



XXIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica  
12 a 16 de Junho de 2023, Goiânia, Goiás, Brasil

## ANÁLISE ESTÁTICA DE BALANÇA AERODINÂMICA

Douglas Neves Nascentes, [douglasnevesnascentes@discente.ufg.br](mailto:douglasnevesnascentes@discente.ufg.br)<sup>1</sup>  
Sigeo Kitatani Júnior, [sigeojr@ufg.br](mailto:sigeojr@ufg.br)<sup>1</sup>  
Marlize Garcia Fagundes Neto, [marlize@ufg.br](mailto:marlize@ufg.br)<sup>1</sup>  
Felipe Pamplona Mariano, [fpmariano@ufg.br](mailto:fpmariano@ufg.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos, Av. Esperança, s/n, Campus Samambaia, Prédio: B5, Goiânia, GO, CEP: 74.690-900, <https://latef.emc.ufg.br/>

**Resumo.** Balanças aerodinâmicas são utilizadas para a determinação das cargas aerodinâmicas atuantes nos modelos ensaiados nos túneis de vento. É vista como um dos principais instrumentos para obtenção de forças de arrasto e sustentação nos experimentos realizados em túneis de vento. O intuito do presente trabalho é a realização de testes estáticos na balança, com diversas pesagens temporais aleatórias e com carga e descarga para averiguar sua funcionalidade, e através dos resultados obtidos, analisar e validar o funcionamento da medição da força de sustentação feita pela balança, já visando ensaios futuros no túnel de vento com a utilização completa do equipamento. Os resultados obtidos nos testes foram satisfatórios, deferindo o uso da balança para determinação da força de sustentação.

**Palavras-chave:** Balança Aerodinâmica. Teste Estático. Funcionalidade. Túnel de Vento.

**Abstract.** Aerodynamic balances are used to determine the aerodynamic loads acting on the models tested in the wind tunnels. It is seen as one of the main instruments for obtaining drag and lift forces in experiments carried out in wind tunnels. The purpose of this work is to carry out static tests on the scale, with several random temporal weighings and with loading and unloading to verify its functionality, and through the results obtained, analyze and validate the functioning of the measurement of the lifting force made by the scale, already aiming future tests in the wind tunnel with the complete use of the equipment. The results obtained in the tests were satisfactory, deferring the use of the scale to determine the lift force.

**Keywords:** aerodynamical balance, Static Test, Functionality, Wind Tunnel.

### 1. INTRODUÇÃO

O túnel de vento é uma ferramenta extremamente importante para o estudo aerodinâmico de corpos imersos em um escoamento. Estas instalações objetivam simular os efeitos do escoamento sobre corpos para estudos científicos, contribuindo para a determinação de parâmetros nos projetos de aviões, carros, turbinas, etc. Dentre as várias maneiras de medição das cargas aerodinâmicas no túnel, a balança aerodinâmica é um dos instrumentos mais completos e amplamente utilizado (SOARES; NETO; SILVA, 2019).

De acordo com a literatura, Francis H. Wenham, em 1871, foi o primeiro a criar um túnel de vento fechado e utilizá-lo para experimentos. Desde sua criação até a atualidade, os túneis de vento são considerados uma das mais importantes ferramentas para estudos aerodinâmicos de escoamentos, sendo cada vez mais fundamentais. (SOUZA JUNIOR; FERREIRA; LETA, 2012).

Túneis de vento podem ser divididos, conforme a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), em dois grandes grupos, túnel de vento de retorno aberto e retorno fechado, em que cada grupo possui subdivisões conforme variam sentido e velocidade do escoamento. O túnel disponível para utilização em conjunto com a balança é de retorno aberto, que de acordo com Jewel B. Barlow, são amplamente utilizados para fins instrutivos e pesquisas de fenômenos fundamentais dos escoamentos.

Os elementos construtivos do túnel de retorno aberto podem ser divididos em 5 partes, sendo elas: seção de testes, sistema de propulsão, câmara de estabilização, difusor e contração. A seção de testes do túnel é a região mais comum de posicionamento dos sensores e instrumentos de medição, tais como a balança aerodinâmica, utilizados nos experimentos. Além disso, possibilita a visualização do escoamento com auxílio de fumaça por exemplo.

A balança aerodinâmica é um instrumento que torna possível a medição de forças fundamentais para a aerodinâmica e as flutuações aplicadas em qualquer perfil inserido na seção de testes do túnel. Seus requisitos estão relacionados principalmente com as cargas máximas medidas e sua resolução estarem em conformidade com as forças previstas no túnel. Segundo o (Barlow et al., 1999), as cargas esperadas em ensaios variam de acordo com o tamanho e o tipo da seção de testes do túnel. Podem ser divididas quanto ao seu posicionamento em relação ao túnel de vento, podendo ser internas ou externas.

A força de sustentação é perpendicular à força de arrasto e responsável por sustentar o corpo, como é o caso de aviões. O momento em torno do eixo de sustentação é chamado de momento de guinada. Em alguns casos, a resultante de força e coeficiente de sustentação são nulos, que é o caso de corpos simétricos submetidos a um escoamento totalmente alinhado ao corpo (escoamento sobre cilindros e esferas) (WHITE, 2011).

O objeto de estudo do presente trabalho é uma balança aerodinâmica externa, que não interfere no escoamento, sendo alocada na parte externa à seção de testes, apoiada por um suporte mecânico para mantê-la no local correto e alinhada com a seção. Segundo (Égea and Coimbra, 2017), a determinação das forças para o modelo externo é realizado através de elementos mecânicos, e é mais aplicado em túneis de vento de baixa velocidade (subsônico). Após a determinação das forças, é por meio de uma interface computacional que são adquiridas todas as informações sobre os efeitos do escoamento no modelo de teste (SMITH et al., 2009).

Nesse sentido o trabalho almeja executar testes estáticos em uma balança aerodinâmica para averiguar a veracidade dos valores obtidos pela balança em relação à força de sustentação. Além disso, obter o gráfico de histerese da balança através de teste com carregamento contínuo e posterior descarregamento contínuo na balança. Desta forma, pretende-se validar a utilização da balança para futuros testes e experimentos no túnel de vento, possibilitando uma maior confiança nos resultados produzidos pela própria balança.

## 2. METODOLOGIA

O objeto de estudo do presente trabalho é composto por uma placa flutuante (em preto na Fig. 1), 3 células de carga fixadas nas hastes de alumínio (sinalizado em vermelho) e cabos de aço tracionados fixados à placa (sinalizado em azul). A fixação do corpo na balança se dá através do eixo vazado, que está fixado na placa flutuante e possibilita o encaixe de diversos tipos de corpos para testes. A medida que há alguma carga atuante no corpo fixado à balança, a placa flutuante irá se movimentar, tracionando os cabos e as células de carga, possibilitando a leitura das forças atuantes no momento. Na Fig. 1 é possível visualizar a balança aerodinâmica com as laterais abertas para facilitar a visualização de alguns componentes internos.

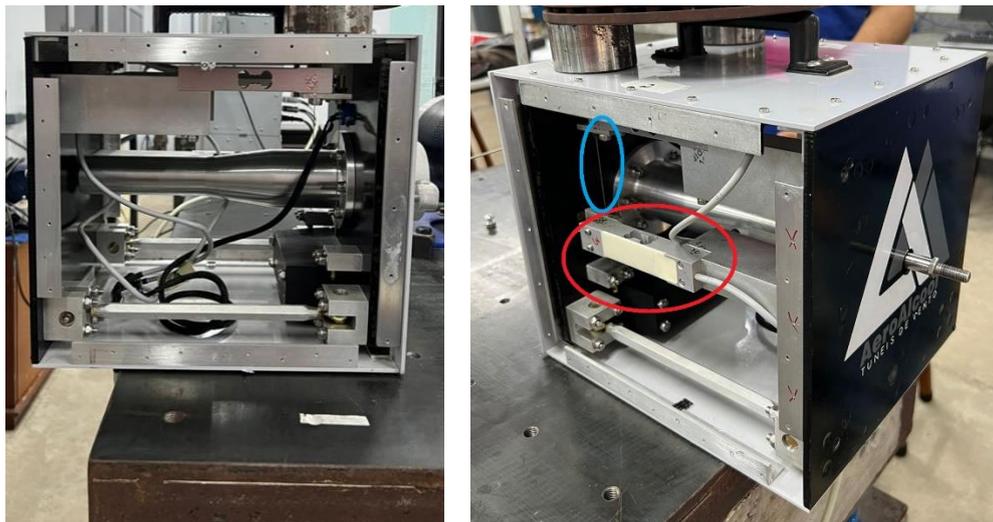


Figura 1. Balança aerodinâmica aberta

As três hastes com extensômetros são responsáveis pela leitura das forças de arrasto (01 haste) e sustentação (02 hastes). Além disso, também é possível obter o momento através das distâncias entre cada haste e a força aplicada em cada uma. Todos os resultados obtidos pela balança passam por um sistema de aquisição de dados, que converte as cargas físicas em valores digitais para serem acessados no computador através do programa “AeroAlcool”.

É importante ressaltar que a balança possui a opção “tara”, permitindo zerar os valores assim que o corpo de ensaio for inserido para os testes, e que todos os valores obtidos para os esforços verticais e horizontais estão medidos em gramas, sendo necessário a conversão para Newtons posteriormente nos cálculos de coeficientes de arrasto e sustentação.

Para evitar o máximo de interferência externa e facilitar o nivelamento no local de posicionamento da balança, foi utilizado uma mesa inercial (indicado pela seta), que pode ser facilmente visualizada na Fig. 2. Após o posicionamento correto da balança, foi feita a seleção das massas padrão que serão utilizadas para a pesagem de teste e um suporte devidamente posicionado na ponta da balança (indicado em verde) para inserção destas massas, conforme Fig. 2.

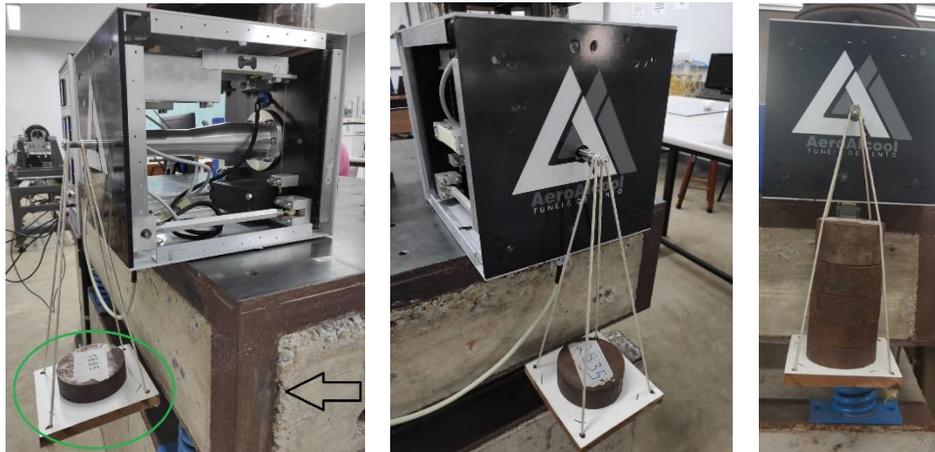


Figura 2. Pesagem das massas na balança

Para o teste estático foram realizados 5 ensaios, sendo coletadas 100 medições ao longo de 30 s, para cada massa testada, com as massas variando de 0,499 Kg a 9,22 Kg. Esse primeiro teste foi realizado com a escolha das massas de maneira aleatória.

Os testes estáticos foram feitos em dois posicionamentos diferentes da balança na mesa inercial, sendo 3 ensaios com a balança em uma extremidade da mesa e 2 ensaios com a balança na transversal à primeira posição, a fim de se obter uma maior aleatoriedade. Além disso, dentre os valores obtidos com as pesagens, foi escolhido, de forma aleatória, um ponto entre os 100 obtidos para fazer a comparação com a medida temporal.

Foi realizado também dois testes de histerese, com cargas e descargas contínuas, o primeiro teste foi realizado com cargas menores, de 0,00 kg (balança totalmente descarregada) a 2,945 Kg, e o segundo teste com cargas maiores, que variam de 0,00 kg a 11,865 Kg. Ao fim de todos os ensaios e aquisição de todos os dados, foi feito o tratamento desses dados e interpretação com representação em forma gráfica.

Por fim, foram gerados os gráficos de intervalos com índice de confiança de 95% para as 5 médias calculadas de todas as medições para todas as massas testadas, com intuito de reforçar os valores obtidos e os testes realizados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios estáticos foram realizados com as massas conforme Tab. 01, e podem ser visualizados na Fig. 3.

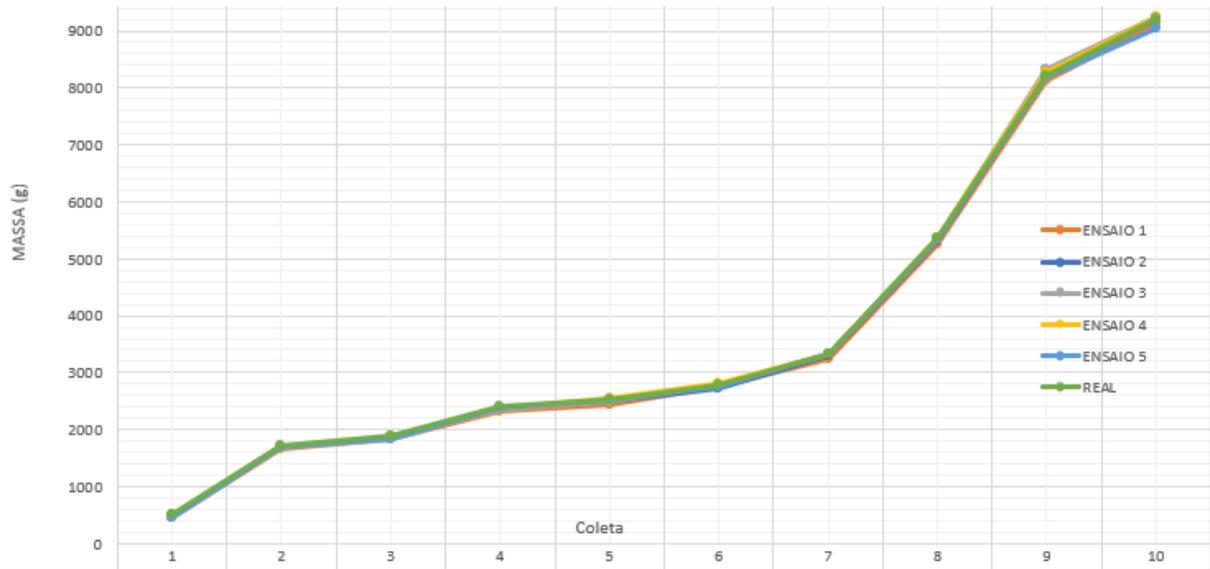
Tabela 1. Massas utilizadas nos ensaios

Massa (g)									
499,0	1710	1885	2395	2535	2790	3340	5355	8200	9220



Figura 3. Massas utilizadas na pesagem

Através do cálculo da média aritmética simples de cada ensaio para cada repetição, foi obtido o gráfico da variação da massa por ensaio em relação ao peso padrão que foi utilizado, conforme mostrado na Fig. 4.



ENSAIO 1	461,29	1666,46	1823,36	2322,07	2449,67	2766,52	3251,58	5261,17	8136,14	9138,88
ENSAIO 2	495,98	1678,99	1859,46	2366,63	2498,57	2713,28	3303,41	5323,18	8208,16	9214,26
ENSAIO 3	485,41	1677,02	1861,44	2353,59	2500,38	2775,55	3323,84	5330,06	8318,09	9241,11
ENSAIO 4	472,52	1690,87	1826,44	2390,86	2539,79	2799,45	3334,21	5367,26	8268,99	9232,38
ENSAIO 5	449,32	1692,66	1842,68	2387,07	2511,61	2766,23	3326,40	5334,21	8178,51	9043,49
REAL	499	1710	1885	2395	2535	2790	3340	5355	8200	9220

Figura 4. Gráfico do teste estático das medições em relação à massa padrão.

Como é possível verificar no gráfico da Fig. 4, a flutuação dos valores medidos não foi considerável, com apenas uma variação um pouco maior observada para cargas mais elevadas, como é o caso dos pesos de 8,200Kg e 9,220Kg. Estes valores foram medidos com tempo de amostragem de 30 s.

Para efeito de comparação, foi selecionada de maneira arbitrária um ponto entre os 100 medidos para cada massa e feita uma comparação com o gráfico representado na Fig. 5.

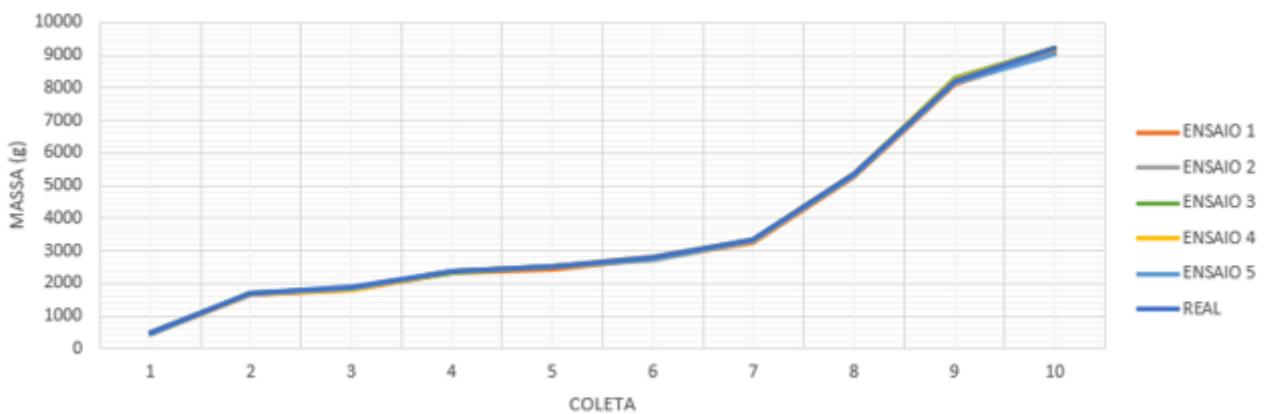


Figura 5. Gráfico do teste estático pontual das medições em relação à massa padrão.

Através do gráfico da Fig. 5 é possível reforçar que não houve variação considerável tanto entre os valores coletados e as massas padrão independente da forma de coleta dos dados, seja pontual ou temporal. Novamente a maior variação é notada para massas maiores. Além disso, é importante ressaltar que os valores que o túnel de vento é capaz de trabalhar estão em uma faixa inferior, onde se tem a menor flutuação dos resultados lidos em relação ao valor de referência. Esses dados da faixa de trabalho do túnel de vento foram adquiridas em outros experimentos que fogem do objetivo deste trabalho.

Para as curvas de histerese, foram realizados dois testes com carregamento contínuo e posterior descarregamento contínuo. As massas utilizadas para o primeiro teste, estão apresentadas na Tab. 2. Todos os ensaios foram realizados com duração de 30 s cada, não havendo análise pontual para esse caso.

Tabela 2. Massas médias durante carregamento e descarregamento.

PESO REAL (g)	MÉDIA	
	CARREGANDO	DESCARREGANDO
0,00	-2,61	-17,93
250,00	210,97	219,97
500,00	449,63	452,08
750,00	683,89	705,62
1000,00	939,34	983,39
1250,00	1178,14	1232,74
1500,00	1427,33	1474,51
1750,00	1670,56	1698,30
2048,00	1957,10	1976,83
2496,00	2342,70	2363,82
2945,00	2837,05	2837,05

A carga foi feita de maneira gradual com variação de 0,250 kg até atingir 1,75Kg, após isso foram adicionadas cargas maiores, atingindo o máximo de 2,945 Kg. Após atingir a massa máxima, foi iniciada a descarga gradual mantendo o período de leitura da balança. Ao fim desse processo, foi gerado o gráfico de histerese para o primeiro teste, que pode ser visto na Fig. 6.

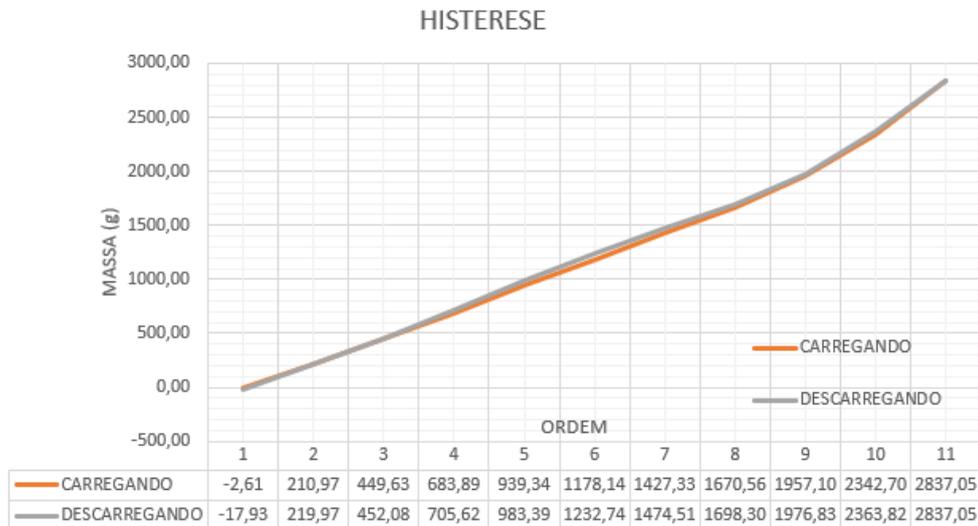


Figura 6. Gráfico do teste de histerese com massa máxima de 2,945 Kg.

Depois foi realizado um segundo, onde foi possível atingir massas bem superiores às do primeiro teste. O arranjo experimental do segundo teste se deu conforme Tab. 3. Da mesma maneira que no primeiro teste, todos os ensaios foram realizados com duração de 30s, não havendo análise pontual. A carga foi feita de maneira gradual com variações conforme as massas padrão, atingindo um valor máximo de 11,865Kg.

Após atingir a massa máxima, foi iniciado a descarga gradual mantendo o período de leitura da balança. Ao fim desse processo foi obtido o gráfico de histerese para o segundo teste, que pode ser visto na Fig. 7.

Tabela 3. Massas médias durante carregamento e descarregamento do segundo teste de histerese.

PESO REAL (g)	MÉDIA	
	CARREGANDO	DESCARREGANDO
0,00	-5,54	-29,58

1710,00	1669,53	1709,68
3595,00	3552,27	3660,83
5990,00	5948,68	6117,11
8525,00	8507,64	8594,63
11865,00	11791,67	11791,67

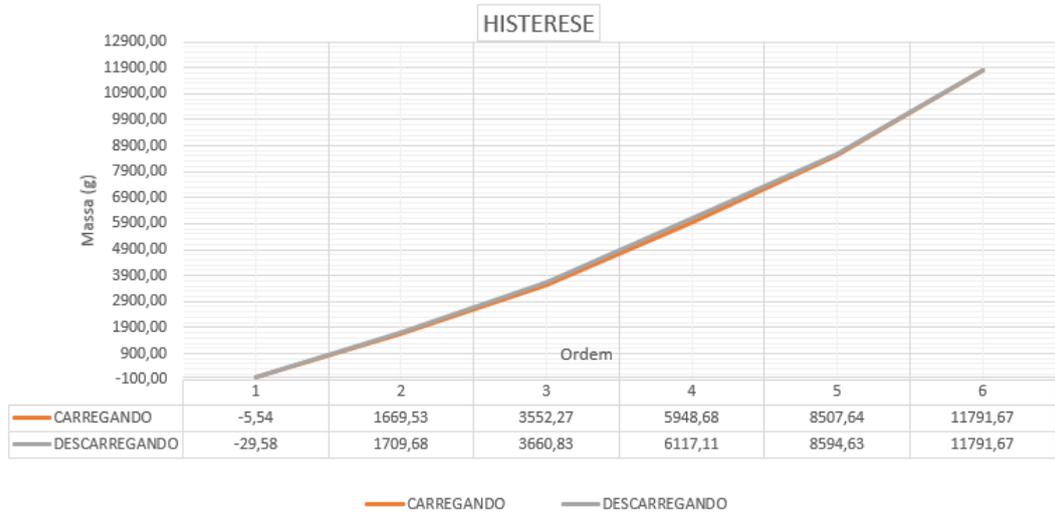


Figura 7. Gráfico do teste de histerese com massa máxima de 11,865 Kg.

Para fim da análise foram gerados os gráficos de intervalo considerando as 5 médias obtidas de cada repetição para todas as massas ensaiadas. O primeiro, representado na Fig. 8, refere-se à massa de 499g e aos valores medidos pela balança em cada repetição, com índice de confiabilidade de 95% para a média entre os 5 valores.

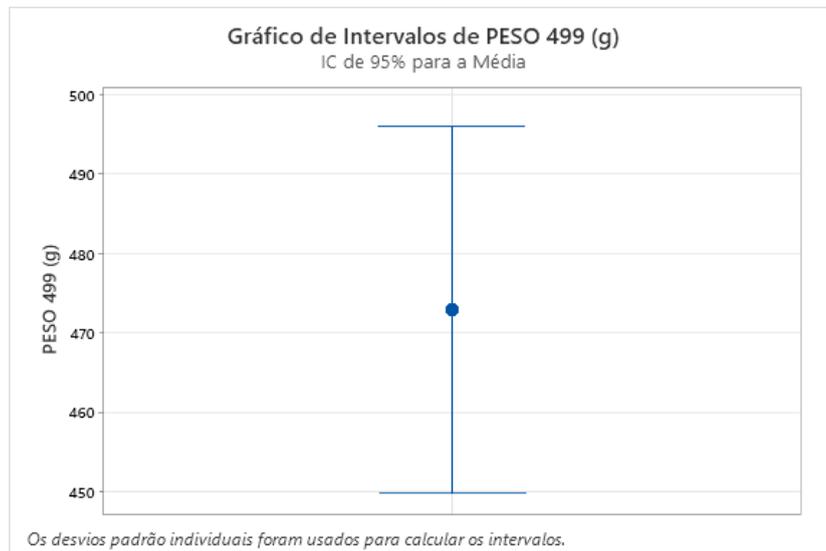


Figura 8. Gráfico de intervalo das 5 médias para a massa de 499g.

O gráfico seguinte, ilustrado na Fig. 9, representa o intervalo das 5 médias para as massas 1710, 1885, 2395, 2535 e 2790g, com intervalo de confiança de 95%. O último gráfico, ilustrado na Fig. 10, tem o mesmo caráter dos citados anteriormente das Fig 8 e 9. Pode-se perceber, que da mesma maneira que gráficos comparativos entre as massas padrão de referência e as medidas pela balança, que para maiores valores de massa há um maior distanciamento do valor medido. Porém, vale ressaltar que apesar de um maior distanciamento entre os dois valores, pode-se considerá-lo como baixo, por ser um erro aceitável e pelo fato de que para os experimentos no túnel não é possível chegar a esses valores elevados de força peso.

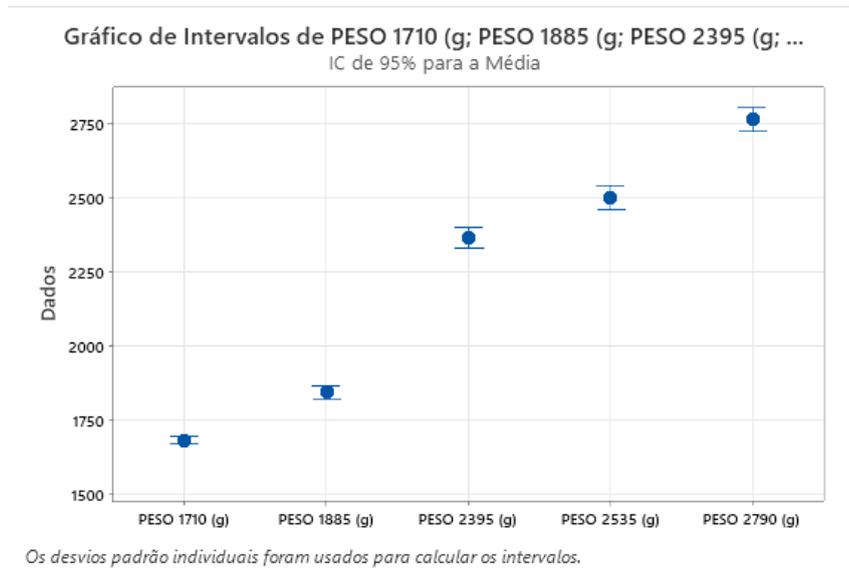


Figura 9. Gráfico de intervalo das 5 médias para as massas de 1710 a 2790g.

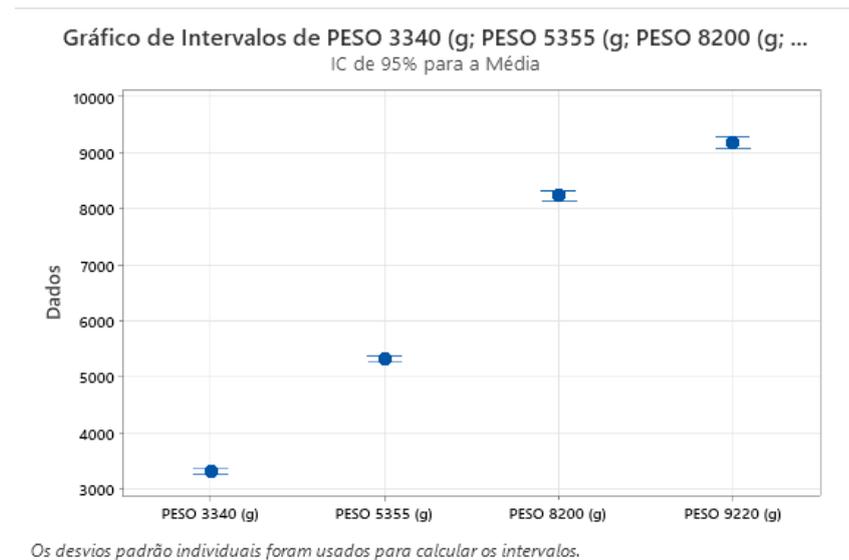


Figura 10. Gráfico de intervalo das 5 médias para as massas de 3340 a 9220g.

#### 4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que para a medição estática da força de sustentação, a balança aerodinâmica apresentou um bom comportamento e com resultados próximos aos das massas de referência, não sendo necessário nenhum ajuste nem calibração.

Sendo assim, a etapa de validação para a componente vertical no teste estático está feita e aprovada, restando agora futuros testes para a medição da força de arrasto. Por fim, também sugere-se o teste dinâmico da balança para que seja possível realizar a validação completa do equipamento e aprovar seu uso para experimentos no túnel de vento.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FURNAS Centrais Elétricas, ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) da ANEEL e à FAPEG pelo financiamento e apoio ao desenvolvimento do presente trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

- Baals, D. D. and Corliss, W. R. 1980. Wind Tunnels of NASA (NASA SP-440)
- 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. F. (2017). Projeto de uma balança aerodinâmica para o Túnel de Vento Subsônico da FEAU.
- Smith, Donald G.;Banceu, Bruno.; Markstaller, Matthew G. Vehicle wind tunnel balance. 2007.
- Soares, L. H. S. M.; Neto, F. M.; Silva, A. L., 2019. Balança aerodinâmica para túnel de vento subsônico da UFSM, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.
- Souza Junior, D. P.; Ferreira, G.G; Leta, F. R., 2012. Desenvolvimento de um túnel de vento compacto para simulações didáticas de projetos de engenharia mecânica, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil
- WHITE, F. M. Mecânica dos fluidos. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuncret.html> <acesso em 04/01/2023>

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.