

**Curso: Ciências Aeronáuticas**

**Equipe:**

Professor Coordenador/Orientador: **Marcos Antonio Barros Santos**

**Alunos:** Diogo Filgueiras Emerenciano

Emilly Karine Lira Torres

Thiago Silva Barros

**CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO SUBSÔNICO DE CIRCUITO  
ABERTO PARA UTILIZAÇÃO EM SALA DE AULA: UM ESTUDO DE CASO**

**Relatório de Pesquisa**

**Campina Grande**

**2014**

**MARCOS ANTONIO BARROS SANTOS**

**CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO SUBSÔNICO DE CIRCUITO  
ABERTO PARA UTILIZAÇÃO EM SALA DE AULA: UM ESTUDO DE CASO**

Relatório de pesquisa apresentado ao Núcleo de Pesquisa e de Extensão (Nupex) do Centro de Ensino Superior e Desenvolvimento (Cesed) de acordo com o que preconiza o regulamento.

**Campina Grande**

**2014**

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>8</b>
2.1 Perfil histórico .....	8
2.2 Descrição Matemática do Teorema .....	13
2.3 Aplicabilidades do Teorema de Bernoulli .....	14
2.3.1 Tubos de Pitot .....	15
2.3.2 Tubos de Venturi .....	18
2.3.2.1 Clássico (longo e curto).....	21
2.3.2.2 Retangular.....	22
2.4 Túneis de Vento.....	23
2.4.1 Tipos e características.....	25
2.4.2 Construção de um túnel de vento subsônico de circuito aberto e didático.....	26
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
3.1 Pesquisas qualitativas .....	32
3.2 Estudos de caso .....	33
3.3 Documentos.....	34
<b>4. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>36</b>
4.1 Geradores de Vórtices .....	37
4.1.1 Discussão dos resultados .....	43
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>48</b>
<b>ANEXOS: .....</b>	<b>.....</b>

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo mostrar as especificações de um túnel de vento, desde a descrição de sua estrutura, tipo de fluido que o percorre, até a análise de alguns parâmetros aerodinâmicos. Especificamente, este trabalho termina por contemplar também as aplicações de um túnel de vento, tomando como referência a sua importância para o estudo de conceitos aerodinâmicos, presentes nas disciplinas Teoria de voo e Aerodinâmica. Além disso, ousamos trilhar sobre os aspectos históricos que aprofundaram os estudos relacionados ao comportamento de um fluido movendo-se ao longo de uma linha de corrente. Nessa perspectiva, o livro *Hydrodynamica* (1738) do Professor Daniel de Bernoulli, físico que originalmente estudou esse comportamento e suas aplicações, nos abastece de informações que não encontramos em livros técnicos de aviação. Este trabalho situa-se no âmbito de uma pesquisa de extensão em que, notadamente, verificamos a influência dos geradores de vórtices em um protótipo de asa assimétrica, com vistas a contemplarmos um acréscimo na força de sustentação, fato esse verificado discretamente em nossas experiências.

Palavras-chave: Teorema de Bernoulli. Túnel de Vento. Gerador de vórtice.

## 1 INTRODUÇÃO

A escolha do tema desta pesquisa está diretamente relacionada a situações vivenciadas ao longo da nossa vida estudantil e das nossas atividades como graduando da Escola Superior de Aviação Civil – ESAC, especificamente, no curso de Bacharelado em Ciências Aeronáuticas. Durante a nossa formação, tivemos a oportunidade de discutir os fundamentos básicos da Aerodinâmica e em função das suas fortíssimas abstrações matemáticas, o que nos foi apresentado resumia-se apenas aos aspectos teóricos, com um forte apelo à resolução de questões, e sem nenhuma aplicabilidade prática em que fosse possível vislumbrar os aspectos que estudávamos nas diversas disciplinas, a exemplo de Teoria de Voo, Navegação Aérea e Aerodinâmica.

Durante o desenvolvimento da nossa pesquisa, várias referências bibliográficas lidas (GORECKI, 1988; ÉGEA, 2001; MATOS, 2006) apontavam, de forma significativa, para uma percepção estéril e superficial por parte dos alunos e pilotos dos cursos de Bacharelado em Ciências Aeronáuticas no Brasil e fora dele, acerca dos conceitos aerodinâmicos fundamentais e da aplicabilidade necessários à sua compreensão. Essas pesquisas indicavam que os maiores obstáculos à compreensão dessa teoria eram de dois tipos: um consistia na dificuldade dos alunos em “observar teoricamente” os fenômenos aerodinâmicos, orientados conceitualmente, sem que os aspectos experimentais lhes fossem compatíveis; e o outro correspondia aos aspectos matemáticos, que, de certa forma, desencorajavam os futuros pilotos a tentarem inserir tópicos dessa natureza em suas profissões. Assim, na tentativa de amenizar esses obstáculos à formação de um piloto, este trabalho de pesquisa tem o seguinte objetivo geral:

- Projetar, dimensionar e construir um túnel de vento subsônico didático, para análise e interpretação de alguns conceitos aerodinâmicos.

Especificamente, este trabalho visa:

- Mostrar a contribuição de micros geradores de vórtices no aumento da sustentação.

A busca por esses princípios teóricos, relevantes à formação de um Bacharel em Ciências Aeronáuticas, levou-nos a entender que o ensino de disciplinas ligadas às ciências exatas, em especial na aviação, vem se desenvolvendo em um ritmo muito acentuado, no qual as exigências de projetos didáticos inovadores são cada vez mais necessárias e significativas. No campo da mecânica dos fluídos, mais especificamente aerodinâmica, não é diferente. Nesse contexto, é de suma importância o desenvolvimento de um instrumento que possibilite a concretização de tamanha tarefa.

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. No segundo capítulo, aqui chamado de fundamentação teórica, ousamos trilhar por aspectos históricos e conceituais necessários ao entendimento dos parâmetros que usaremos nos experimentos com o túnel de vento. Assim, para aproveitar inteiramente as vantagens que um túnel de vento pode oferecer, é necessário primeiramente ter conhecimentos de aerodinâmica e sua evolução histórica, tomando como base documentos primários, a exemplo do livro *Hydrodynamica* (1738) do Professor Daniel de Bernoulli, que nos mostra de forma significativa os grandes avanços proporcionados no entendimento dessa ciência. Além dessa abordagem, buscamos entender a evolução histórica e experimental dos túneis de vento construídos ao longo dos anos, suas dificuldades iniciais, seus objetivos, seus ganhos teóricos etc.

No terceiro capítulo, chamado de metodologia, usamos uma abordagem do tipo qualitativa, como ferramenta interpretativa e descritiva. Dentro desse contexto, buscamos no estudo de caso, a condição primordial com a qual passeamos entre aspectos teórico e prático, usando de ferramentas peculiares a essa abordagem, a exemplo da pesquisa documental a partir de leituras em originais, explorando a evolução da aerodinâmica e dos túneis de vento.

No quarto capítulo, chamado de revisão de literatura temos uma discussão reservada a respeito do assunto norteador por nosso objetivo específico. Como se trata de um trabalho de pesquisa, com um ano de estudo, em que contamos com a participação de três alunos de iniciação científica, fez-se necessário a contemplação de três assuntos distintos, que pudessem ser

extraído da aplicação do túnel de vento, que como vemos é o nosso principal objetivo para a conclusão deste trabalho. Ou seja, o que expusemos neste capítulo, remete a uma pesquisa concebida a partir do uso do túnel de vento. Vale acrescentar que, neste capítulo tratamos dos geradores de vórtices, e nossas discussões pairam sobre o seu uso e a sua aplicabilidade no protótipo de asa usada nas experiências.

Por último, no capítulo da conclusão, expomos nossas considerações, baseadas em nossas pesquisas, tomando sempre como foco o uso do túnel de vento como ferramenta didática na exploração e prática conceitual de assuntos inerentes as disciplinas de Teoria de Voo, Navegação Aérea e Aerodinâmica. Ainda neste capítulo, indicamos outras pesquisas que poderão ser conduzidas, a posteriori, com o uso do Túnel de Vento.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Perfil histórico

Para apresentarmos uma discussão sobre a famosa equação de Bernoulli ou o teorema de Bernoulli, como ficou conhecida, usamos sua bibliografia original, com textos retirados do livro *Hydrodynamica* (1738).



Figura 1 - Daniel de Bernoulli (1700-17820)

Matemático e físico suíço nascido em Gröningen, Países Baixos, outro dos membros da famosa família de matemáticos de Basileia. É tido na história da hidráulica como o responsável pela dedução do famoso princípio de Bernoulli para fluidos em movimento, fundamental para o desenvolvimento da hidrodinâmica. Filho de um famoso professor de matemática e física suíço, Johann Bernoulli I (1667- 1748), quando este foi por dez anos professor na Holanda. Juntamente com o pai do qual era aluno, chegou a publicar um trabalho sobre órbitas planetárias. Era sobrinho de Jacob Bernoulli I (1654-1705) e irmão de mais dois matemáticos famosos, Nicolaus II (1695-1726) e Johann Bernoulli II (1710-1790). Pertencente a quarta geração de criadores da Física-Matemática, juntamente com o alemão Leonard Euler (1707-1783) e os franceses Alexis Claude Clairaut (1713-1765) e Jean le Rond d'Alembert (1717-1783). Introduziu o termo hidrodinâmica (1730) dentro da qual publicou muitos trabalhos.

Foi professor de matemática e membro da Academia de São Petersburgo e, quando deixou a Rússia (1733), tornou-se professor em Basileia. Também foi um dos sócios estrangeiros eleitos para a Académie des Sciences de Paris, na qual, ao longo de sua vida, ganhou dez prêmios, o primeiro deles quando tinha 24 anos de idade, apresentando um projeto de um instrumento para medição do tempo no mar. Também fez sucesso com problemas e teorias no campo das probabilidades. Curiosamente foi um solteirão convicto, não deixando filhos, e morreu em Basel, Suíça.

Embora na história da hidráulica seja tradicionalmente lembrado pela dedução da fundamental equação para fluidos em movimento, seu famoso livro *Hydrodynamica* (1738), tratado original publicado em Estrasburgo, contém muitas novidades, como por exemplo, o uso de manômetros, a teoria cinética de gases, e a propulsão a jato, mas em nenhuma parte dele aparece explicitamente o que hoje é conhecido como o teorema de Bernoulli. Na verdade, há um estudo sobre o princípio de energia de Leibniz, relacionando as parcelas de energia potencial (hipsocarga) e cinética (taquicarga). O termo de pressão correspondente (piezocarga) foi avaliado separadamente por meio da equação de impulso de Isaac Newton (1642-1727). Na realidade, a primeira verdadeira equação de Bernoulli foi derivada por Leonard Euler (1707-1783), um extraordinário matemático germânico, vista em papéis sobre equações de aceleração para condições estacionárias de fluxo sob a ação da gravidade<sup>1</sup>. Euler também mereceu crédito para várias outras equações da hidráulica e por projetar, pelo menos no papel, uma turbina hidráulica executável.

Radicada em Basileia, Suíça, a família Bernoulli (ou Bernouilli) tem um papel de destaque nos meios científicos dos séculos XVII e XVIII: dela descendem nada menos que dez cientistas eminentes, que revolucionaram a Física e a Matemática do período. Pela diversidade e profundidade de seus trabalhos, Daniel de Bernoulli - simultaneamente filósofo, físico, fisiologista, médico, botânico e matemático - é considerado por muitos o mais brilhante representante dessa família excepcional.

---

<sup>1</sup>Principes généraux de l'état d'équilibre des fluides, Principes généraux du mouvement des fluides e Continuation des recherches sur la théorie du mouvement des fluides, publicados em *Histoire de l'Académie de Berlin* (1755)

Aos treze anos, Daniel já iniciava seus estudos de Filosofia e Lógica, completando o curso colegial em dois anos. Durante esse período, ele recebeu ensinamentos de Matemática de seu próprio pai e, especialmente, do irmão mais velho, Nikolaus. O verdadeiro desejo familiar, entretanto, era encaminhá-lo para a carreira de comerciante. A insistência de Daniel, porém, levou Johann a autorizar sua inscrição no curso de Medicina, primeiramente em Basiléia, depois em Heidelberg e Estrasburgo. Somente em 1720 ele retornaria à Suíça, obtendo o doutorado no ano seguinte, com uma dissertação intitulada *De Respiratione*.

Após a conclusão do curso, não encontrando, imediatamente, um posto na Universidade de Basiléia, Daniel resolveu juntar-se ao irmão Nikolaus, em Veneza, onde este último continuava seus estudos de Medicina com Pietro Antonio Michelotti. Também desejava trabalhar com G. B. Morgagni, em Pádua, mas não pôde realizar essa vontade devido a uma doença grave. Nessa época, publicou seu primeiro trabalho, as *Exercitationes Mathematicae*, chamando a atenção dos meios científicos. A obra contém quatro trabalhos diversos, estudando, sucessivamente, jogos de azar, a queda da água de recipientes abertos, a equação de Riccati (equação diferencial cuja solução não pode, em geral, ser reduzida a integração - motivo porque despertou a curiosidade dos matemáticos) e as figuras limitadas por dois arcos circulares. Nesse trabalho já se demonstrava o talento especial de Daniel para a Física, a Mecânica e a tecnologia, usando a Matemática como suporte. Seu sucesso resultou num convite, para lecionar na Academia de São Petersburgo, na Rússia, para onde ele partiu, em 1725, com Nikolaus. No mesmo ano, ganhou o prêmio da Academia de Paris, o primeiro de uma série de dez lauréis que lhe foram conferidos por essa entidade.

A estada de Daniel em São Petersburgo deixou-lhe amargas lembranças. Além de perder o irmão mais velho, que tanto influenciara sua formação, sofreu bastante com os rigores do clima. Por isso, solicitou três vezes uma cadeira na Universidade de Basiléia, que só obteve em 1733, passando a dirigir o departamento de Anatomia e Botânica.

Na Rússia, entretanto, sua produção intelectual foi extremamente rica, principalmente depois de 1727, quando trabalhou com outro grande cientista: Leonhard Euler. Seus estudos dessa época incluem escritos em Medicina, Matemática e Ciências Naturais (especialmente Mecânica), geralmente independentes um do outro, embora simultâneos. Assim, em 1728, publicou uma teoria mecânica da contração muscular. Também realizou pesquisas sobre o nervo óptico e o trabalho mecânico do coração, além de abordar questões de Fisiologia, como o cálculo da quantidade máxima de trabalho realizada pelo homem.

Seu verdadeiro interesse, porém, situava-se nos campos da Física e da Matemática e, já nessa época, ele completava o esquema de sua obra mais marcante, a Hidrodinâmica - importante estudo de mecânica dos fluidos -, além de realizar um trabalho sobre oscilações e um tratado original da teoria da probabilidade.

Em 1733 retornou à Basiléia, junto com o irmão mais novo, Johann, que também se radicara em São Petersburgo. Aproveitou a viagem para visitar várias cidades europeias, sendo bem recebido no mundo científico.

Novamente instalado na Suíça, Daniel entregou-se às suas aulas de Medicina, sem abandonar, porém, os estudos de Matemática e Mecânica, sua verdadeira paixão. Publicou vários artigos e completou a Hidrodinâmica (em 1734), que só publicou em 1738.

A mecânica dos fluidos divide-se em duas partes: a hidrostática, que estuda o equilíbrio dos fluidos, e a hidrodinâmica, que estuda seu movimento. A primeira nasceu com Arquimedes - de cuja obra Daniel Bernoulli é considerado um continuador -, mas recebeu um estudo sistemático somente no final do século XVII, com Stevin e Pascal. Já os fundamentos da dinâmica dos líquidos surgem apenas no século XVIII, principalmente graças a Euler. A dinâmica dos gases apresenta impulso maior na atualidade, por sua aplicação ao voo de aparelhos mais pesados que o ar.

Daniel Bernoulli inspirou-se em Demócrito e Arquimedes para desenvolver as idéias centrais de sua mecânica dos fluidos. Do primeiro ele

tirou a concepção de que a matéria é composta de átomos que se movem rapidamente em todas as direções. Mas foi a partir dos conceitos de hidrostática e mecânica desenvolvidos por Arquimedes, que o matemático suíço estruturou sua hidrodinâmica.

O grande sábio de Siracusa foi o primeiro a assinalar, ainda no século II a.C., que os fluidos não guardam espaços vazios entre si, apresentando-se, portanto, macroscopicamente contínuos e uniformes.

O norueguês Stevin, contemporâneo de Galileu, estudou a distribuição das pressões nos líquidos em equilíbrio, complementando e sistematizando o estudo do princípio de Arquimedes. Não se sabe se Blaise Pascal (1623-1662) tinha conhecimento do trabalho de Stevin, mas ele completou e confirmou seus resultados, assinalando como a transmissão das pressões a todos os pontos de um líquido em equilíbrio podia ser aproveitada na prensa hidráulica.

Foi Torricelli quem se preocupou primeiro com os problemas suscitados pelo movimento dos fluidos. Talvez o conjunto de estudos que realizou sobre o escoamento de um líquido por um orifício seja uma de suas mais importantes obras, apesar de relativamente pouco conhecida. A chave da interpretação das peculiaridades do movimento dos fluidos ideais, porém, foi dada no Tratado de Hidrodinâmica, que Daniel Bernoulli publicou em Estrasburgo, em 1738.

No primeiro capítulo do seu livro, ele principia com uma breve história da Hidráulica, seguida de pequena apresentação da Hidrostática. Mas, nos treze capítulos, é aos fluidos elásticos - os gases - que Bernoulli dedica a parte mais importante da obra, esboçando uma teoria cinética dos gases. Para ele, esses fluidos são compostos "de minúsculas partículas que se deslocam de cá para lá, numa movimentação rápida" (BERNOULLI, 1738, p.45). A ideia básica de sua teoria cinética é a de que a pressão de um fluido sobre a parede do recipiente que o contém é devida aos inúmeros choques (contra a parede) das pequenas partículas (moléculas) que compõem o fluido. A parede fica sujeita a uma multiplicidade de forças que, em média, correspondem a uma força constante distribuída por toda a superfície em contato com o fluido.

## 2.2 Descrição Matemática do Teorema

O cientista Daniel Bernoulli (1700-1782) propôs um princípio para o escoamento dos fluidos, que pode ser enunciado da seguinte forma:

Se a velocidade da partícula de um fluido aumenta enquanto ela se move ao longo do fluxo do mesmo, a pressão do fluido sobre ela deve diminuir; da mesma forma que, se a velocidade de tal partícula diminuir, verifica-se o aumento da pressão na mesma (BERNOULLI, 1738, p.62).

Pelo exposto, entendemos que o princípio de Bernoulli, também denominado Equação de Bernoulli ou Trinômio de Bernoulli, ou ainda Teorema de Bernoulli, descreve o comportamento de um fluido movendo-se ao longo de uma linha de corrente e traduz para os fluidos o princípio da conservação da energia.

Dentro desse contexto, o autor sugere e expressa que num fluido ideal (sem viscosidade, nem atrito) em regime de circulação por um conduto fechado, a energia que possui o fluido permanece constante ao longo de seu percurso. Essa energia contida no fluido em movimentos, em qualquer momento, é composta de três tipos:

- Cinética: é a energia devida à velocidade com que o fluido se desloca;
- Potencial gravitacional: é a energia devida à altitude que um fluido possui;
- Energia de fluxo: é a energia que um fluido contém devido à pressão que possui.

A seguinte equação conhecida como "Equação de Bernoulli" (Trinômio de Bernoulli) consta destes mesmos termos, vejamos:

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = \text{constante}$$

Onde:

$V$  = velocidade do fluido na seção considerada.

$g$  = aceleração gravitacional

$z$  = altura na direção da gravidade desde uma cota de referência.

$P$  = pressão ao longo da linha de corrente.

$\rho$  = densidade do fluido.

As seguintes convenções precisam ser satisfeitas para que a Equação de Bernoulli se aplique:

- escoamento sem viscosidade ("fricção" interna = 0);
- escoamento em estado estacionário;
- escoamento incompressível (constante em todo o escoamento).

Geralmente, a equação vale a um conduto como um todo. Para fluxos de potencial de densidade constante, ela se aplica a todo o campo de fluxo. A redução na pressão que ocorre simultaneamente com um aumento na velocidade, como previsível pela equação, é frequentemente chamada de princípio de Bernoulli. No contexto dessa explicação, é preciso suscitar a definição de três tipos de pressões (Estática, de Estagnação e Dinâmica).

Segundo a Física, a Pressão Estática é aquela medida quando o fluido não está em escoamento, ou seja, está parado no momento da sua medição. Já a Pressão Dinâmica é aquela medida quando o fluido está em escoamento livre e a pressão de estagnação é a obtida quando um fluido em movimento é desacelerado até a velocidade zero ( $p_0$ ).

## 2.3 Aplicabilidades do Teorema de Bernoulli

Dentro do estudo da hidrodinâmica e tendo em vista a compreensão de alguns parâmetros usados como medidores dinâmicos em túnel de vento, fazem-se necessário que neste capítulo sejam apresentados alguns

instrumentos, cujos conceitos e aplicabilidade deverão fazer parte do uso didático do túnel de vento.

### **2.3.1 Tubos de Pitot**

Tubo de Pitot é um instrumento de medida de pressão utilizado para medir a velocidade de fluidos. Deve o seu nome ao físico francês do século XVIII Henri Pitot. Atualmente, utiliza-se o tubo de Pitot estático para a medição de velocidade local de escoamentos internos ou externos, através da diferença de pressão estática e total.

O tubo de Pitot estático é constituído por dois tubos coaxiais de diâmetros diferentes, curvados em ângulo reto. Uma das extremidades do tubo é colocada à face da corrente, que sente a pressão total, enquanto que a pressão estática é medida através de pequenos orifícios da parede do tubo externo. A diferença entre a pressão total e a pressão estática chama-se pressão dinâmica que é a pressão decorrente da transformação da energia cinética do fluido em pressão [DALMEE, 1983]. Isto é, com a pressão dinâmica pode-se obter a velocidade do escoamento em um ponto de medição qualquer. Vejamos o esquema abaixo:

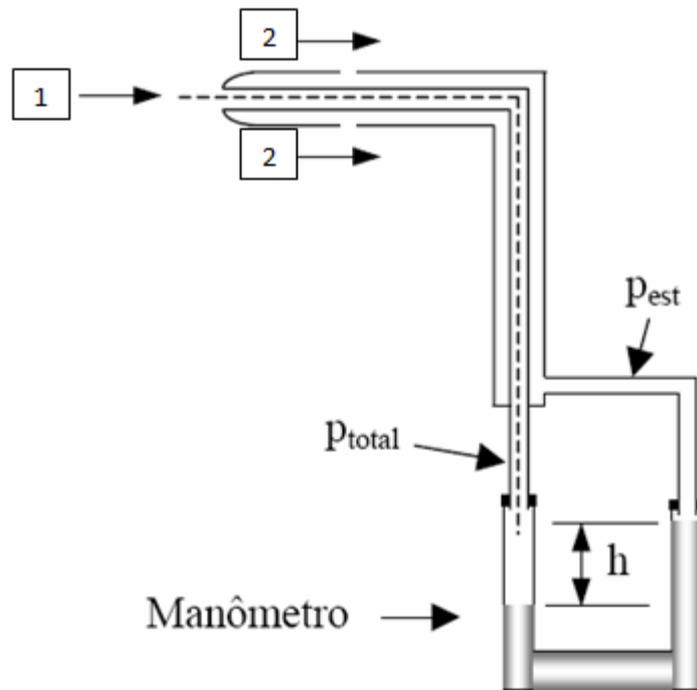


Figura 1

Figura 2 - TUBO DE PITOT - (NUSSENZVEIG, 2003, p.234).

Na figura 2, é possível ver o orifício que sente a pressão total, indicado com o número 1. Os orifícios indicados com o número 2 são os orifícios que medem a pressão estática. Ao conectar o tubo de Pitot a um manômetro, podemos obter a diferença entre a pressão total e a pressão estática, indicada pela altura  $h$ . Com essa diferença de pressão, denominada pressão dinâmica, podemos obter a velocidade do escoamento no ponto desejado.

Ao se introduzir um tubo aberto numa extremidade da corrente de fluido com a abertura orientada na mesma direção, mas em sentidos contrários, de modo que o fluido colida com o orifício. Esse fluido bate e para, convertendo a sua energia cinética em energia de pressão, sendo esta superior à pressão estática. Esta conversão nem sempre é completa, já que certas porções de fluido se desviam ao chocar com o tubo de Pitot.

Deve-se efetuar uma correção introduzindo um coeficiente de tubo de Pitot (C) ao se calcular a velocidade, para que esta ao ser calculado a partir do desnível do manômetro coincida com o real, usando a seguinte correlação:

$$u = C \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

Essa diferença de velocidades depende da forma do tubo de Pitot.

Existem diversos tipos de tubo de Pitot, que dependem da posição das medidas de pressão:

- as medidas de pressão estática e de pressão total encontram-se separadas
- as duas medidas de pressão estão num mesmo tubo

Segundo Nussenzveig (2003), os tubos de Pitot medem a velocidade pontual e não a velocidade média. Para conseguirmos a velocidade média através da medição feita pelo manômetro conectado ao tubo de Pitot temos que utilizar cálculos matemáticos, tabelas ou curvas de calibração. Vejamos:

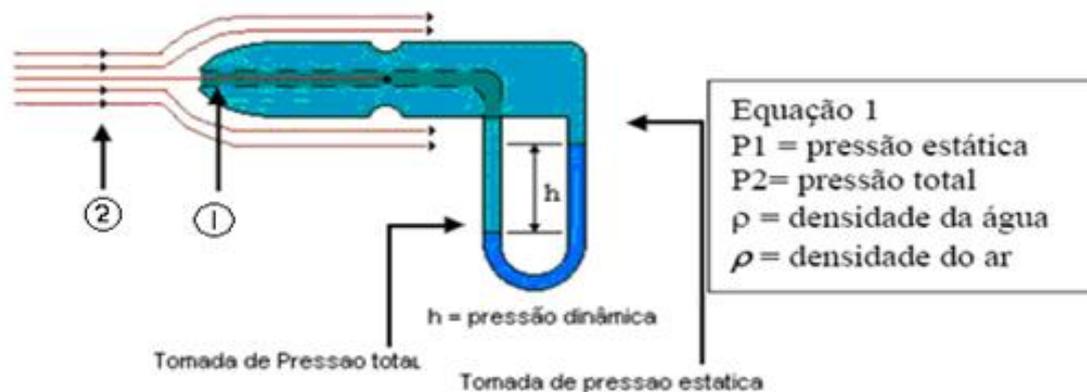


Figura 3 - TUBO DE PITOT - (NUSSENZVEIG, 2003, p.236).

Os resultados numéricos obtidos para velocidade do fluido com tubo de Pitot podem ser demonstrados a partir da equação de Benoulli:

$$P + \rho gh + 1/2 \rho V^2 = cte$$

Considerando que para um ponto de medição não existe variação de altura (h), podemos simplificar a fórmula para:

$$P + 1/2\rho V^2 = cte$$

Logo:

$$\frac{P_1}{\rho} + 1/2V_1^2 = \frac{P_2}{\rho} + 1/2V_2^2 \quad \text{onde, } V_2 = 0$$

$$P_1 + 1/2\rho V_1^2 = P_2 \quad \Rightarrow \quad V_1 = \sqrt{\frac{P_2 - P_1}{2\rho}}$$

Para fluidos compressíveis a equação torna-se um pouco mais complexa:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]} \quad k = CP/Cv$$

CP = O coeficiente de pressão em um ponto do escoamento ou da superfície nas vizinhanças do cilindro e Cv=coeficiente de variação. O coeficiente de variação é uma medida de dispersão que se presta para a comparação de distribuições diferentes.

### 2.3.2 Tubos de Venturi

Segundo Nussenzveig (2003), o tubo de Venturi é um aparelho que foi desenvolvido por ClemmensHerschel, em 1881, que leva o nome de Giovanni Battista Venturi, um filósofo italiano que foi o primeiro hidráulico a experimentar tubos divergentes. Constitui-se em um elemento primário gerador de depressão, uma vez que interage com o fluido com fundamentos físicos diretos,

sem mecanismos intermediários. Sua função é criar uma diferença de pressão  $\Delta p$  que seja relacionada à vazão  $Q$  através de uma equação do tipo:

$$Q = K \cdot \sqrt{\Delta p}$$

Onde o valor da constante  $K$  inclui os parâmetros próprios do elemento primários da configuração física da instalação e das características do fluido medido. Já os elementos secundários são destinados a converter esta pressão diferencial em informação de uso direto.

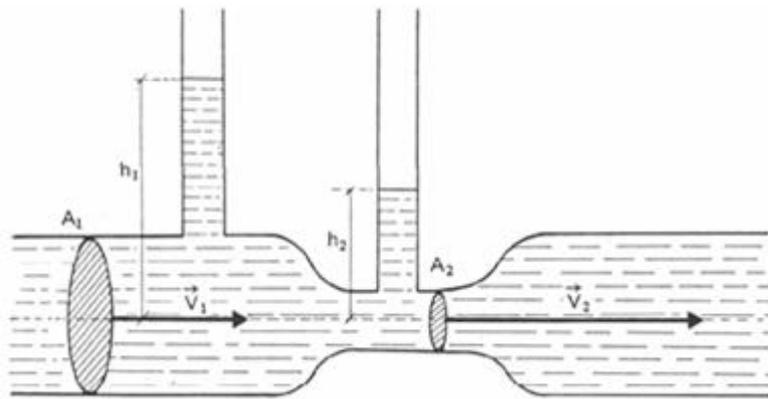


Figura 4 - TUBO DE VENTURI - (NUSSENZVEIG, 2003, p.238).

Pela Equação da Continuidade de hidrodinâmica, que diz que a velocidade do escoamento é inversamente proporcional à área da seção transversal, tem-se:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad \text{Como, } A_1 > A_2$$

Conclui-se que:  $v_1 < v_2$

Usando a equação de Bernoulli tem-se que:

$$p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho g z = cte$$

Tem-se, para um filete de fluido de mesma altura em dois pontos distintos 1 e 2

$$P_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}$$

Como

$$v_1 < v_2$$

Conclui-se que:

Onde A1 e A2 são as áreas das seções retas mostradas na Figura 1, v1 e v2 são as velocidades do fluido nos pontos mostradas na Figura 1, p1 e p2 são as pressões nos pontos mostrados na Figura 1,  $\rho$  é a massa específica do fluido, g é a aceleração gravitacional e z é a altura.

Assim, através das alturas h1 e h2 das colunas do fluido dentro dos tubos de medição, do conhecimento da massa específica  $\rho$  do fluido e do conhecimento das áreas das seções retas A1 e A2 pode-se determinar as pressões p1 e p2 nos dois pontos do tubo e, por conseguinte, a vazão no tubo. Esta vazão é dada por:

$$\dot{V} = C_v \dot{V}_{ideal} = C_v A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - \beta^4)}}$$

Os parâmetros que influenciam o valor de Cv são: a razão entre os diâmetros da garganta e do tubo ( $\beta$ ), o número de Reynolds do escoamento e o formato das seções convergente e divergente do tubo.

O número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Onde D é o diâmetro da tubulação principal e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido.

Os tubos de Venturi são utilizados normalmente em tubulações de grande diâmetro, onde seu preço, mesmo que seja relativamente alto, pode ser compensada por oferecer vantagens sobre outras opções, como durabilidade, baixa perda de carga e trechos relativamente curtos de tubulação para sua montagem.

A Figura 4 ilustra as características construtivas de um tubo de Venturi com os nomes das partes dele. Já a Figura 3 mostra um tubo de Venturi.

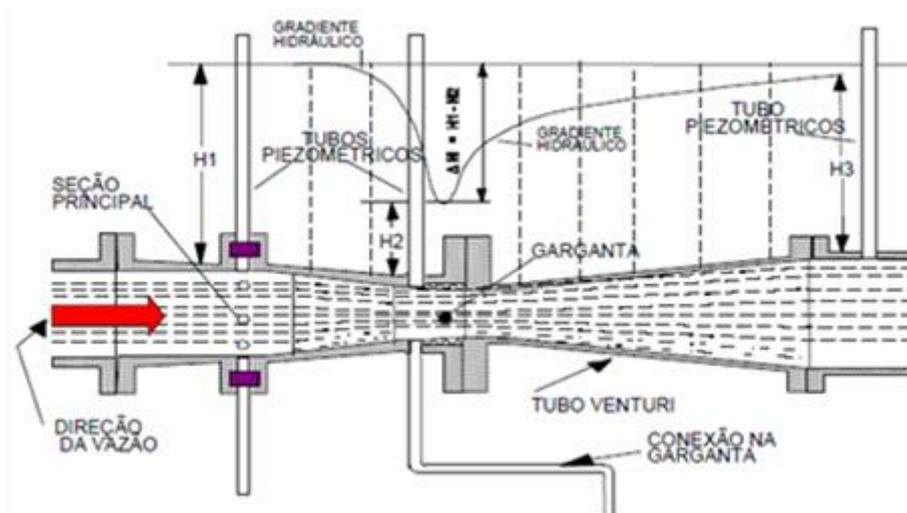


Figura 5 -(COSTA, et al, 2004 , p. 2).

Existem dois tipos de tubo de Venturi disponíveis no mercado:

### 2.3.2.1 Clássico (longo e curto)

O tipo clássico tem configuração circular e é utilizado em dutos circulares, mais comuns em transporte de líquidos e grãos. Ele pode ser longo ou curto.

a) Longo

O difusor aumenta gradualmente até igualar-se ao diâmetro do duto.

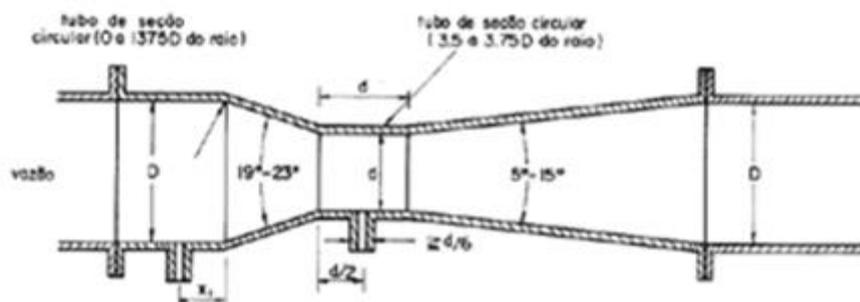


Figura 6 – (COSTA, et al, 2004 , p. 4).

b) curto

O difusor é truncado, não aumenta até o diâmetro do duto.

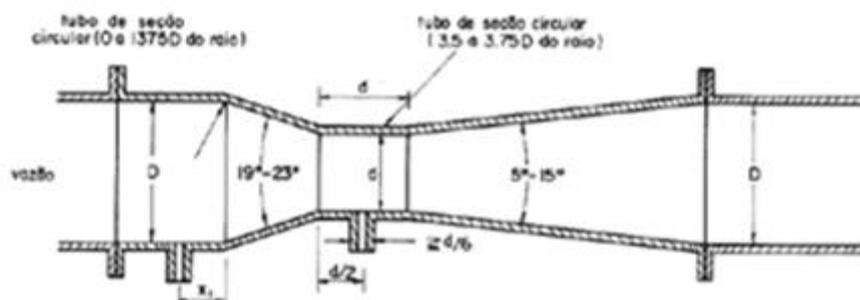


Figura 7 - (COSTA, et al, 2004 , p. 4).

### 2.3.2.2 Retangular.

O tipo retangular é utilizado em dutos de configuração retangular como os utilizados para ar em caldeira a vapor.

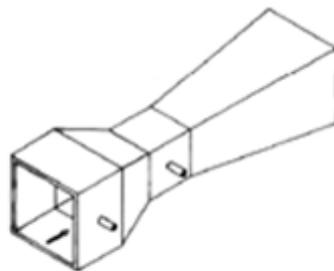


Figura 8 - (COSTA, et al, 2004 , p. 5).

O Tubo de Venturi é amplamente utilizado na medição de vazão em instalações industriais (tratamento de água, condução de gases e produtos corrosivos), funcionamento hidráulico da irrigação na agricultura, medição de ar de combustão de caldeiras, em laboratórios para calibração de instrumentos, etc.

## 2.4 Túneis de Vento

Segundo Santos et al (2012), túneis de vento não são nenhuma novidade. Eles começaram a ser usados no final do século 19 para medir o fluxo de ar em muitas experiências com os primeiros aviões. Até os irmãos Wright (em inglês) tinham um. Depois da Segunda Guerra Mundial, engenheiros ligados a competições automobilísticas começaram a usar túneis de vento, em busca de uma vantagem em relação aos concorrentes, medindo a eficiência dos dispositivos aerodinâmicos de seus carros. Mais tarde essa tecnologia passou a ser empregada em carros de passageiros e de carga.

### Cronograma histórico de desenvolvimento dos Túneis de Vento

DATA	DESCRIÇÃO	DESIGNER CRIADOS	LOCALIZAÇÃO
1871	Primeiro túnel de vento	Frank Wenham	Grã-Bretanha
1897	Túnel russo	KonstantinTsiolkovsky	Rússia
1901	Um túnel de 16 polegadas	IrmãosWright	Dayton, OH Universidade Católica
1904	Túnel russo	DimitriRiabouchinsky	Moscou
1909	Primeiro túnel de loop fechado	Ludwig Prandtl	Universidade de Gottingen
1912	Túneis gêmeos	Gustav Eiffel	Paris, França
1917	Primeiro túnel moderno	Ludwig Prandtl	Universidade de Gottingen
1923	Túnel de Densidade Variável	Max Munk	Langley Field
1927	Túnel Pesquisa	Max Munk	Langley Field
1931	Túnel FullScale	Smith DeFrance	Langley Field
1936	Primeiro túnel supersônico		Peenenemunde
1936	Kirsten túnel de alta Velocidade	William Boeing	Universidade de Wisconsin
1938	Túnel de Altitude		Massachusetts Institute of Technology (MIT)
1939	Túnel velocidade de 19 metros de altura		Langley Field
1942	Primeiro túnel supersônico EUA		Langley Field
1944	AWT	Al Young Lou Monroe	NACA Lewis
1944	40 - pelo túnel de 80 pés	Carl Bioletti	NACA Ames
1948	8 - pelo Túnel de Vento 6-FootSupersonic		NACA Lewis
1955	10 - pelo túnel de vento de 10 pés Supersonic		NACA Lewis
1955	Propulsão Túnel de Vento		AEDC

Tabela 1 - Cronograma histórico de desenvolvimento dos Túneis de Vento

### 2.4.1 Tipos e características

Os túneis de vento são usados para simular o fluxo de ar em laboratórios sob condições controladas. Ele tem-se mostrado de grande utilidade em estudos de micro-meteorologia, tendo como vantagens a facilidade de controlar a realização de medidas através de análises de sensibilidade, bem como custos de realização menores. Geralmente os túneis de vento são formados por ventiladores, tubos para a circulação do ar, corredores para o escoamento e uma área reservada para os ensaios, equipada com uma balança cujos sensores estão conectados a computadores.

Os túneis de vento podem ser classificados com base na velocidade do fluxo de ar na seção de teste e com base na forma.

#### **Com base na velocidade do fluxo:**

Subsônico ou Túneis de Vento de Baixa Velocidade:

Velocidade máxima de fluxo neste tipo de túneis de vento podem ser 135m/s. Fluxo de velocidade em túneis de vento é geralmente preferida em termos de número de Mach, que vem a ser em torno de 0,4 para este caso. Este tipo de túneis de vento é mais rentável, devido à simplicidade do design e baixa velocidade do vento. Geralmente os túneis de vento de baixa velocidade são encontrados em escolas e universidades por causa do baixo orçamento.

Túneis de Vento Transônicos:

A velocidade máxima na seção de teste do túnel de vento transônico pode atingir a velocidade de até 340m/s, ou seja, igual a velocidade do som (número de Mach 1). Estes túneis de vento são muito comuns na indústria aeronáutica pois maioria dos aviões operam em torno desta velocidade.

Túneis de Vento Supersônicos:

Velocidade do ar na seção de teste do túnel de vento como pode ser até Mach 5. Isso é feito usando bocais divergentes. Os requisitos de energia para os túneis de vento, tais são muito elevados.

Túneis de Vento Hipersônico:

Velocidade do vento na seção de teste deste tipo de túneis de vento podem medir entre Mach 5 e Mach 15. Isso também é conseguido usando convergente – bocais divergentes.

#### **Baseado na Forma:**

- **Túnel de Vento de Circuito Aberto:**

Esse tipo de túnel de vento é aberto em ambas às extremidades. As chances de partículas de sujeira entrar com o ar são altas. Podem ser divididos em duas categorias: Túnel Suckdown e Túnel Ventilador.

a) Túnel Suckdown: Com a entrada aberta para a atmosfera, o ventilador axial ou centrífugo é instalado após a seção de teste. Este tipo de túnel de vento não é o preferido porque o ar entra com turbulência significativa.

b) Túnel Ventilador: Um ventilador é instalado na entrada do túnel de vento que joga o ar no túnel. A turbulência é um problema também neste caso, mas os túneis com ventilador são muito menos sensíveis a ela.

- **Túnel De Vento De Circuito Fechado:**

O ar circula no sistema de uma forma regulada. As chances de sujeira que entram no sistema são muito baixas. O fluxo é mais uniforme do que no tipo aberto. A indústria aerodinâmica usa estes túneis de vento para testar modelos de aviões propostos. No túnel, o engenheiro pode controlar cuidadosamente o fluxo, condições que afetam as forças no avião. Ao fazer medições precisas das forças sobre o modelo, o engenheiro pode prever as forças da aeronave. Usando técnicas especiais de diagnóstico, o engenheiro pode entender melhor e melhorar o desempenho da aeronave.

Os túneis de vento são projetados para um propósito específico e faixa de velocidade. Portanto, há muitos tipos diferentes de túneis de vento e várias maneiras de classificá-los.

### **2.4.2 Construção de um túnel de vento subsônico de circuito aberto e didático**

Na construção de um túnel de vento, primeiramente, coletamos algumas informações para cumprir o objetivo principal: ser didático e de fácil

manuseio ao ministrar as disciplinas como aerodinâmica e teoria de voo em sala de aula. Escolhemos, portanto, um túnel de vento de circuito aberto, com o simples motivo de ser fácil para fabricar suas peças e montar. Ele é subsônico, pois ao se utilizar de um túnel com velocidade maior que a do som, precisávamos de matéria prima específica para abafar o barulho do som causado pelo rompimento da barreira do som e, assim, desenvolver ferramentas que possibilitassem tal construção. Dessa forma, precisávamos de mais tempo, maior investimento e pessoal especializado.

Nas páginas seguintes relatamos todos os procedimentos tomados para a fabricação das peças e construção do túnel:

Para iniciarmos a montagem do túnel de vento, primeiramente fizemos um projeto usando papelão, tomando como ideia inicial: área de testes em tamanho real e uma ideia secundária: mini-túnel de vento em escala. Porém, não tínhamos a matéria prima suficiente. Obtivemos mais caixas de papelão, maiores, para montar o túnel de vento com escala de 1:3.

Medidas usadas em cm (com escala):

- Área de testes 10x10x25 cm
- Área do ventilador 23x23x10 cm
- Compressor com área lateral de 23x40 cm e distância horizontal com 10 cm
- Difusor com área lateral de 10x50cm e distância horizontal com 10 cm

Medidas usadas em cm (sem escalas):

- Área de testes 30x30x75 cm
- Área do ventilador (entrada de ar) com 70x70x30 cm
- Compressor com área lateral de 70x120e distância horizontal com 30 cm

- Difusor com área lateral 30x150 cm e distância horizontal com 70 cm
- Foi mostrado ao orientador e as modificações feitas foram:
- Difusor com área lateral de 30x75cm e distância horizontal com 70 cm

O próximo passo ocorreu junto a uma vidraçaria, onde escolhemos, junto ao vidraceiro, o tipo de vidro para a área de testes. Ficou decidido espessura de 6 mm, medidas 30x30x75 cm, valor a vista R\$230,00 com o pagamento de 50% no momento do pedido e 50% na entrega, no cartão em 3x R\$250. A entrega foi realizada em aproximadamente 12 dias. Foi decidida a localização dos furos da área de testes para instalação das tomadas estática e total para fabricação do tubo de Pitot. A porta de acesso foi feita de modo porta-retratos e também de vidro.

Em seguida, fomos à busca do ventilador: Não encontramos um ventilador com pás de hélices medindo 70 cm de diâmetro ou potência suficiente para uma velocidade do vento adequado aos estudos. Finalizando a compra com a empresa VentoTurbo. Valor inicial de R\$690,00, após tirar a malha protetora, esse valor caiu para R\$550, com apenas o motor, hélices e suporte, RPM final de 1735, 45 cm de diâmetro aproximadamente. A instalação se deu fixando o ventilador na mesa para evitar grandes vibrações por causa do torque. O pagamento foi no momento da instalação, 3 anos de garantia. Não vem com manual de uso, apenas panfleto com especificações do motor, ainda assim, sem informações de potência.

Após a escolha do ventilador, saímos à procura da madeira para área do ventilador, duto convergente e difusor. Na empresa madeireira compramos duas placas de MDF brancas de 15 mm medindo 283x185 cm. O preço saiu próximo de R\$174,00. Entramos em contato com o marceneiro que aceitou o serviço incomum. Foi explicado como seria o túnel, juntamente com o desenho. Foram cobrados R\$200,00 pelo serviço. Com o que sobrou das madeiras foi realizado a construção de dois suportes para o difusor medindo 20 cm de altura com 45 cm de comprimento. Compradas às madeiras, tivemos de procurar um

carro para entregar as madeiras ao marceneiro, cobrando R\$30,00 pelo frete. Nos 15 dias subsequentes, providenciamos outros materiais como fitas de tecidos para visualização do escoamento e máquina de fumaça com o mesmo objetivo.

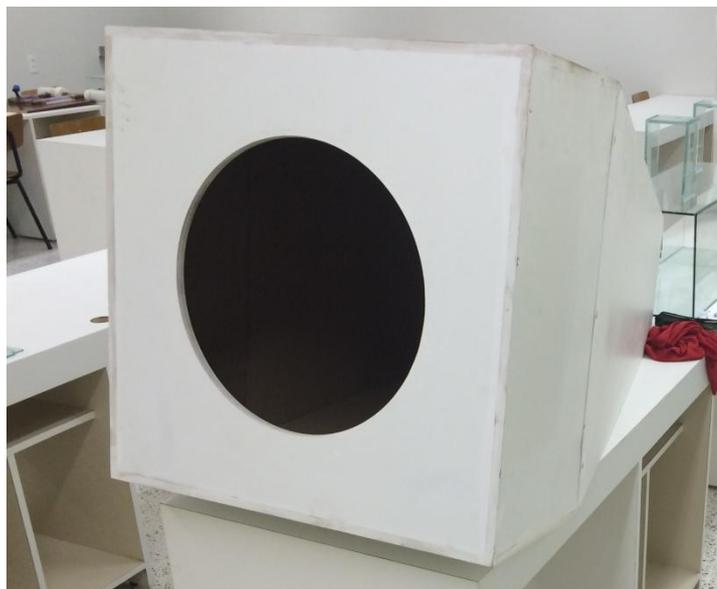


Figura 9 - Duto de entrada de ar. Reprodução própria. 2014.

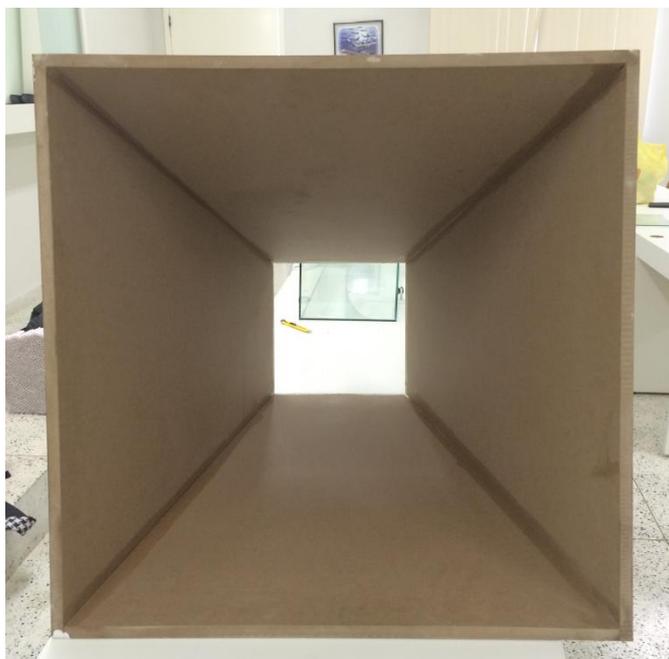


Figura 10 - Duto divergente. Difusor. Reprodução própria. 2014.



Figura 11 - Área de testes em vidro com suportes voltados para cima. Antes da montagem. Reprodução Própria. 2014.



Figura 12 - Área de testes em vidro montada. Reprodução própria. 2014.



Figura 13 - Colmeia para estabilização do fluxo de ar, passando de turbulento para laminar. Reprodução própria. 2014.



Figura 14 - Montagem final. Túnel de Vento Subsônico de Circuito Aberto. Reprodução Própria. 2014.

É importante lembrar que este túnel de vento foi construído com um propósito inicial: deixá-lo adequado às necessidades primárias de visualização do escoamento de um fluido, seja ar + fumaça ou utilizando-se de fitas de tecido. Podendo, no futuro próximo, efetuar correções e aprimoramentos.

Assim, com a conclusão deste projeto, nos permitiu concluir o objetivo geral e iniciarmos nossos estudos sobre Geradores de Vórtices e suas contribuições para a aviação. Desta maneira, satisfazendo, também, o objetivo específico deste trabalho monográfico.

### **3.METODOLOGIA**

Neste capítulo, descrevemos a metodologia seguida em nosso estudo. Optamos pela abordagem qualitativa, em decorrência do enfoque dado ao objeto a ser estudado.

#### **3.1 Pesquisa qualitativa**

Visando alcançar os objetivos propostos neste estudo, privilegiamos a abordagem qualitativa, a qual, segundo Richardson et al. ( 2008, p. 80),

“[...] facilita descrever a complexidade de problemas e hipóteses, bem como analisar a interação entre variáveis, compreender e classificar determinados processos sociais, oferecer contribuições no processo das mudanças, criação ou formação de opiniões de determinados grupos e interpretação das particularidades dos comportamentos ou atitudes dos indivíduos”.

A pesquisa qualitativa se ocupa com um nível de realidade que não pode ou não deveria ser quantificado, ou seja, esse tipo de pesquisa, como ressalta Minayo (2008), trabalha com o universo dos significados, dos motivos, das aspirações, das crenças, dos valores, das atitudes, enfim, com todos esses fenômenos humanos que fazem parte de um contexto social, de uma realidade vivida e partilhada com outros semelhantes. Assim, entendemos que esse nível de realidade não é mensurável, precisa ser descrito e analisado pelo pesquisador.

A pesquisa qualitativa está sendo usada no meio acadêmico, como uma nova perspectiva de produção de conhecimento, por meio de uma interação entre o pesquisador e os atores sociais. Assim, esse tipo de abordagem facilita compreender em profundidade alguns fenômenos do processo ensino-aprendizagem, tornando-se, portanto, uma referência para investigar diferentes contextos. No nosso caso, o foco principal de estudo

refere-se ao processo vivenciado durante a construção de um túnel de Vento e os diversos fatores inerentes e postos a prova em função dos nossos objetivos específicos.

Acreditamos que a relevância desta pesquisa reside no fato de que a literatura (GORECKI, 1988; ÉGEA, 2001; MATOS, 2006) nos mostra que a formação do piloto ainda na graduação possui falhas, apresentando lacunas no que se refere ao ensinamento dos fundamentos da Aerodinâmica. No entanto, não há estudos como este que propomos que mostrem por que ela é inadequada.

No âmbito do paradigma qualitativo, podem ser realizadas pesquisas de tipos variados: etnográfica, estudo de caso, participativa e outros. Nesta tese, utilizamos o *estudo de caso*, cuja justificativa será descrita a seguir.

## 3.2 Estudo de caso

A característica básica de um estudo de caso é esclarecer, heurísticamente, situações reais vivenciadas por indivíduos em grupos, em um contexto real, em que múltiplas fontes de evidências são expostas, oferecendo informações várias sob “background” teórico que determina o estudo em questão. Segundo Patton (2002), “os estudos de caso são particularmente úteis quando se pretende compreender determinados indivíduos, determinado problema ou uma situação particular, em grande profundidade, sem favorecer a generalização” (p. 55)<sup>2</sup>.

Apoiado nessa descrição teórica, caracterizamos nossa pesquisa como um estudo de caso, tendo em vista que procuramos descrever os fatos vivenciados no contexto da aplicabilidade do túnel de vento como recurso didático para a aprendizagem de alguns parâmetros importantes, tais como a aplicação de geradores de vórtices sobre um perfil de asa assimétrico, conforme nos propomos em nossa pesquisa de extensão.

Conseqüentemente, dizer que as descrições realizadas em nossa fundamentação, bem como os resultados aqui apresentados sejam universais,

---

<sup>2</sup>Tradução nossa.

e que a partir deles podemos ter um processo conclusivo em relação aos propósitos do ensino e aprendizagem de algumas variáveis aerodinâmicas. São muitas as variáveis envolvidas nesse processo e que não foram contempladas em nossa pesquisa. Essas limitações não nos permitem saber tudo sobre o caso, cabendo ao investigador decidir até onde deve ir, qual o nível de profundidade do conhecimento a que pretende chegar, de forma a ser-lhe possível atingir os objetivos a que se propõe.

Esse tipo de metodologia, usada em nossa pesquisa, utiliza diferentes técnicas de coleta de informação e/ou de dados, tais como: a observação, a entrevista, a análise documental e os questionários. Utilizamos análise documental, cuja descrição e modo de utilização serão apresentados no item a seguir.

### **3.3 Documentos**

A análise documental pode se constituir numa técnica valiosa de abordagem de dados qualitativos, seja complementando as informações obtidas por outras técnicas, seja elucidando novos aspectos de um tema ou problema. Na definição de Marconi e Lakatos (2010, p. 48), "a característica da pesquisa documental é que a fonte de coleta de dados está restritos a documentos, escritos ou não, constituindo o que se denomina de fontes primárias".

As fontes documentais abarcam uma gama significativa de informações; podem estar materializadas em arquivos históricos, em documentos oficiais, nos diários, em biografias, jornais, revistas, materiais didáticos, enfim, nos mais diversos registros estatísticos que possibilitem um levantamento favorável ao que se pretende pesquisar. Assim sendo, a coleta de dados a partir de registros documentais é considerada por Gil (1999) como a mais simples das técnicas, se comparada aos procedimentos diretos, como a observação e a entrevista, além de não incomodar os participantes.

No nosso caso, a análise de um documento histórico, a exemplo do livro escrito por D. Bernoulli em 1738, culmina com que Gil (1999) descreve como sendo um "momento único" para a pesquisa historiográfica. Assim, apesar deste trabalho ainda não apresentar resultados práticos significativos,

retirados a partir do uso de certos parâmetros no túnel de vento, tivemos um “ganho conceitual” pelo fato deste pequeno esboço histórico ter apresentado o perfil de um físico conceituado no meio acadêmico.

## 4. REVISÃO DE LITERATURA

Aerodinâmica é o estudo dos movimentos e interações de corpos com fluidos, relativo às suas propriedades, características e forças exercidas em contornos nele imersos, que podem ser superfícies sólidas ou interfaces com outros fluidos.

Para voar, o homem teve primeiro a necessidade de entender como funciona o fluxo de ar sobre as superfícies das aeronaves. O estudo da aerodinâmica surgiu com a necessidade de melhorar o desempenho de aviões e carros no início do século XX, no período entre guerras. A intenção era de se obter o menor atrito possível com o ar, resultando em aumento da velocidade e menor consumo de combustível (MATOS et al, 2007). Isso significava que ele tinha que construir laboratórios instrumentados onde asas, fuselagens e superfícies de controle poderiam ser testadas em condições controladas. Assim, com o desejo do homem em voar, não é surpresa que o primeiro túnel de vento foi construído por aproximadamente 35 anos antes do sucesso de Alberto Santos Dumont no campo de Bagatelle, localizado em Paris.

Segundo M.F. Jardim e T.A. Alves, o objetivo do túnel de vento é produzir uma corrente de ar regular e em condições controladas para o ensaio de modelos de veículos aéreos, terrestres e marítimos. Os ensaios em túnel são realizados para determinarem-se experimentalmente os esforços provocados pelo escoamento sobre o modelo (arrasto, sustentação e momentos), as distribuições de temperatura e de pressões, além de outras informações necessárias ao projeto, análise, operação de diferentes tipos de equipamentos e sistemas.

O primeiro túnel descrito na literatura era acionado por uma máquina a vapor e foi construído na Inglaterra, em 1871, para a *Aeronautical Society of Great Britain*, por um dos fundadores dessa associação, Franck H. Wenham (1824-1908).

O túnel de vento é um aparelho usado em simulações que estudam o comportamento aerodinâmico de objetos imersos em correntes de ventos produzidos por potentes ventiladores. São muito utilizados

em laboratórios de modelos físicos para a determinação de parâmetros nos projetos de aviões, automóveis, cápsulas espaciais, edifícios, pontes, antenas e outras estruturas de construções civis.

Hoje há uma forte ligação entre túneis de vento e projetos de aeronave, navios, carros, prédios e outros. Para um estudo detalhado da dinâmica de fluidos em corpos é utilizado um túnel de vento, aparelho que verifica por meio de testes e simulações a ação do ar sobre objetos. Assim, os túneis de vento apresentam diversas configurações para diferentes propósitos. Alguns têm dimensões que permitem testar aviões em tamanho real, outros, podem apenas testar modelos em escalas.

## **4.1 Geradores de Vórtices**

Para relatar sobre os geradores de vórtices (GV), tomaremos como referência uma série de televisão chamada The Aviators (Os Aviadores), apresentada no canal +GloboSat. Nessa série são apresentados diversos temas sobre aviação e, no nosso caso, o episódio 11 da quarta temporada, discorreu sobre os geradores de vórtices. Portanto, Usamos as discussões apresentadas neste programa como apoio para entendermos a aplicabilidade dos GVs.

Para possibilitar menores velocidades de estol em pousos e manobras, resultando em um voo mais seguro, além de uma melhor resposta dos ailerons em aeronaves antigas que não possuem tanta força motriz quanto os novos modelos, alguns proprietários de aeronaves estão instalando micros geradores de vórtices em suas aeronaves. Esses geradores de vórtices são formados por pequenas lâminas instaladas em bordos de ataques das asas, como também, na deriva das aeronaves. Normalmente, são utilizados posteriormente ao fabrico dos aviões no sentido de alterar as suas características e desempenho, bem como, proporcionar um aumento na capacidade de carga, na potência, no poder de controle e na sustentação criada pelas asas.

A aeronave Bonanza da Beechcraft é fabricada desde 1947 até hoje e passou por várias mudanças ao longo do tempo. Mas ainda há muitos Bonanza

antigos que não têm as mesmas vantagens de um equipamento que hoje sai novo de fábrica. Visto a necessidade que alguns proprietários dessas aeronaves mais antigas possuem em melhorar o desempenho delas, entrou no setor de modificações de aeronaves, empresas especializadas na fabricação de peças e modificações em aeronaves, como a D`ShannonAviation e Micro Aerodynamics Inc.

O atual dono da D`ShannonAviation acredita que a estrutura do Bonanza é a melhor para se começar e é a melhor plataforma de lançamento que há. Segundo ele, quando BerylD`Shannon montou a empresa 50 anos atrás, Alan Peterson, seu herdeiro na gestão da loja, decidiu que só faria mudanças para aquela frota da Beechcraft e hoje, a empresa é a pioneira em melhorias para Beechcraft. Conhecida por várias gerações de tanques nas asas dos Bonanza, a D`Shannon pesquisa e realiza melhorias em acessórios para a frota como micros geradores de vórtices em bordos de ataque.

Como mostrado na Figura 15 a seguir, micros geradores de vórtices são montados em um ângulo para o vento relativo. Quando o fluxo de ar atinge os lados das lâminas e passa por cima da lâmina para preencher a área de baixa pressão na parte de trás, que é onde gera o vórtice, o ar que passa permanece unida a fuselagem da asa em velocidades mais baixas e ângulos de ataque mais elevados, adiando a separação de laminar para turbulento. Assim, pode-se ter como resultado, a coisa mais importante: melhorar a resposta de controle em baixa velocidade. Conseqüentemente, temos outros resultados: tender a decolar e pousar em uma distância menor e em velocidades mais baixas.

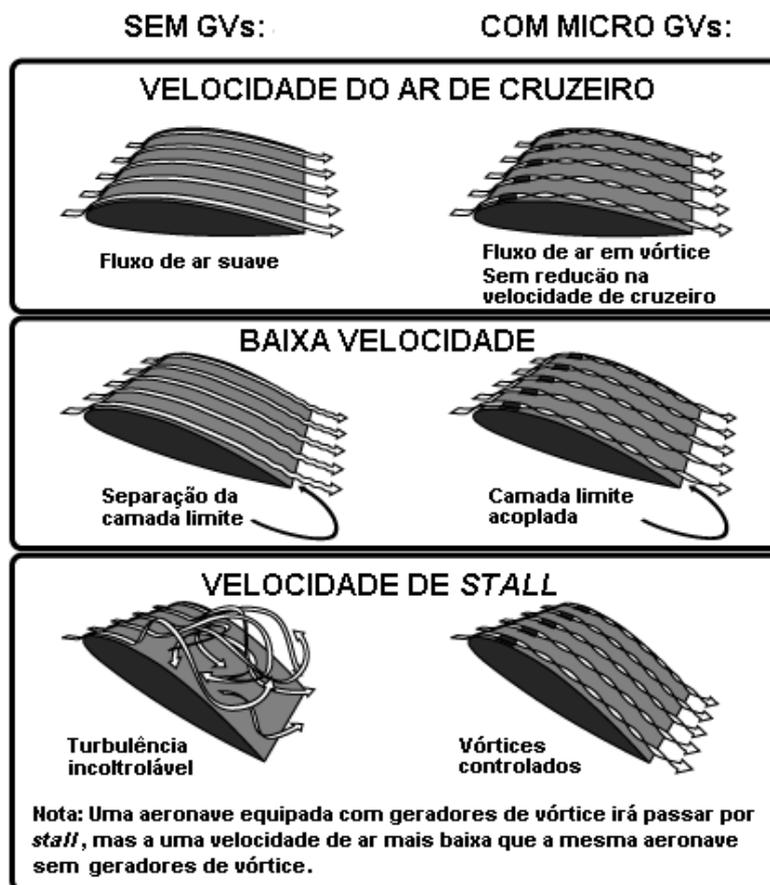


Figura 15 – Micros geradores de vórtices - [www.microaero.com](http://www.microaero.com). Acesso em 29/11/2014

Então, essa é a principal característica dos GVs, ou seja, ajustar o fluxo de ar. Dessa forma, o avião responde da mesma forma de quando está voando mais rápido, porém, em uma velocidade mais baixa, como já dissemos.

Em nossa pesquisa, nos deparamos com um vídeo publicado como *Aero-TV: Making Good Planes Better - Micro VGs Offer Aerodynamic Enhancements* (Aero-TV: Tornando bons aviões, melhores - Micro VGs oferecem melhorias aerodinâmicas<sup>3</sup>) no YouTube em 28 de Março de 2014, no canal Aero-News Network. Onde, durante a convenção da AOPA (Aircraft Owners and Pilots Association – Associação de Donos e Pilotos de Aeronaves<sup>4</sup>) em 2013, o CEO da emissora de televisão ANNe editor-chefe, Jim Campbell, teve a oportunidade de entrevistar Anni Brogan, a Presidente da empresa Micro Aerodynamics Inc. Nessa entrevista, Brogan

<sup>3</sup> Tradução nossa.

<sup>4</sup> Tradução nossa.

esclarece que sua empresa desenvolve e produz geradores de vórtices para várias funções em numerosas marcas e modelos de aeronaves. No vídeo, Brogan explica como o gerador de vórtice funciona e como ele faz mais do que podemos pensar que faz. A sua descrição de como os geradores de vórtices funcionam, como são certificados, testados e instalados, é interessante e informativa.

É comum associamos geradores de vórtices em bordos de ataque de uma asa com a redução da velocidade de estol. Brogan esclarece que o ajustamento da velocidade de estol através da utilização de geradores de turbilhões pode ser importante, mas que, também, eles podem fazer mais do que isso. Podem melhorar o poder de controle sobre a aeronave e ajustar a eficácia de tais controles. Por exemplo, ela ressalta que geradores de vórtices aplicados ao leme de um avião multimotor pode reduzir a velocidade  $V_{mca}$  (Velocidade Mínima de Controle no Ar). O que é muito importante em caso de situações monomotoras em bimotores ou em falha total de ambos os motores.

Como vimos, os geradores de vórtices podem, radicalmente, melhorar em muito a estrutura das aeronaves como, também, o seu desempenho e consumo. Os kits de montagens podem ser comprados e montados facilmente, levando de dez a doze horas para iniciar e terminar de instalar.

O único ponto contra que Brogan comenta é sobre a velocidade de cruzeiro das aeronaves. A empresa Micro Aerodynamics Inc. recebeu alguns reportes de pilotos que notaram uma mínima diminuição na velocidade de cruzeiro, geralmente entre 1kt e 2kt. Porém, Brogan ainda confirma de que isso não é comprovado em laboratório e que, mesmo ocorrendo estes casos de diminuição na velocidade de cruzeiro das aeronaves, o consumo da aeronave não aumenta. Pelo contrário, permanece notadamente menor do que sem a utilização destes GV.

Podemos observar nos exemplos das figuras abaixo, retiradas do site da empresa Micro Aerodynamics Inc., algumas contribuições dos microgeradores de vórtices para aeronaves Cessna 150 e Cessna 152 modelos de A até E e para Cessnas 401, A, B e Cessnas 402 e 402A. Para C150 e C152 são 88 geradores instalados na beira do bordo de ataque das asas e 26

geradores instalados do estabilizador vertical. O kit ainda inclui o STC (Supplemental Type Certificate – Certificado Suplementar de Tipo), obrigatório para modificações como esta.

**CESSNA 150, 150A-E**

**MICRO Vortex Generator Kit**

- Reduced STALL SPEED 8-10%!
- Improved Characteristics
- Improved Controllability
- FAA STC Approved
- Easy One Day Installation
- Complete Kit
- Kit Price \$695

Figura 16 – Contribuições e preço de micro GV para C150 e C152. Site Micro Aerodynamics Inc.

**Cessna 401, A, B / 402, 402A**

**MICRO Vortex Generator Kit**

	Factory	MICRO	Improvement With MICRO VGs
$V_{mc}$	95 MPH CAS	81 MPH CAS	14 MPH CAS
$V_S$	95 MPH CAS	90 MPH CAS	5 MPH CAS
$V_S$ (flaps 15)	87 MPH CAS	78 MPH CAS	9 MPH CAS
$V_{SO}$	80 MPH CAS	75 MPH CAS	5 MPH CAS

- $V_{mc}$  Virtually Eliminated !
- Reduced  $V_S$ ,  $V_{SO}$
- FAA Certified Numbers
- Easy One Day Installation
- Improved Characteristics
- Kit Price \$1950

Figura 17 - Contribuições e preço de micro GV para C401 e C402. Site Micro Aerodynamics Inc.

Alguns dos benefícios trazidos pelos geradores de vórtices:

Para aeronaves monomotoras:

- Baixa velocidade de decolagem;
- Baixa velocidade de estol;

- Melhoria no controle da aeronave;
- Melhoria das características da aeronave;
- Melhoria na segurança;
- Instalação em um dia.

Para algumas aeronaves bimotoras:

- Redução da Vmca (Velocidade Mínima de Controle no Ar)
- Aumento do PZC (Peso Zero Combustível)
- Aumento do PB (Peso Bruto)
- Melhorias nas respostas dos Ailerons e lemes direcionais
- Voo mais suave em turbulências
- Conjunto de instrumentos de voo mais estáveis

Como sabemos, a aviação é extremamente regulada. Para que uma aeronave modificada possa voar é preciso ter um Certificado Suplementar de Tipo, ou STC (SupplementalTypeCertificate). A D`Shannon tem inúmeros STCs para Bonanza e Baron, assim como a Micro Aerodynamics Inc. possui para demais aeronaves como: Cessnas, Piper, Diamnod, Mooney, para aeronaves agrícolas e, também, para Beechcrafts.

Uma das coisas interessantes sobre esses geradores de vórtices em aeronaves, é que são mudanças relativamente pequenas e que fazem uma grande diferença. Pelo custo relativamente baixo e pela maior segurança gerada, esses geradores são uma boa escolha para aviões pequenos. São ótimos exemplos de como essas pequenas mudanças podem afetar, e muito, o modo como o avião voa. Os geradores de vórtices podem criar sustentação suficiente para levantar 45 kg (100lb) a mais de carga em aeronaves como o Bonanza, e podem ser instalados em qualquer tipo de aeronave.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, descrevemos os nossos resultados a partir de experiências realizadas após a construção do túnel de vento. Vale acrescentar que, por ser nossa primeira incursão a respeito, erros podem e devem ser minimizados, uma vez que se trata de uma experiência ousada e de precisão acurada.

No experimento realizado em laboratório, utilizando o túnel de vento construído ao longo deste projeto de pesquisa, conseguimos comprovar sutilmente a utilização dos geradores de vórtices. Contudo, infelizmente, ao realizarmos nossos testes utilizando fumaça, não foi possível visualizar, por meio de gravação em mídia, os micros turbilhões causados pelos geradores de vórtices. Assim, a única maneira que encontramos viável para a comprovação da existência destes turbilhões foi olho nu, com muita concentração e inúmeras tentativas com a fumaça.

É relevante lembrar que geradores de vórtices em tamanho real medem, aproximadamente, uma polegada (1"). Ao tentarmos reproduzir em escala, não obtivemos sucesso, pois a escala se tornou extremamente reduzida e de difícil fabricação. Somado à característica de que, para a fabricação de geradores de vórtices, algumas variáveis são levadas em conta, como: modelo da aeronave, NACA do aerofólio, etc. Com isso, apenas construímos um exemplar de gerador de vórtice, a fim de demonstrar sua utilização em um tipo de asa qualquer, sem especificação, mas com formato assimétrico.

Munidos de dois modelos de estudos, que para este caso foram duas asas em escala aproximada de 1:20, instalamos geradores de vórtices em apenas uma delas e fitas de tecido em ambas, de forma a termos visualização e comparação do escoamento do ar sobre os aerofólios com e sem gerador de vórtice. Também foi utilizado fumaça a partir de uma máquina de fumaça, onde, só assim, foi perceptível a visualização dos micros turbilhões causado pelos geradores de vórtices.

Nas figuras seguintes (18 e 19), representativas dos nossos ensaios, utilizamos nossos protótipos de asas assimétricas e um transferidor, como indicativo de ângulo atitudinal, da “suposta aeronave”. E, conseqüentemente, ao protótipo de asa.

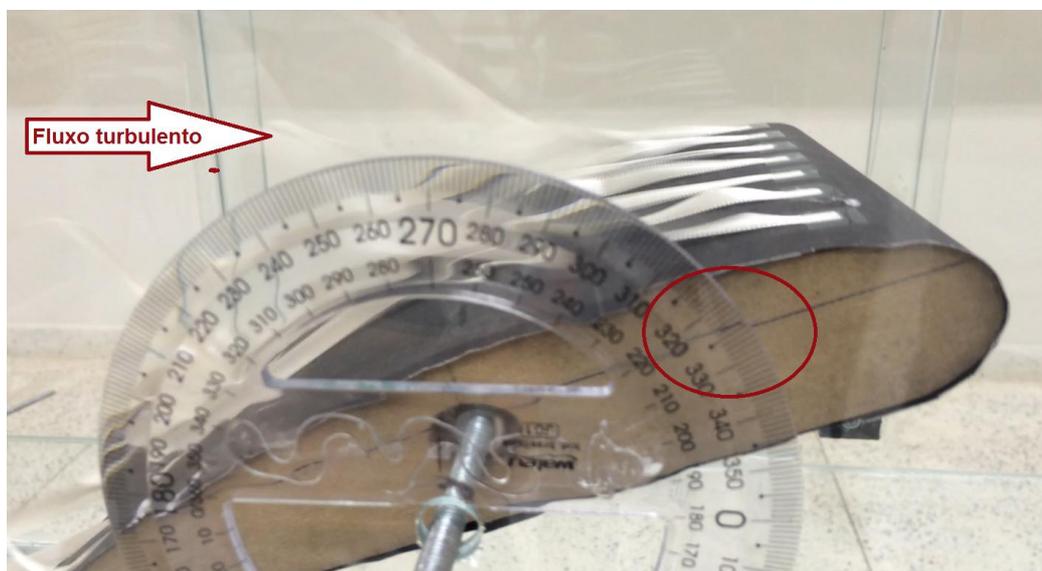


Figura 18 - Teste em túnel de vento com escala reduzida sem GV. Reprodução própria. 2014.

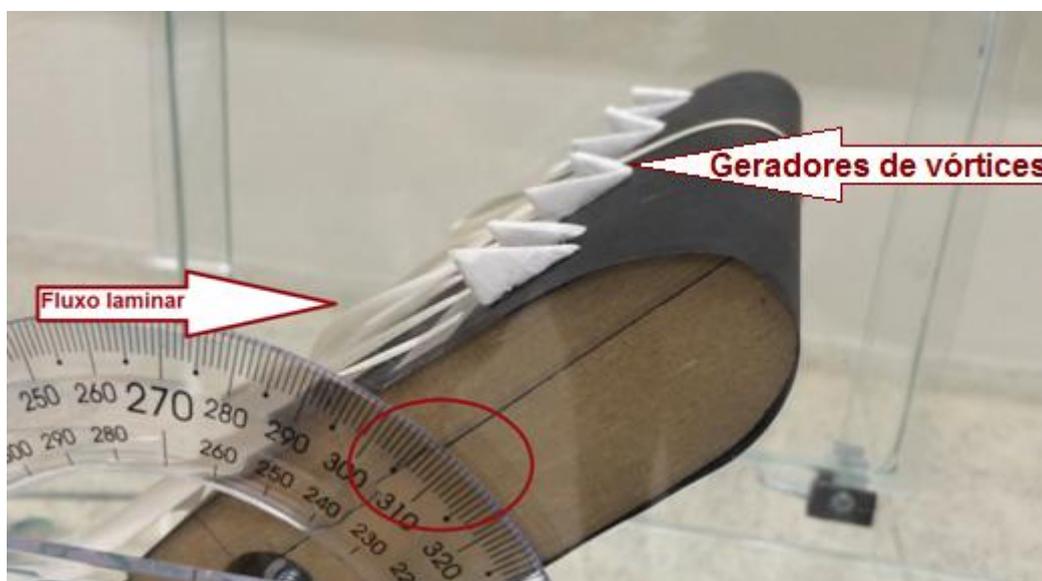


Figura 19 – Teste em túnel de vento com escala reduzida utilizando GV. Reprodução própria. 2014.

A partir das figuras 18 e 19, mostramos que a utilização dos geradores de vórtices em túneis de vento parece ter contribuído para o aumento discreto

da sustentação sobre a asa. Esse fato é descrito a partir do aumento de ângulo visualizado no transferidor. Notadamente, o acúmulo ou a maior aglutinação do fluido sobre a superfície (extradorso) da asa, gerando um gradiente de pressão (efeito coanda)<sup>5</sup>, é o grande responsável por esse discreto aumento na sustentação.

O efeito Coanda é a tendência de um filete de um fluido permanecer unido a uma superfície curva. O nome homenageia o romeno Henri Coanda, que foi o primeiro a reconhecer a aplicação prática do fenômeno no desenvolvimento de aeronaves.

A nossa revisão aponta para a importância do uso dos geradores de vórtices em asas de aeronaves que nos conduz a entender e justificar a nossa pesquisa. Evidentemente, nossos resultados estão longe de serem análogos aos destes pesquisadores, uma vez que, tivemos problema com a escala. No entanto, para os propósitos desta pesquisa, acreditamos ter dado uma mínima contribuição ao entendimento do uso dos geradores de vórtices, ao tempo em que atingimos os objetivos aqui propostos.

Nesse contexto, consideramos de extrema importância o estudo de geradores de vórtices em túneis de vento para melhor exemplificação dos atributos possíveis e de suas contribuições para a aviação de instrução e de qualquer porte.

---

<sup>5</sup>É de fundamental importância o entendimento do efeito coanda e do número de Reynolds. Ele permite avaliar o tipo do escoamento (laminar ou turbulento). Para o caso de um avião, admite-se o valor de  $1 \times 10^7$  como limite. Valores iguais ou maiores que este, o fluxo passa de laminar para turbulento.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi demonstrada a importância histórica da Equação de Bernoulli para o estudo dos fluidos e como essa equação foi aplicada nos túneis de vento. Com o passar do tempo, outros físicos tiveram o mesmo interesse de Bernoulli, como o físico Henri Pitot e o físico Giovanni Battista Venturi e através de adequações de sua equação foi possível aplicá-la para a invenção de diversos tipos de medidores de vazão. No nosso caso, demonstramos que a velocidade do fluido é inversamente proporcional a pressão do mesmo e através de um exemplo realizado em laboratório, foi possível, através da Equação de Bernoulli, determinar a velocidade do ar captado pelo túnel de vento.

Para que a Equação de Bernoulli e os demais cálculos aqui demonstrados, derivados do Princípio que lhe deu origem, possam ser bem empregados é necessário atender a algumas condições, como: o escoamento ser sem viscosidade; que não esteja em estado estacionário e que o fluido seja constante em todo o escoamento. Estando estas três condições atendidas, os túneis de vento, que são constituídos de diversas formas, podem ser usados para diferentes propósitos assim como os medidores de vazão.

Atualmente, os túneis de vento de milhões de dólares estão sendo cada vez menos utilizados, porque cada vez mais estão sendo feitas simulações por computadores, e estes conseguem transmitir os fenômenos que aconteceriam dentro de um túnel de vento com exatidão. Muitas vezes, os túneis de vento são usados meramente para confirmar o que o computador já havia informado.

Não devemos achar, no entanto, que graças ao computador e seus programas sofisticados, os túneis de vento e os medidores de vazão são menos importante para nós, muito pelo contrário, foi graças ao seu invento que foi possível a construção de aviões, aprimoramentos do meio automobilístico, construção de grandes edifícios além de melhorias em diversas áreas onde a

atuação do vento é importante. E mesmo que daqui para frente quase não sejam mais usados os túneis de ventos, foi através dos seus estudos e dos estudos de medidores de vazão que foi possível dar suporte a Equação de Bernoulli, que hoje é usada também pela NASA.

Em nossa opinião, são várias as contribuições que os geradores de vórtices podem trazer aos donos e pilotos de aeronaves, aqueles que se utilizam da aviação de pequeno porte e, em especial, das escolas práticas de aviação. Foi possível mostrar que de fato, o uso desses geradores em asas assimétricas contribui de forma significativa para o aumento da sustentação, podendo nesse caso, diminuir a velocidade da aeronave, na tentativa de economizar combustível.

Outro fator bastante relevante refere-se ao baixo custo, associado a fácil instalação. Entendemos que o uso dos geradores de vórtices pode mudar o cenário financeiro de muitas escolas de aviação que, como a nossa, devido ao alto preço do combustível aeronáutico, acabam se vendo obrigada a aumentar o preço das horas de voo, repassando ao usuário final, os pilotos-alunos. Dentro dessa perspectiva, alguns alunos acabam, por sua vez, tendo que sair de sua cidade, aumentar seus gastos com moradias alugadas ou alojamentos, chegando a se render às escolas que negligenciam a manutenção como também a qualidade do combustível utilizado nas suas aeronaves, acarretando, desta maneira, no risco de acidentes aeronáuticos.

Finalizando, gostaríamos de acrescentar e registrar algumas dicas para futuras pesquisas, uma vez que a literatura aponta para as vantagens do uso de micro gerador de vórtices em asas de aviões de médio e pequeno porte. Além disso, a nossa contribuição fica como um adendo à comprovação da eficácia do seu uso no aumento da sustentação.

## REFERÊNCIAS

ARRIAS, Lucas Reggi; UEMURA, Frederico Oliveira; FEIDEN, Adriana; MARRAÇÃO, Ricardo Esteves; GONÇALVES, Rodolpho Raphael Bilha. **Projeto e construção de um túnel de vento subsônico de circuito aberto para utilização em laboratório didático**. Universidade Estadual de Maringá: Maringá, 2008. p. 64.

**Aero-TV: Making Good Planes Better - MicroVGs Offer Aerodynamic Enhancements.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=y71Q4QtsT4>>. Data de acesso: 22/09/2014.

**D`Shannon Aviation: Beechcraft Upgrades.** Disponível em: <<http://www.d-shannon-aviation.com/>>. Data de acesso: 22/09/2014.

ÉGEA, Fernanda Smanio de Oliveira. **Projeto de uma Balança Aerodinâmica para o Túnel de Vento Subsônico da FEAU.** Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAJcYAL/projeto-balanca-aerodinamica-tunel-vento-didatico>>. Acesso em: 25 de Set. 2014.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** (tradução de Ricardo Nicolau Nassar Koury, Geraldo Augusto Campolina) Rio de Janeiro: LTC, 2006.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São Paulo: Atlas, 1991.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** São Paulo: Atlas, 1999.

JOHNSTON, Andrew. NALLI, Anthony. REPENDA, Sara. ARNOLD, Kurtis. **THE AVIATORS.** Série documental. Produção de Anthony Nalli e Lisa Charney. Direção de Anthony Nalli. Estados Unidos da América, 2014. 1 Disco Blu-Ray / 16:9 HDTV, 30 minuto. Colorido. Sonoro.

LAKATOS, Eva Maria. MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica 1.** 5. ed. - São Paulo : Atlas 2003. Bibliografia.

MATOS, Cynthia Casagrande; BOTELHO, Róber Dias. **A influência da aerodinâmica no design.** Disponível em: <[fido.palermo.edu/servicios\\_dyc/encuentro2007/02\\_auuspicios\\_publicaciones/actas\\_Diseno/articulos\\_pdf/A4064.pdf](http://fido.palermo.edu/servicios_dyc/encuentro2007/02_auuspicios_publicaciones/actas_Diseno/articulos_pdf/A4064.pdf)>. Acesso em: 13 mai. 2008.

**Micro Aerodynamics Inc.: VortexGeneratorSpecialist.** Disponível em: <<http://www.microaero.com/index.html>>. Data de acesso: 27/11/2014.

MINAYO, Maria Cecília de Souza. **O desafio da pesquisa social**. 27<sup>a</sup> ed. Petrópolis: Vozes, 2008.

M.F. Jardim, T.A. Alves, L.O. Salviano, D.J. Saran, E.R. Woiski, S.S. Mansur, E.D.R. Vieira. **Projeto de um Túnel Aerodinâmico do Tipo Soprador para o Ensino e a Pesquisa em Engenharia: Resumo**. São Paulo.

Nussenzveig, H. Moysés. **Curso de física básica 1: mecânica**. 3. ed São Paulo.2003.

PATTON, Michael Quinn. **Qualitative Research & Evaluation Methods**.3<sup>a</sup> Edição. Editora SAGE. 2002.

PRAVIA, Zacarias; CORONETTI, Leandro. **Um Protótipo de um Mini Túnel de Vento (MTV) para Ensino de Graduação**. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2003. 8 p.

RICHARDSON, R. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2008.

RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica**. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

RUFATO, Eduardo; POLETTO, Roger; BARTEX, Sérgio. **Visualização de escoamento de fluido em túnel de vento**. Porto Alegre, 2007.

SANTOS, Frederico Luiz de Oliveira, COSTA, Daniel Lopes, VASCONCELOS, Carlos Eduardo, SANTOS, Alessandro G., GORGA, Alexandre. **Fenômenos de Transporte ( Mec 229 ) Equação de Bernoulli, Medidores de Vazão e Túneis de Vento**. Universidade Gama Filho, 2012, p. 22.