

## **MEDIÇÃO DAS FORÇAS DE ARRASTO E SUSTENTAÇÃO EM UM TÚNEL DE VENTO DIDÁTICO**

ALLAN JOSÉ DA SILVA, ABNER RODRIGUES PINTO, DARIO JUNIOR MUNIZ DE OLIVEIRA,  
JONATAS OLIVEIRA ALCARDE DE SOUZA, KEVIN ALMEIDA SILVA, LINCOLN TOSHIKAZU KAMIMURA.

Universidade Paulista - UNIP

<allansilva.ajs@gmail.com><abner\_rodrigues206@hotmail.com><dariomuniz@protonmail.com>  
<jonatas.alcarde@gmail.com><kevin.silva@dsm.com><lincolnkamimura@gmail.com>

DOI:10.21439/conexoes.v14i3.1423

### **RESUMO**

O presente artigo abordou um estudo experimental sobre a medição das forças de arrasto e sustentação que são realizadas em ensaios feitos com um perfil aerodinâmico utilizando um túnel de vento do tipo soprador, onde, este túnel de vento tem por finalidade o uso em âmbito acadêmico de ensino superior e tecnológico. Utilizando um modelo de perfil aerodinâmico com duas inclinações de ângulo de ataque diferentes, foi possível comparar as medições das forças, visualizar as diferenças que o ângulo de ataque promove nas forças de arrasto e sustentação e comprovar a viabilidade da utilização de um túnel de vento didático em instituições de ensino voltadas ao nível superior.

**PALAVRAS-CHAVE:** FORÇA DE ARRASTO. FORÇA DE SUSTENTAÇÃO. AERODINÂMICA. TÚNEL DE VENTO.

### **MEASUREMENT OF LIFT AND DRAG FORCES IN A DIDACTIC WIND TUNNEL**

#### **ABSTRACT**

The present article addressed an experimental study on the measurement of drag and lift forces that are performed in aerodynamic profile tests using a blower type wind tunnel, where this wind tunnel is intended for the academic use of higher education and technology. Using an aerodynamic profile model with two different angle of attack slopes, it was possible to compare forces measurements, to view the differences that the angle of attack promotes in the drag forces and to support the viability of using a didactic wind tunnel in higher education institutions.

**KEYWORDS:** DRAG FORCE. STRENGTH OF SUPPORT. AERODYNAMICS. WIND TUNNEL.

## 1. INTRODUÇÃO

A aerodinâmica estuda a interação de objetos com um fluido em movimento relativo, onde por conta de sua geometria, o escoamento de fluido sobre esse corpo terá grande influência em seu movimento devido às forças atuantes. Para mensurar a intensidade dessas forças em um modelo de perfil aerodinâmico, foi feita medições de força de arrasto e de sustentação utilizando o túnel de vento construído para fins didáticos, e inserido em aulas de mecânica dos fluidos em uma universidade.

Para validação técnica do projeto, foram feitos métodos de ensaio que demonstram de forma quantitativa os fenômenos físicos que ocorrem no protótipo do perfil aerodinâmico e possibilita a comparação com o caso real. Os testes realizados foram, força de arrasto e sustentação por meio de balanças de precisão, onde foi realizado testes em perfil aerodinâmico com ângulo de ataque a zero graus simulando aviões em voo com altitude e velocidade de cruzeiro, e perfil a 15 graus simulando situação de aeronaves em decolagem.

Com o auxílio do túnel de vento como ferramenta, foram realizadas as medições e obtido os resultados de força de sustentação e força de arrasto e apresentadas em um gráfico.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1 TÚNEL DE VENTO

Refere-se a um dispositivo de testes para estudo aerodinâmico de corpos e comportamento do escoamento do fluido sobre superfícies, podendo ser em escala real ou utilizando um modelo. Tem a capacidade de promover um fluxo de fluido regulável que possibilita o estudo de diversas situações que podem ocorrer quando o corpo testado estiver em ambiente de trabalho (BARBOSA, 2008). Os vários tipos de túneis de vento são classificados conforme a velocidade de escoamento do fluido, e esses levam como unidade de velocidade o Mach (VINCENSI, 2014 apud NASA, 2014; NÚNEZ, 2012). Como categorias de Túnel, o tipo subsônico trabalha a 0,4 Mach, os transônicos atingem no máximo velocidade 1,2 Mach, os supersônicos onde a velocidade de teste é de até 5 Mach e o tipo hipersônico onde a velocidade de escoamento do fluido pode variar entre 5 e 15 Mach (LARICA, 2003).

Podendo ser classificados em dois grupos básicos, o túnel de vento pode ser um circuito aberto ou fechado. Nos testes de grande escala é utilizado túneis de vento de circuito fechado, Figura 1, devido à conservação de energia e melhor controle do fluxo utilizado no teste, assim gerando maior eficiência na operação e economia. Porém, esse tipo de túnel traz um maior custo de fabricação e dificuldade de projeção por conta de sua grande complexidade, já túneis de vento de circuito aberto apresentam menor complexidade de construção, porém sua velocidade de trabalho é menor e o protótipo apresenta um custo de fabricação inferior em relação ao aberto. Outra classificação se encontra no sentido do fluxo de escoamento do fluido, onde há dois tipos diferentes entre os túneis de vento, que são o soprador e succionador, e essa diferença no sentido do escoamento é importante dependendo da situação que se deseja obter já que no succionador a máquina de fluxo utilizada é o exaustor que é responsável por criar esse escoamento e se encontra no fim do túnel. Já no túnel do tipo soprador, é comum utilizar um ventilador centrífugo. O túnel de vento soprador

consegue atingir velocidades maiores com certa facilidade mas promove um escoamento com maior turbulência, podendo prejudicar alguns parâmetros de medição do teste. Já o túnel de vento succionador tem velocidade de trabalho menor, devido à perda de carga existente na sucção do fluido ao longo do comprimento, porém sua vantagem se dá pelo fato do escoamento ser mais estável e manter regime laminar na câmara de teste (GONZALEZ; AHMED; LIBII, 2015).

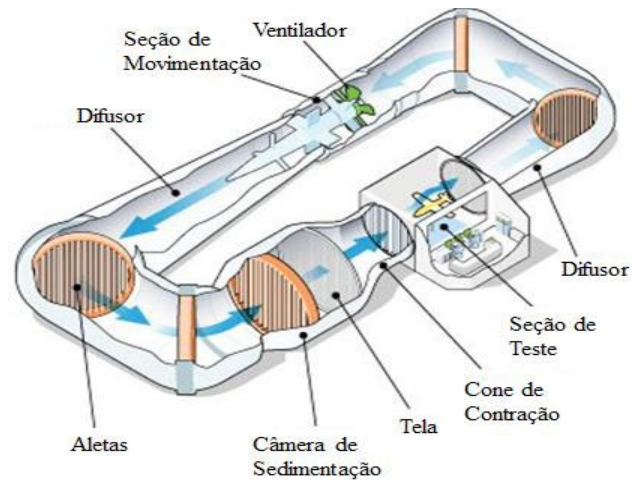


Figura 1 - Exemplo de Túnel de Vento (Circuito Fechado).

Fonte: Site Flatout, 2014.

### 2.2 PERFIL AEROFÓLIO

O aerofólio surgiu a partir da necessidade de se manipular o modo como o ar escoava sob uma superfície e seu formato se assemelha a uma gota d'água, porém ao longo dos anos esse perfil sofreu alterações para ser utilizado de diferentes modos como, por exemplo, em um avião onde esse perfil em uma forma assimétrica, Figura 2, gerando uma força chamada de sustentação que o empurra para cima ao contrário de carro de fórmula 1 que é estudado nesse artigo onde essa mesma força de sustentação o empurra para baixo para evitar que o veículo saia do chão ou perca estabilidade. (WHITE, 2002).

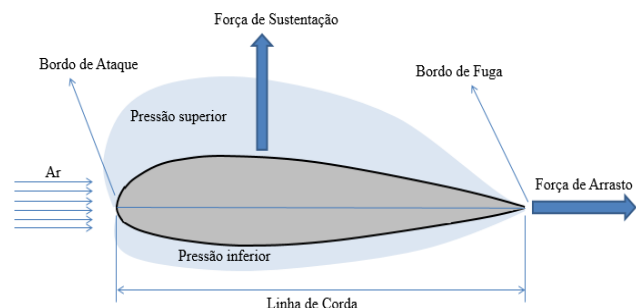


Figura 2 - Perfil Aerofólio.

Fonte: Próprio autor, 2017.

### 2.3 FORÇA DE SUSTENTAÇÃO

A força sustentação é gerada devido à diferença de pressão que ocorre pela superfície do perfil por conta da geometria do mesmo. Utilizando a Figura 2 como exemplo, a parte inferior

do perfil tem menor comprimento, logo o fluido passa com velocidade menor e ocasiona uma menor pressão, criando uma força horizontal impulsionando o perfil para cima, e essa é denominada força de sustentação. Podemos descrever empiricamente a força de sustentação com a Equação 1 (BRUNETTI, 2008; FOX et al, 2014).

$$F_l = \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot A_c \cdot C_l \quad (1)$$

Onde:

$F_l$  = força de sustentação [N]

$A_c$  = área de contato [m]

$C_l$  = coeficiente de sustentação [adimensional]

$V$  = velocidade [m/s]

### 2.4 FORÇA DE ARRASTO

Quando um corpo está submerso em um fluido e um dos dois está em movimento é gerado forças agindo em ambos. Uma dessas forças é chamada de arrasto (do inglês Drag), ocorrendo no sentido do escoamento, ela age sobre o corpo fazendo-o frear e dificultando seu deslocamento, para menores ações da força de arrasto é necessário ter formas geométricas mais arredondadas assemelhando-se a uma gota, devido ser o perfil com menor arrasto encontrado na natureza, obtendo assim um contato menor entre o fluido e a superfície do corpo (RODRIGUES, 2014).

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot A_c \cdot C_d \quad (2)$$

Onde:

$F_d$  = força de sustentação [N]

$A_c$  = área de contato [m]

$C_d$  = coeficiente de sustentação [adimensional]

$V$  = velocidade [m/s]

A área de contato do fluido com o perfil aerodinâmico é descrita pelo produto da corda e espessura do perfil. A Figura 3 exemplifica a área de contato do perfil relacionando-o com o coeficiente de arrasto.

$$A_c = c \cdot t \quad (3)$$

Onde:

$A_c$  = área de contato [m]

$c$  = comprimento de corda [m]

$t$  = espessura [m]

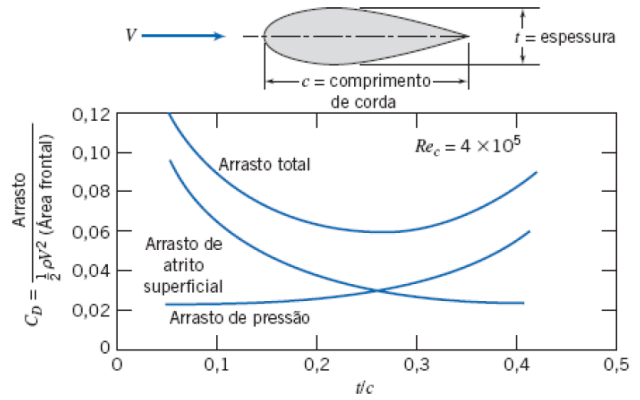


Figura 3 - Área de contato do perfil e gráfico do coeficiente de arrasto. Fonte: Fox et al, 2014.

### 2.5 MODELO E PROTÓTIPO

Nos túneis de vento, na maioria das vezes são utilizados modelos para reproduzir testes, onde o modelo é a representação em escala do protótipo que se deseja construir. Para definição desses modelos é necessário se fazer um estudo da relação da mudança de escala com a influência nas variáveis do estudo, logo temos que adotar uma relação entre um número adimensional para o modelo e protótipo. Este adimensional a ser relacionado para o dimensionamento será o número de Reynolds, que descreve o nível de agitação de um escoamento do fluido e possibilita definir o tipo de escoamento. Com a Equação 4 é possível calcular o número de Reynolds e a Equação 5 faz relação entre o modelo e protótipo, tendo que índices “m” e “p” representam modelo e protótipo, respectivamente. (BRUNETTI, 2008).

Para termos a relação de variáveis entre modelo e protótipo inserimos a Equação 4 na Equação 5. faz relação entre o modelo e protótipo, tendo que índices “m” e “p” representam modelo e protótipo, respectivamente. (BRUNETTI, 2008).

$$Re = \frac{V \cdot x}{\nu} \quad (4)$$

$$Re_m = Re_p \quad (5)$$

Onde:

$Re$  = número de Reynolds [adimensional]

$V$  = velocidade [m/s]

$x$  = componente de comprimento característico [m]

$\nu$  = viscosidade cinemática [m<sup>2</sup>/s]

Para termos a relação de variáveis entre modelo e protótipo inserimos a Equação 4 na Equação 5.

$$\frac{V_m \cdot X_m}{\nu_m} = \frac{V_p \cdot X_p}{\nu_p} \quad (6)$$

O modelo terá uma redução de escala de 1:2, onde sua envergadura será de 0,5 m e largura de 0,075 m. Porém, para desenvolver um protótipo mais compacto e tornar o uso experimental mais viável, foi utilizado um fator de correção nos testes de 2,5 e a envergadura do modelo foi dividida pelo valor deste fator, chegando à uma envergadura de teste de 0,2 m e o valor obtido de força de sustentação deve ser multiplicado por este fator de correção. Tanto no modelo quanto no protótipo o fluido utilizado será o ar na mesma altitude, e a viscosidade cinemática da Equação 6 pode ser desconsiderada, e foi a redução de escala como a relação de comprimento característico.

$$V_m \cdot X_m = V_p \cdot X_p \quad (7)$$

Isolando a velocidade do modelo da Equação 7, encontramos a Equação 8 que possibilitou encontrar a velocidade necessária do fluido para simular uma situação semelhante a real, que é de 11,11 m/s.

$$V_m = V_p \cdot \frac{X_p}{X_m} \quad (8)$$

Como mostrado anteriormente, quando há uma diferença de pressão no perfil uma força de sustentação é criada e sua intensidade depende da geometria do perfil e do ângulo que está posicionado, porém nos carros queremos que essa força de sustentação esteja com sentido direcionado para baixo, que se denomina sustentação negativa e esta força mantém o carro em contato com solo e aumenta sua estabilidade, além de impedir que ele saia do chão.

O perfil selecionado para estudo foi o NACA 23015, que é um perfil padronizado e que proporciona muita sustentação devido a sua geometria, Figura 4, tendo 0,009 m de espessura.



Figura 4 - Perfil NACA 23015.  
Fonte: Adaptado do site Airfoiltools, 2017.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MÉTODOS DE ENSAIO

Durante o desenvolvimento do projeto do Túnel de Vento foi construído um sistema de medição utilizando balanças com 1 g de precisão, para que fosse possível suprir a necessidade de se ter um equipamento para medições aerodinâmicas com resultados satisfatórios, onde por conta da escala reduzida, não há grande força a ser medida. Para realização dos testes foi utilizado dois modelos de perfil aerodinâmico, onde um tem a inclinação do ângulo de ataque à 0º (graus), e outro com a inclinação a 15º (graus), simulando aviões em altitude e velocidade de cruzeiro, e aviões em situação de decolagem, respectivamente (SILVA et. al., 2017).

#### 3.1.1 FORÇA DE SUSTENTAÇÃO

A força de sustentação foi medida utilizando um modelo ligado à balança por uma haste rígida próxima ao centro de massa e com área transversal mínima para que não haja grandes influencias no escoamento de ar, conforme Figura 5. Para a medição foi utilizado a tara da balança zerando a medição inicial, após o início do escoamento, é gerada uma força de sustentação tendendo elevar o perfil, e com isto a balança será puxada para cima pela haste fazendo a medição da força de sustentação, porém como está no sentido inverso a utilização comum da balança o resultado é apresentado com um sinal negativo no visor da balança, este valor mostrado é a força de sustentação do modelo em gramas que foi gerada pelo escoamento do fluido sobre o perfil (SILVA et. al., 2017).

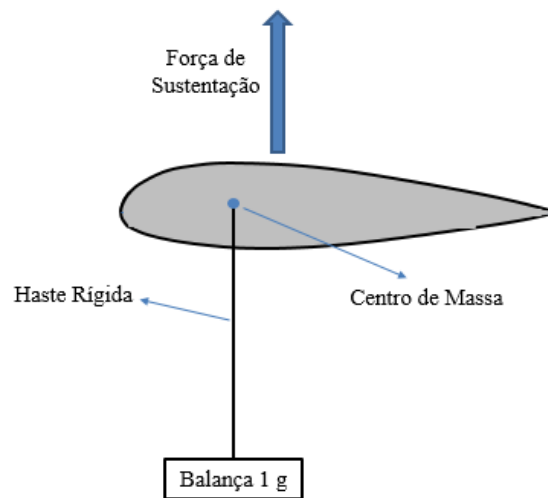


Figura 5 - Sistema medição da força de sustentação.  
Fonte: Próprio autor, 2017.

#### 3.1.2 FORÇA DE ARRASTO

Utilizando mesmo conceito do teste anterior, porém tendo uma haste em formato de “L” para transmitir a força de arrasto na direção vertical possibilitando a medição pela balança em contato com a haste. O modelo utilizado é o mesmo do teste anterior, pois as hastes são fixadas de forma não permanente, possibilitando ligar o modelo a outra balança. Quando o escoamento do ar inicia, tem-se o surgimento da força de arrasto sobre o modelo o empurrando para trás e este movimento é transmitido pela haste que é fixada por uma articulação promovendo força sobre a balança e fazendo a medição da força de arrasto em gramas, Figura 6 (SILVA et. al., 2017).

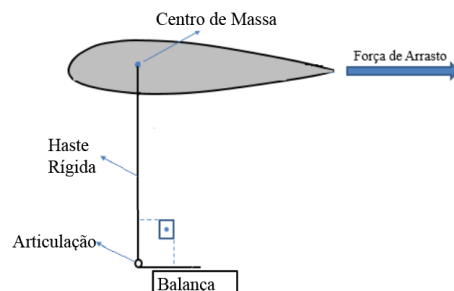
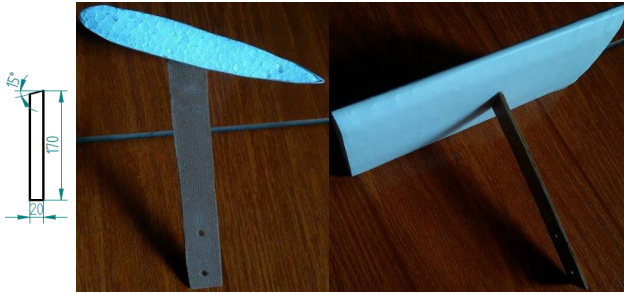


Figura 6 - Sistema medição da força de arrasto.  
Fonte: Próprio autor, 2017.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema de medição se baseia na transmissão das forças de sustentação e arrasto por chapas rígidas até a balança de medição, e para isto são utilizadas chapas de 3 mm de espessura. Ao modelo é fixado uma chapa com um ângulo de 15° (graus) para manter o modelo na situação de ganho de altitude ou decolagem, e outro a 0o (graus) simulando voo linear onde não altera a altitude, conforme a Figura 7, e esta chapa é fixada a outra ligada à balança de acordo com o teste que é realizado.



**Figura 7 - Modelo montado.**  
Fonte: Próprio autor, 2017.

##### 4.1 MEDIÇÃO DE FORÇA DE SUSTENTAÇÃO

A medição da força de sustentação foi feita utilizando a ligação de uma chapa à balança e a fixação da mesma ao modelo montado por dois parafusos com porcas borboletas, conforme Figuras 8 e 9, que mostram a medição utilizando o perfil a 15° (graus).



**Figura 8 - Força de sustentação - montagem.**  
Fonte: Próprio autor, 2017.



**Figura 9 - Sistema de medição – sustentação.**  
Fonte: Próprio autor, 2017.

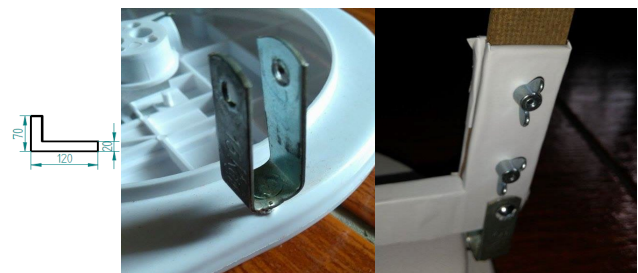
A figura 10 mostra o sistema parado indicando a medição de 0 gramas, e quando sistema está em funcionamento, mede 19 gramas que foram gerados pela força de sustentação do modelo, levando em consideração que massa do modelo é de 9 gramas que foi desconsiderado pela tara da balança.



**Figura 10 Força de sustentação - Resultados.**  
Fonte: Próprio autor, 2017.

##### 4.2 MEDIÇÃO DE FORÇA DE ARRASTO

A medição da força de arrasto utilizou uma chapa em “L” fixada ao modelo montado por parafusos com porcas borboleta e um eixo fixo para promover a articulação desta chapa, transferindo a força de arrasto do modelo para a balança, conforme Figuras 11 e 12 que demonstram a medição utilizando o perfil a 15° (graus).



**Figura 11 - Força de arrasto - montagem.**  
Fonte: Próprio autor, 2017.



**Figura 12 - Sistema de medição – arrasto.**  
Fonte: Próprio autor, 2017.

A figura 13 mostra o sistema parado indicando a medição de 0 gramas, e quando sistema está em funcionamento, mede 9 gramas que foram gerados pela força de arrasto do modelo.



**Figura 13 Força de arrasto - Resultados.**  
Fonte: Próprio autor, 2017.

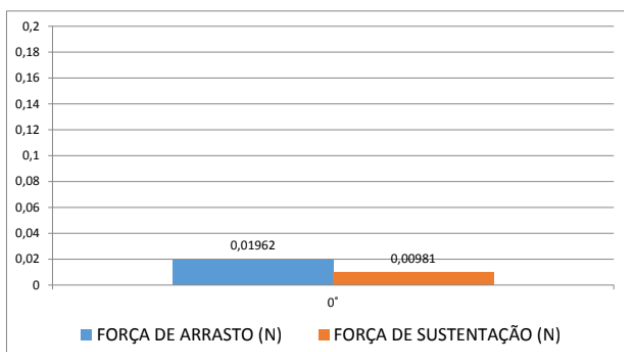
Como as medições foram feitas utilizando balanças que medem peso e informam a massa equivalente ao peso, foi necessário realizar uma conversão para obter a força aplicada na balança, onde é necessário multiplicar o valor da massa demonstrado no visor da balança pelo valor da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>). Os resultados das forças de sustentação e arrasto gerados no modelo em teste estão demonstrados na Tabela 1 e ilustrados nos gráficos 1 e 2.

**Tabela 1 – Resultados das Medições.**

Ângulo de Inclinação (graus)	Massa de Arrasto (g)	Massa de Sustentação (g)	Força de Arrasto (N)	Força de Sustentação (N)	Força de Arrasto (N)	Força de Sustentação (N)
0°	2	1	0,01962	0,00981	1,7658	0,8829
15°	9	19	0,08829	0,18639	7,9461	16,7751

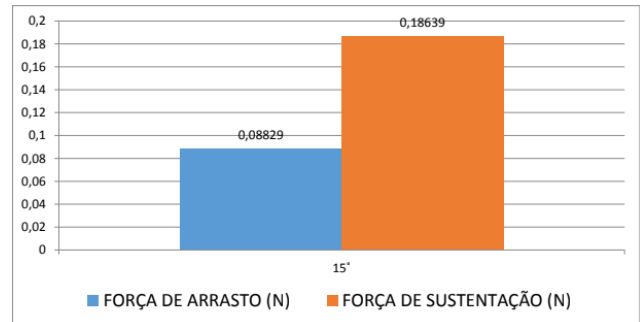
Fonte: Próprio autor, 2017.

**Gráfico 1 – Resultados Perfil 0° (graus).**



Fonte: Próprio autor, 2017.

**Gráfico 2 – Resultados Perfil 15° (graus).**



Fonte: Próprio autor, 2017.

É possível visualizar que quando o ângulo de ataque tem um aumento, a força de sustentação aumenta de maneira abrupta e também temos um leve aumento da força de arrasto devido a mudança de geometria da área de contato com fluxo de ar, logo, as medições estão coerentes com a teoria.

## 5. CONCLUSÃO

Conclui-se que foi possível a medição das forças de arrasto e de sustentação de um modelo aerodinâmico com um túnel de vento didático para fins acadêmicos, de maneira satisfatória, onde foi possível visualizar de maneira pratica todo o tema abordado em teoria nas salas de aulas, com foco em aerodinâmica através de ensaios práticos que foram realizados com o túnel de vento como um material paradidático.

Por ser um túnel de vento simples que visando apenas experimentos didáticos onde não é necessária precisão de medição como nos casos de túneis utilizados para calibração de anemômetros por exemplo, e com baixo nível de complexidade, o túnel de vento pode sim ser um material paradidático com inserção viável para utilização em salas de aula, promovendo um ponto de vista mais amplo ao aluno quanto à matéria abordada, além de influenciar quanto ao interesse por conta de ser algo visível e palpável.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, Tarsis Prado. **Túnel de Vento para Ensaio de Componentes**. 2008. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

FOX, Robert Willian et. al. **Introdução a Mecânica do fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2014.

GONZALEZ, Miguel Angel; AHMED, Noor; LIBII, Josué Njock. **Wind Tunnel Designs and their Diverse Engineering Applications**. 2. ed. Cranfield - Uk: N. A. Ahmed, 2015.

LARICA, Neville Jordan. **Design de Transportes: Arte em Função da Mobilidade**. Rio de Janeiro: 2ab, 2003. 216 p.

RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda José. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE-AERODESIGN: Aerodinâmica e Desempenho**. Salto: Edição do Autor, 2014. 319 p. Disponível em: <<http://www.engbrasil.eng.br/livros/v1.pdf>>. Acesso em: 06 maio 2017.

SILVA, Allan José da et. al. **Túnel de Vento: Aplicação no Ensino**. 2017. 95 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas - Icet, Universidade Paulista - Unip, Sorocaba - Sp, 2017.

VINCENSI, Augusto. **Dimensionamento de um Túnel de Vento Subsônico**. 2014. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2014.

WHITE, Frank. **Mecânica dos Fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Mcgraw-hills, 2002.