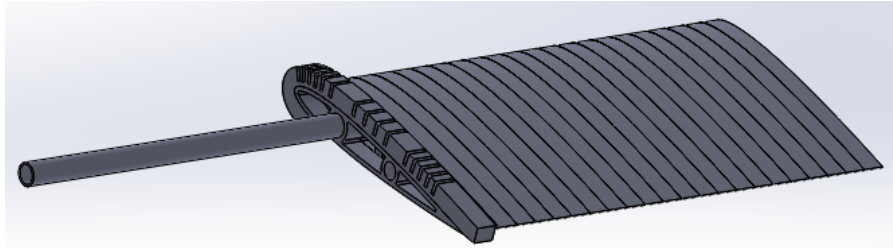


Figura 12. \*  
Autores

Deste modo, escolheu-se o aerofólio *Selig 1223 RTL*, cujas principais características são altos coeficientes de sustentação, arrasto e momento, devido à presença de arqueamento no intradorso. Este perfil foi assumido para modelar um modelo didático para uso no túnel de vento, ver Figura 12. O modelo possui envergadura,  $b = 26 \text{ cm}$  e corda,  $c = 15 \text{ cm}$ . A envergadura do modelo foi dimensionada com objetivo de evitar que as paredes do túnel não exerçam influência no escoamento que incidirá no modelo durante os ensaios. Assim, considerando os valores máximos dos coeficientes mostrados por Tools (2019),  $C_L = 2.3$ ,  $C_D = 0.25$  e  $C_M = 0.3$ , e as equações 17, 18 e 19, pode-se obter uma estimativa das condições críticas que poderão ser ensaiadas.

$$L = \frac{\rho V^2 S_w C_L}{2} \quad (17)$$

$$D = \frac{\rho V^2 S_w C_D}{2} \quad (18)$$

$$M = \frac{\rho V^2 S_w C_D \bar{c}}{2} \quad (19)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica do ar ao nível do mar,  $V$  é a velocidade máxima de operação do túnel de vento,  $S_w$  é a área de asa do modelo didático e  $\bar{c}$  é a corda média aerodinâmica do modelo didático.

Com isso, obteve-se os valores para condições críticas, ver Tabela 2.

Tabela 2. Condições críticas no Túnel de Vento.

FORÇAS	VALORES	UNIDADE
L	326	N
D	35,4	N
M	6,4	Nm

## 2.6 Instrumentação

A avaliação das forças atuantes no modelo só pode ser realizada com a instrumentação da balança, que consiste no uso de equipamentos que podem medir as variáveis físicas envolvidas no sistema. Com o esboço inicial do projeto, verificou-se a necessidade de utilização de dois instrumentos principais: um motor de passo e células de carga.

### 2.6.1 Motor de passo

Os motores de passo são uma solução simples quando necessita-se posicionar um objeto de maneira precisa, com variações de passos de ângulo. Neste caso, o motor de passo é importante para variação correta do ângulo de ataque do modelo de ensaio, que deve ser realizado com passos de  $1^\circ$ . Além disso, o eixo do motor não deve permitir a movimentação do modelo durante o ensaio no Túnel, pois qualquer movimentação que ocorra pode alterar a medida das forças avaliadas no ensaio.

Com base nas forças críticas avaliadas vistas na Tabela 2, realizou-se uma pesquisa de modelos disponíveis no mercado, sendo o preço do motor um critério de corte. Assim, decidiu-se utilizar o motor Nema 34 100kgf.cm, ver Figura 14.

O principal requisito do motor é a capacidade de suportar um torque de, no mínimo, aquele apresentado na Tabela 2, de modo a manter o modelo com orientação constante em relação à placa de força. Como os motores, em geral, são especificados na unidade de kgf.cm, converteu-se o torque da Tabela 2 para tal unidade, obtendo-se 65,26 kgf.cm. Desta forma, o motor que melhor atendeu este requisito foi o motor de passo NEMA 34. Nota-se que há uma folga no cumprimento do requisito, o que é importante para compensar incertezas de projeto e eventuais sobrecargas.

Convém ressaltar que os motores de passo são, em geral, mais pesados que servomotores de corrente contínua (DC) capazes de fornecer a mesma precisão de orientação angular. No entanto, estes servomotores DC, em geral, possuem baixo nível de torque, sendo, os motores de passo uma alternativa que combina precisão com alto nível de torque, o que é adequado para o projeto em questão.

Figura 13. Motor Nema 34 100kgf.cm

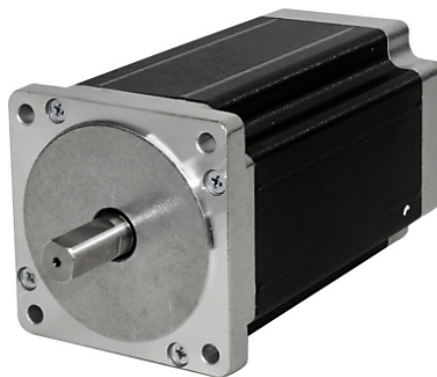


Figura 14. \*  
Rizon (2019)

### 2.6.2 Células de carga

Normalmente utiliza-se células de carga para medidas de massa ( $kg$ ), o que não deixa de ser o caso do trabalho, pois a força de sustentação mostrada na Tabela 2 equivale aproximadamente à  $33 kg$ . As células são elementos que possuem *strain gages* fixados, geralmente feitos de alumínio ou aço. Quando ocorre a atuação de uma carga na célula, o material é deformado, mas depois retorna à posição original como resposta elástica à carga. Os *strain gages*, portanto, permitem medir essas deformações e, por meio de amplificadores, informar os valores ao operador do sistema.

Neste trabalho, as células de carga são responsáveis pela avaliação das forças dos ensaios, deste modo, é necessário que os modelos de células escolhidos possam medir cargas críticas mostradas na Tabela 2.

Usando a Equação 7 e substituindo os valores extremos estimados na Tabela 2 de  $L$ ,  $M$  e  $P$ , onde  $P = P_{bg}$ ,

sendo  $P_b = 10,47 \text{ kg}$  (Peso da balança) conforme Tabela 4 e  $d = 130 \text{ mm}$ . Verifica-se que as células de carga devem ser capazes de medir o máximo de 13,88 kg, resultando no requisito de 20 kg por arredondamento de valores comerciais.

Considerando as justificativas apresentadas na Seção 4.3, optou-se por utilizar no projeto 4 células de carga de 20 kg, responsáveis pela medida das forças de sustentação e momento, e 1 célula de carga de 10 kg responsável pela medida das forças de arrasto. O modelo escolhido pode ser visto na Figura 16.

Figura 15. Modelo de célula de carga escolhida para o projeto.



Figura 16. \*  
Livre (2019)

## 2.7 Orçamento

Realizou-se um orçamento, ver Tabela 3, para avaliar o custo do projeto considerando os principais componentes de instrumentação, processos de manufatura e outros.

Tabela 3. Orçamento de peças e materiais.

PEÇA/MATERIAL	VALOR	UNIDADES
Kit Nema 34 de 100kgf.cm	R\$ 1.149,90	1
Nível de Alumínio	R\$ 22,35	1
Células de Carga - 20kg - 10kg	R\$ 84,99	5
Serviços de Engenharia	R\$ 500,00	1
Componentes Eletrônicos	R\$ 200,00	1
Chapa Preta de Aço (2000x1000x3)mm	R\$ 250,65	1
Chapa de Acrílico	R\$ 350,00	1
<b>Total</b>	<b>R\$ 2.556,99</b>	-

O nível de alumínio envolve a instalação desse componente na placa de força de modo que possa visualizar o alinhamento correto da placa com o Túnel desligado. Os serviços de engenharia envolvem processos de corte, dobras e soldas que devem ser realizados nas chapas de aço utilizadas na balança. Os componentes eletrônicos consistem em instrumentos que servirão para avaliação das forças, de modo que os operadores do Túnel de Vento possam ver seus resultados em tempo real, envolve a compra de amplificadores, microprocessador e outros circuitos condicionadores de sinal, bem como fonte de alimentação. A chapa de acrílico orçada servirá para a manufatura de um revestimento transparente que protegerá a balança, propiciando isolamento da pressão interna, para evitar recirculação de ar na seção de testes do túnel de vento.

## 3. RESULTADOS

A balança projetada pode ser vista nas Figuras 18, 20, 22 e 24, considerando espaçadores cilíndricos para evitar translação e rotação do conjunto no sentido 'Y'.

Figura 17. Vista lateral da balança aerodinâmica.

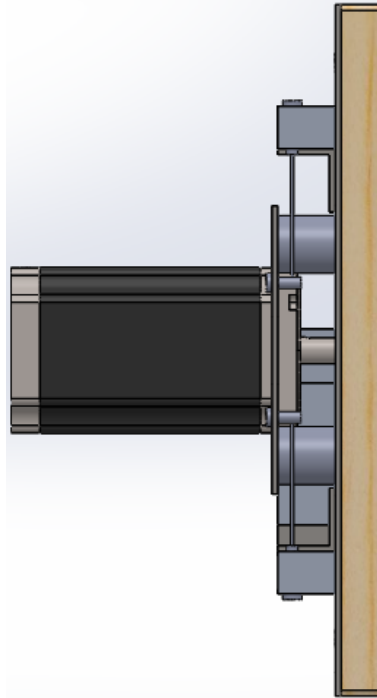


Figura 18. \*  
Autores

É importante destacar que a transmissão das forças da placa de força para as células será feita por meio de cabos de aço, que estarão unidos nas estruturas de ambos componentes. Ao usar cabos de aço, deve-se atentar para inserir regulagens. É preciso uma regulagem bem precisa, para não deixar os cabos com folga, nem esticados demais.

Figura 19. Vista isométrica da balança aerodinâmica.

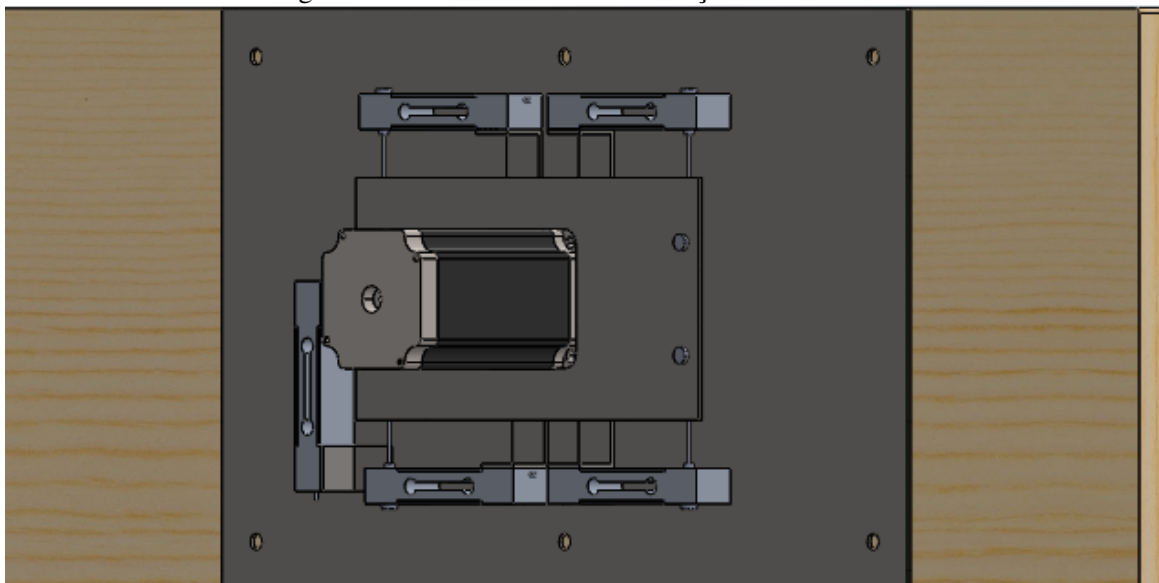


Figura 20. \*  
Autores

Figura 21. Vista frontal da balança aerodinâmica.

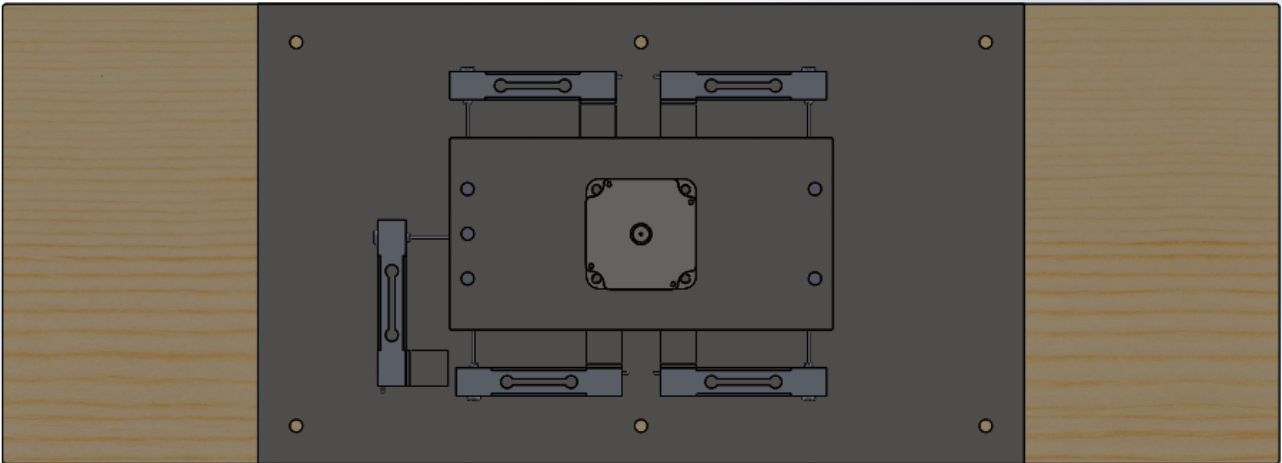


Figura 22. \*  
Autores

Figura 23. Vista da balança aerodinâmica pelo lado interno da seção de testes.

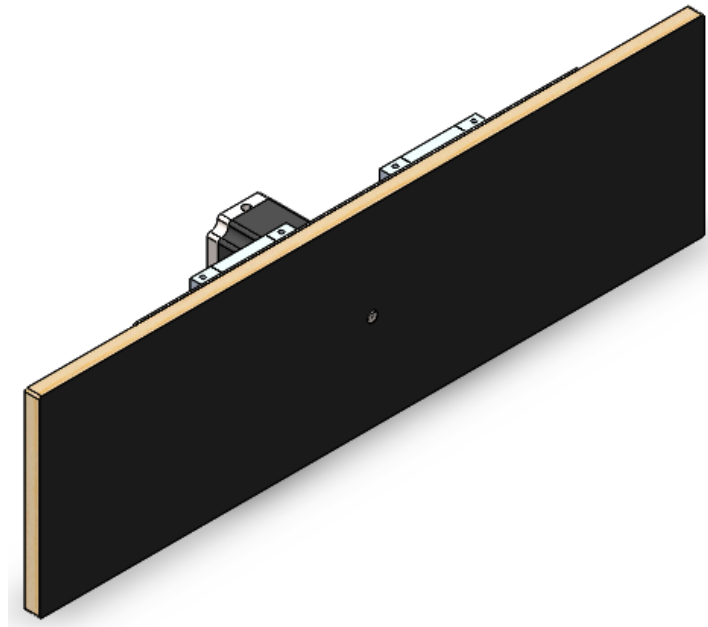


Figura 24. \*  
Autores

O orifício presente na Figura 24 deve ter uma folga que permita o movimento de rotação (para medir o momento de arfagem) e pequenos deslocamentos verticais e longitudinais, para medir sustentação e arrasto. A Tabela 4 mostra a previsão de peso total da balança aerodinâmica.

Tabela 4. Pesos dos componentes.

Parâmetro	Peso
Motor	5,0 kg
Placa-base	3,686 kg
Placa-força	0,537 kg
Apoio de Célula (5x)	0,211 kg
Células de carga (5x)	1,0 kg
Total	10,47 kg

#### 4. CONCLUSÃO

As metas estipuladas no início do trabalho foram alcançadas com a especificação inicial do projeto e posterior dimensionamento e realização dos desenhos detalhados da balança, bem como especificação dos componentes utilizados e o levantamento de custos necessários para compra dos materiais envolvidos.

Em momento posterior será realizado a aquisição dos componentes necessários para construção e montagem da balança. As atividades ainda envolvem a instrumentação e controle da balança, realização de ensaios, integração e testes finais. Todo esse conjunto de atividades tem por objetivo realizar validação dos dados que são mensurados pelo Túnel da UFSM, com modelos historicamente bem consolidados de perfis aerodinâmicos, como o caso dos modelos NACA.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Barlow, J. B., Jr, W. H. R., and Pope, A. (1999). *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. John Wiley & Sons.
- Égea, F. S. O. and Coimbra, R. F. F. (2017). *Projeto de uma balança aerodinâmica para o Túnel de Vento Subsônico da FEAU*.
- Girardi, R. M. (2005). Considerações sobre práticas de laboratório. *Notas de Aula*, page 27.
- Livre, M. (2019). Células de carga gl. [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1119975711-celula-de-carga-gl-5kg-10kg-20kg-40kg-50kg-\\_JM?quantity=1&variation=31595359112](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1119975711-celula-de-carga-gl-5kg-10kg-20kg-40kg-50kg-_JM?quantity=1&variation=31595359112). Acesso em: 15/07/2019.
- Rizon (2019). Motor de passo nema 34 - 100 kgf.cm / 3a. <https://www.rizon.com.br/automacao/motor-de-passo-86hs156-5504a14-b35-120kgf-5-5a-4-fios/>. Acesso em: 19/07/2019.
- Tools, A. (2019). S1223 rtl (s1223rtl-il). <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s1223rtl-il>. Acesso em: 19/07/2019.