

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FILIPE NASCIMENTO CAMPOS
MARCELO GRIJÓ DENADAI**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TUNEL DE VENTO,
SIMULAÇÃO DE DESCOLAMENTO
DA CAMADA LIMITE**

**VITÓRIA
2005**

FILIPE NASCIMENTO CAMPOS
MARCELO GRIJÓ DENADAI

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TUNEL DE VENTO,
SIMULAÇÃO DE DESCOLAMENTO
DA CAMADA LIMITE**

Dissertação apresentada ao Projeto de
Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Espírito Santo,
como requisito para a obtenção do Grau
de Engenheiro Mecânico.
Orientador: Profº Juan Romero.

VITÓRIA
2005

**FILIPE NASCIMENTO CAMPOS
MARCELO GRIJÓ DENADAI**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TUNEL DE VENTO,
SIMULAÇÃO DE DESCOLAMENTO
DA CAMADA LIMITE**

Dissertação apresentada ao programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição para obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 12 de Agosto de 2005.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Juan Sérgio Romero Saenz
Orientador

Prof. Dr. Rogério Ramos
Co-orientador

Prof. Dr. Sérgio Leite
Examinador

A nossos pais, familiares, amigos e namoradas pela ajuda nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao professor Juan Romero não só pela sua fundamental orientação e ensinamentos diários, mas também pela amizade desenvolvida.

Ao professor Rogério Ramos por sua valiosa contribuição para o desenvolvimento desse projeto.

Finalmente, aos nossos companheiros de turma, que proporcionaram incríveis cinco anos (aproximadamente), nos dando motivos suficientes para enfrentar as dificuldades do dia-a-dia e mostrando que algumas amizades merecem ser cultivadas para sempre.

RESUMO

A aerodinâmica objetiva fundamentalmente o estudo do escoamento de ar (vento) ao redor de corpos ou internamente a eles. A finalidade deste estudo é a aerodinâmica de perfis utilizados na fabricação de asas para aviões e aeromodelos analisando os aspectos de descolamento da camada limite, força de arrasto e sustentação.

Este estudo pode ser desenvolvido em duas frentes:

- Qualitativa: Foi construído um perfil e em testes de túnel de vento visualizamos o fenômeno de descolamento da camada limite sem captação de dados e cálculos.
- Quantitativamente: Por meio de testes e estudos desenvolvidos em túneis de vento foram capturados dados que podem ser processados por meio de computadores, bastando para isso a existência de um interface ou trabalhados manualmente.

Este trabalho tem como objetivo a construção de um túnel de vento capaz de fornecer dados para uma modelagem tanto computacional (em um momento futuro) quanto experimental.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho do nariz	12
Figura 2 - Seção de teste do túnel de vento do ITA	13
Figura 3 - Nariz acoplado à seção de teste	13
Figura 4 - Exemplo de ventilador axial.....	14
Figura 5 - Exemplo de ventilador centrífugo.....	15
Figura 6 - Colméia feita em matriz plástica fundida.....	15
Figura 7 - Desenho de túnel de vento circuito aberto	16
Figura 8 - Desenho de túnel de vento circuito fechado.....	17
Figura 9 - Seção de teste de túnel de vento circuito fechado	18
Figura 10 - Diagrama de forças e momentos representativos no modelo	19
Figura 11 - Desenho esquemático da camada limite hidrodinâmica.....	20
Figura 12 - Descolamento da camada limite em perfil de asa.....	21
Figura 13 - Ângulo de ataque vs. Qualidade da asa	22
Figura 14 - Exemplo de perfis de asa.....	23
Figura 15 - Desenho esquemático das seções.....	28
Figura 16 - Exemplo de difusor em um desenho esquemático	32
Figura 17 - Exaustor utilizado no túnel de vento.....	33
Figura 18 - Difusor em fibra de vidro.....	33
Figura 19 nariz em fibra de vidro.....	34
Figura 20 Colméia em tubos de PVC.....	34
Figura 21 Aerofólio em madeira e revestido com plástico térmico.....	35
Figura 22 Túnel de vendo da Universidade Federal do Espírito Santo.....	35
Figura 23 Foto de perfil simétrico com ângulo de ataque nulo	36

Figura 24 Foto de perfil simétrico com ângulo de ataque máximo	37
Figura 25 Túnel ligado ao painel manômetro	38
Figura 26 Verificação da velocidade com o anemômetro	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre perfis	24
Tabela 2 - Valores de x e r	27

SIMBOLOGIA

D	Arrasto
Y	Lateral
L	Sustentação
R	Momento de rolamento
M	Momento de arflagem
N	Momento de guinada
K	Qualidade da asa
C_L	Coeficiente de sustentação
C_D	Coeficiente de sustentação
r	Raio da seção infinitesimal do nariz
r_0	Raio inicial da seção do nariz (no caso da seção ser circular) ou raio do círculo inscrito da seção inicial do nariz
x	Ponto da curva infinitesimal do nariz (implemento)
P_A	Pressão estática na seção A
P_B	Pressão estática na seção B
V_A	Velocidade na seção A
V_B	Velocidade na seção B
ρ	Densidade do ar
A_{SB}	Área da seção transversal B
w	Peso por unidade de volume do fluido manométrico
Δh	Diferença de cota entre as colunas de fluido

SUMÁRIO

1 HISTÓRICO	11
1.1 A NECESSIDADE	11
1.2 ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	11
1.3 CONFIGURAÇÕES CONSTRUTIVAS VS. APLICAÇÕES	16
1.3.1 Túnel de vento de circuito aberto	16
1.3.2 Túnel de vento de circuito fechado	17
2 REVISÃO TEÓRICA	18
2.1 AERODINÂMICA	18
2.2 CAMADA LIMITE	19
2.3 QUALIDADE DE ASA	21
2.4 ELEMENTOS DE UM PERFIL DE ASA	22
3 PROJETO	24
3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	25
3.2 DIMENSIONAMENTO	26
3.2.1 Nariz	25
3.2.2 Ventilador / motor	28
3.2.3 Difusor	31
3.3 CONSTRUÇÃO	33
3.3.1 Fabricação do exaustor	33
3.3.2 Fabricação do difusor	33
3.3.3 Fabricação do nariz	34
3.3.4 Fabricação do aerofólio	35
3.3.5 Túnel de vento em fase final de montagem	35
4 EXPERIÊNCIAS	36

4.1 TESTES DE PERFIS DE ASA NO TOCANTE A QUALIDADE DE ASA	36
5 SUGESTÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DO TÚNEL	40
5.1 INVERSOR DE FREQUÊNCIA	40
5.2 MEDIDOR DE PRESSÃO DE ENTRADA	40
5.3 PERFIL AERODINÂMICO COM PONTOS PARA TOMADA DE PRESSÃO.....	43
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
7 REFERÊNCIA.....	45

1 HISTÓRICO

1.1 A NECESSIDADE

A modelagem matemática de fenômenos aerodinâmicos como arrasto e força de sustentação em perfis aerodinâmicos, fenômenos atmosféricos como dispersão de poluentes e particulados mostra – se excessivamente complexo e nem sempre precisa devido a grande complexidade da relação entre os corpos e suas interações com o meio. Apesar do desenvolvimento de métodos computacionais para o estudo de tais problemas os dados não se mostram muito precisos e ainda assim excessivamente complexos e de difícil interpretação.

O túnel de vento surgiu então como uma opção a este modelo completamente empírico, inserindo dados reais captados com modelos em miniatura ou até em alguns casos com protótipos em tamanho real. Ele também pode ser utilizado para validar modelos matemáticos de escoamento em torno de corpos.

1.2 ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

O túnel de vento pode possuir diversos tamanhos e formas construtivas, basicamente escolhidas para satisfazer os testes desejados sejam esses feitos em peças pequenas como perfis de asa, modelos em escala ou até mesmo protótipos como automóveis por exemplo.

Os túneis de vento têm os seguintes componentes básicos:

- Nariz: tem como função a captação do ar atmosférico para dentro do túnel propriamente dito e iniciar a estabilização do fluxo de ar e levar o ar de uma seção de baixa velocidade há uma seção de alta velocidade sem criar turbulência. Pode ser construído em fibra de vidro, madeira, aço perfilado entre outros dependendo da magnitude do objeto. A figura seguinte mostra um desenho esquemático do mesmo.

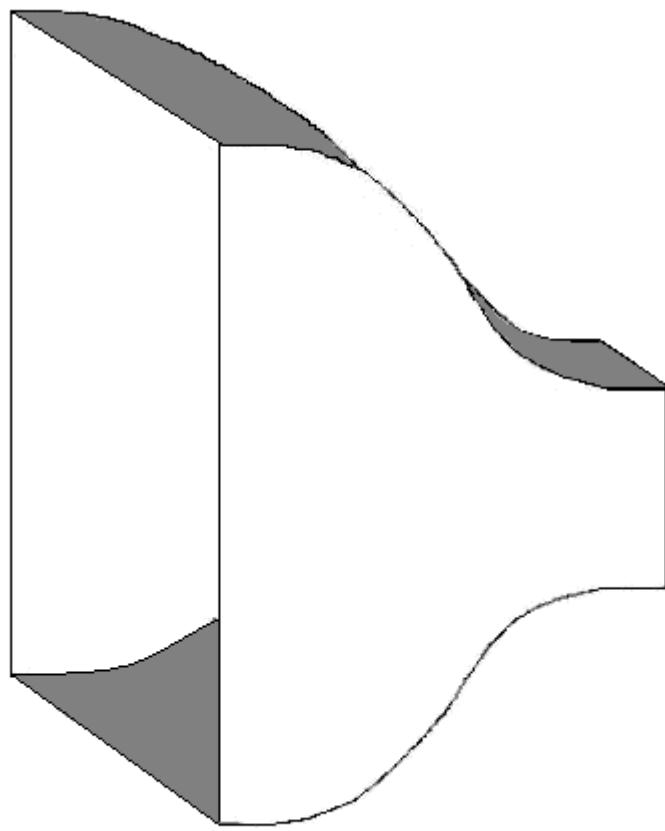


Figura 1 Desenho do nariz

- Seção de estabilização: esta parte do túnel tem como função a estabilização do fluxo de ar na seção, ou seja, transformar o fluxo turbulento / laminar de entrada em um fluxo laminar. Este seção pode ser construída em madeira ou fibra sendo necessária ou não dependendo do tipo de estudo a ser feito no túnel (se apenas qualitativo ou quantitativo).
- Seção de teste: nesta seção é posicionado o objeto a ser testado este podendo ser fixado de diversas maneiras dependendo do objeto (perfil de asa, modelo em escala etc.). A seção de teste normalmente é feita em acrílico em túneis de pequena escala para melhor observação dos fenômenos que ali ocorrem como descolamento da camada limite. As dimensões deste elemento podem variar muito de acordo com o corpo a ser testado. As figuras a seguir mostram uma seção de teste do túnel do ITA e um nariz acoplado diretamente à uma seção de teste.



Figura 2 Seção de teste do túnel de vento do ITA



Figura 3 Nariz acoplado à seção de teste

- Difusor: esta seção do túnel tem como função a conversão de energia cinética em energia de pressão pelo uso de uma seção divergente com ângulo pré - definido. Os ângulos mais usados estão entre seis graus (mais suave) até doze graus (mais abrupto). O difusor pode ser construído em fibra de vidro, madeira e aço.
- Ventilador / exaustor: este elemento do túnel de vento tem função de através do uso de um motor gerar o deslocamento do ar. Podem ser usados tanto ventiladores quanto exaustores dependendo apenas da configuração do túnel, no caso do uso de ventiladores o mesmo deve ficar preso ao nariz do túnel e no uso de exaustores preso ao difusor. Os ventiladores usados podem ser axiais, radiais ou centrífugos. Abaixo seguem figuras que ilustram os dois tipos de ventiladores, axial e centrífugo.



Figura 4 Exemplo de ventilador axial



Figura 5 Exemplo de ventilador centrífugo

- Colméia: A colméia tem com única função remover as variações vorticianas e laterais de velocidade do fluxo de ar. O nome colméia vem, pois a peça construída tem aparência semelhante a uma colméia de abelha. A peça pode ser construída a partir de tubos cortados e unidos em um painel, ou por meio de matriz plástica fundida com o mesmo estilo. Abaixo uma colméia construída em matriz plástica fundida.



Figura 6 Colméia feita em matriz plástica fundida

1.3 CONFIGURAÇÕES CONSTRUTIVAS VS. APLICAÇÕES.

Os túneis de vento podem ter duas configurações básicas que serão brevemente explanadas abaixo:

1.3.1 Túnel de vento de circuito aberto

De construção mais simples e custo mais baixo, esta configuração é de grande utilização tanto no ambiente acadêmico quanto industrial. Esses equipamentos contem todos os elementos citados acima à exceção da seção de estabilização que pode ou não ser usada. Suas aplicações vão desde o uso acadêmico para observação e fenômenos como descolamento da camada limite, perda de carga em tubos ate o uso industrial, na indústria aeronáutica para testes de perfis de asa e fuselagem de aviões. Abaixo segue um exemplo esquemático de um túnel de vento de circuito aberto.



Figura 7 Desenho de túnel de vento circuito aberto

1.3.2 Túnel de vento de circuito fechado

De construção mais complexa, logo de maior custo o túnel de vento em circuito fechado tem como principal diferença a existência de uma ligação por meio de tubulação entre o nariz e o ventilador. Estes túneis normalmente são de grande porte e trabalham com altas velocidades. Este tipo de túnel destina – se principalmente a indústria automotiva para testes visando medir o coeficiente de arrasto de veículos. A seguir figuras deste tipo de túnel e sua seção de teste.



Figura 8 Desenho de túnel de vento circuito fechado

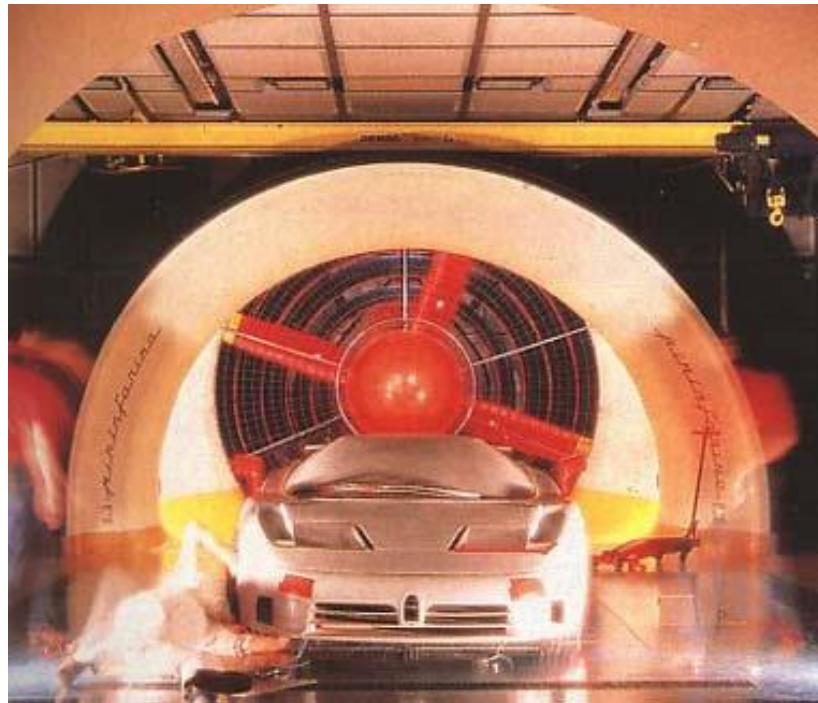


Figura 9 Seção de teste de túnel de vento circuito fechado

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 AERODINÂMICA

Todos os corpos sujeitos a um movimento relativo do ar, tais como: asas, aviões, edifícios, automóveis, plataformas petrolíferas e muitos outros, possuem características aerodinâmicas próprias. Este estudo pode ser realizado qualitativamente (visualização de escoamentos) ou quantitativamente (cálculos computacionais ou medições em túnel de vento). Os esforços aerodinâmicos que agem sobre um corpo são:

- **Forças:**

- **Arrasto (D)** é a resistência que o escoamento impõe ao movimento do corpo. Atua na direção do escoamento.

- **Lateral (Y)** é a força responsável pelo desvio lateral do corpo de sua trajetória original. Atua no plano transversal ao corpo e é perpendicular à direção do escoamento.
- **Sustentação (L)** é a força que atua no plano de simetria do corpo e é perpendicular à direção do escoamento.
- **Momento:**
 - **Rolamento (R)** quantifica a tendência do corpo de girar ao redor de seu eixo de simetria. O vetor momento de rolamento tem a direção do vetor arrasto.
 - **Arfagem (M)** quantifica a tendência do corpo de girar no plano de simetria. O vetor momento de rolamento tem a direção do vetor força lateral.
 - **Guinada (N)** quantifica a tendência do corpo de girar lateralmente. O vetor momento de guinada tem a direção do vetor força de sustentação. Abaixo segue um diagrama representativo das forças.

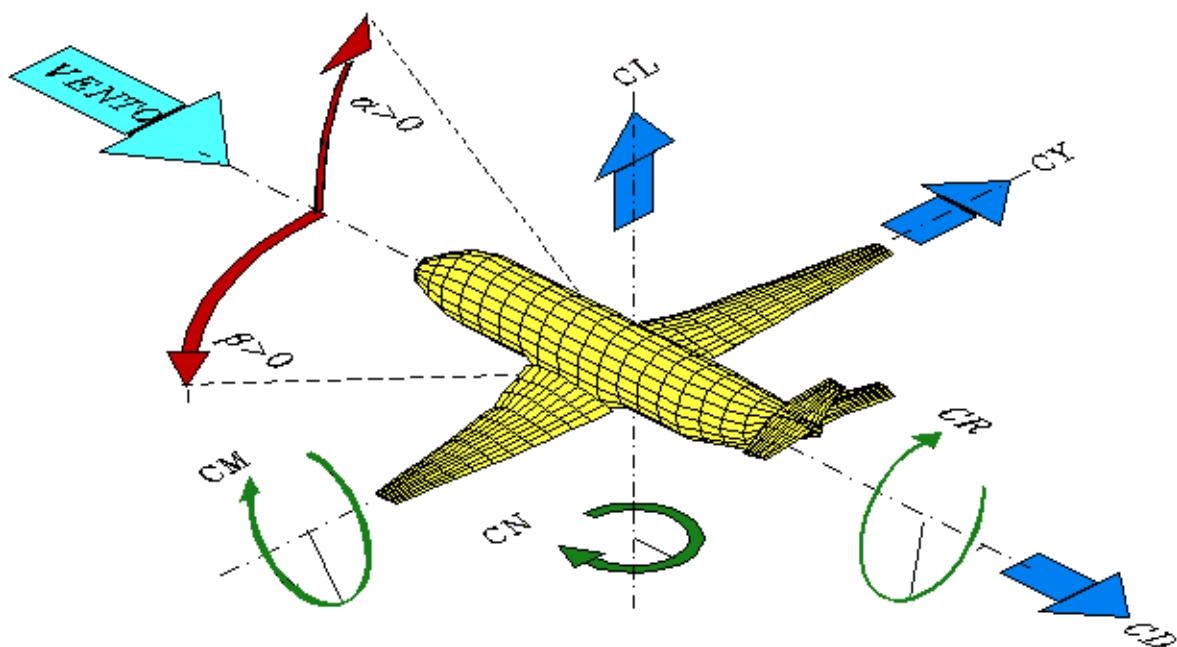


Figura 10 Diagrama representativo das forças e momentos atuantes no modelo

O posicionamento do modelo em relação ao escoamento é definido pelos ângulos de ataque (alfa) e ângulo de guinada (beta). Estes ângulos, bem como a velocidade do escoamento e a geometria do modelo influenciam fortemente a magnitude das forças e momentos.

2.2 CAMADA LIMITE

Quando um fluido escoa ao longo de uma superfície, seja o escoamento em regime laminar ou turbulento, as partículas na vizinhança da superfície são desaceleradas em virtude das forças viscosas. A porção de fluido contida na região de variação substancial de velocidade é denominada de camada limite [7] [2].

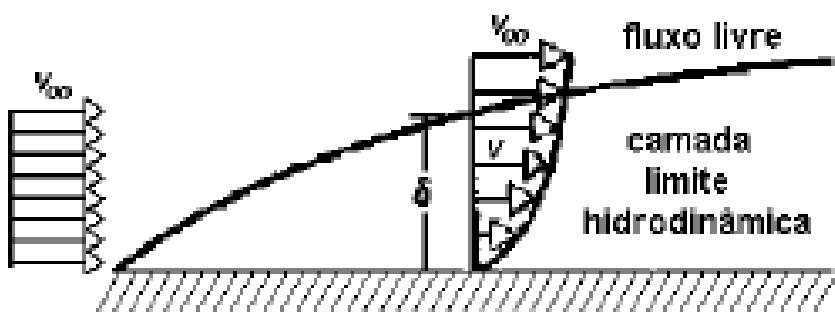


Figura 11 Desenho esquemático da camada limite hidrodinâmica

Em relação a um perfil temos o seguinte comportamento ilustrado na figura abaixo:

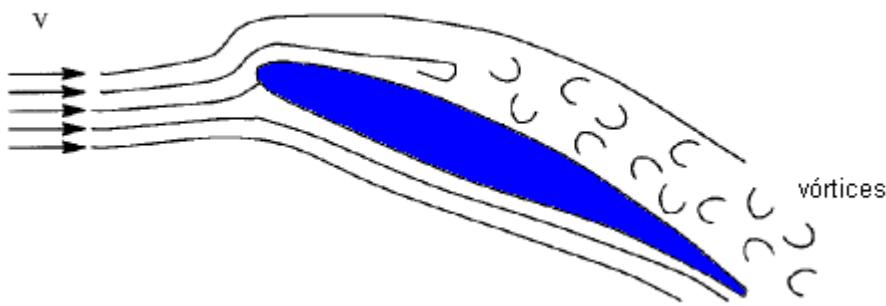


Figura 12 Descolamento da camada limite em perfil de asa

Ao longo de uma placa plana, a camada limite continua a crescer na direção de jusante, independente do comprimento da placa, quando o gradiente de pressão permanece nulo. Com a pressão decrescendo em direção a jusante, como numa redução cônica, a espessura da camada limite tende a se reduzir.

Para gradientes de pressão adversos, isto é, com a pressão aumentando em direção a jusante, a espessura da camada limite cresce rapidamente. O gradiente adverso juntamente com o cisalhamento na fronteira diminuem a quantidade de movimento na camada limite e, se os dois agirem sobre uma certa distância, a camada limite irá ter velocidade nula; este fenômeno é chamado descolamento.

2.3 QUALIDADE DE ASA

O termo chamado qualidade da asa denota uma relação entre o arrasto e a sustentação de um perfil de asa mostrado na relação a seguir [2].

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{C_L}{C_D} = K$$

Onde:

K = qualidade da asa;

C_L = coeficiente de sustentação;

C_D = coeficiente de arrasto;

Esta relação / conceito pode ser utilizado por duas vertentes:

- Algébrica: através da determinação dos valores e cálculo direto do valor;
- Experimental: o valor de K pode ser entendido como o máximo ângulo de ataque que pode ser dado a um perfil para obtermos a maximização da relação entre arrasto e sustentação.

Este conceito é ilustrado nas figuras abaixo.

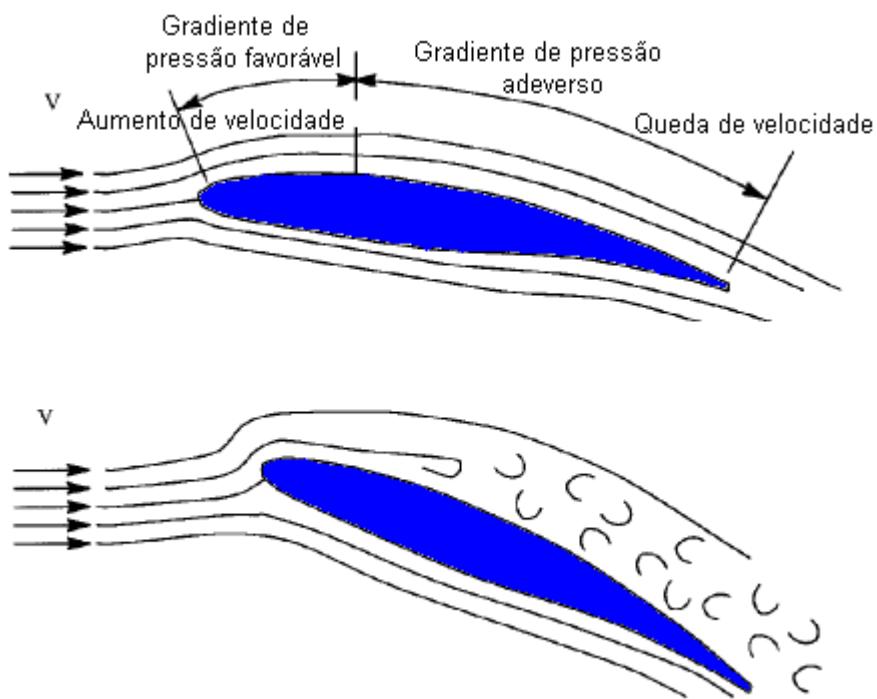


Figura 13 Ângulo de ataque vs. Qualidade da asa

2.4 ELEMENTOS DE UM PERFIL DE ASA

Observa-se o perfil da asa de um avião:

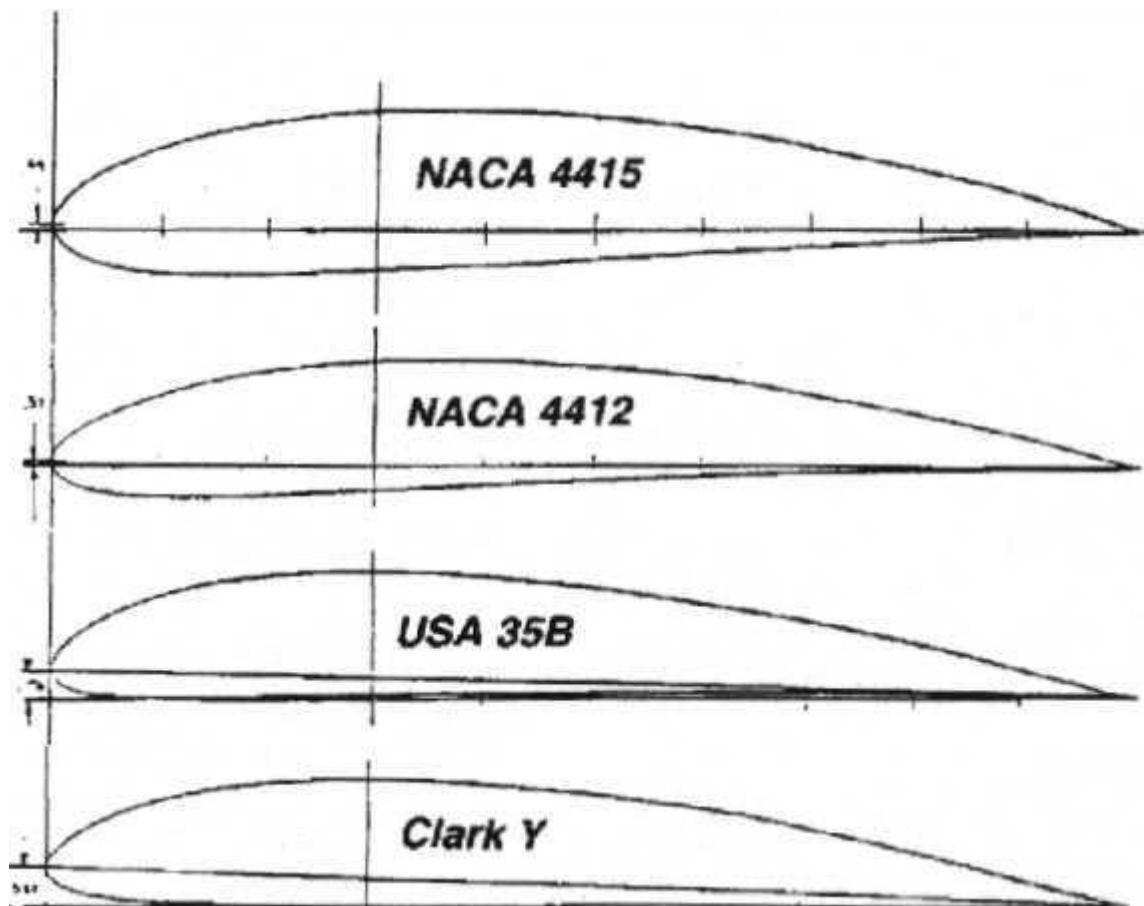


Figura 14 Exemplo de perfis de asa

Os perfis de asas podem ser de duas maneiras: Os perfis com os dois lados iguais são chamados **simétricos**, e são normalmente usados para os componentes da empenagem, como a deriva e os estabilizadores. Os perfis com lados de formato diferentes, assim como o da figura, são chamados **assimétricos**.

Os elementos de um perfil de uma asa são:

- Bordo de Ataque: É a extremidade dianteira do perfil, onde o ar bate primeiro.
- Bordo de Fuga: É a extremidade traseira do perfil, por onde o ar escoa e livra a asa.
- Extradorso: É a superfície superior do perfil, o lado de cima.
- Intradorso: É a superfície inferior do perfil, o lado de baixo.

- **Corda:** É uma linha reta imaginária que liga o bordo de ataque ao bordo de fuga.
- **Linha de Curvatura Média:** É a linha que separa igualmente o extradorso do intradorso.
- **Ângulo de Ataque:** são as mudanças que ocorrem no ângulo relativo de incidência do ar sobre a asa. Esse ângulo não tem a ver com a atitude da aeronave em relação ao horizonte, é apenas o ângulo formado pela corda da asa e o fluxo relativo que bate no bordo de ataque.

A partir de certo ângulo de ataque, o vento relativo passa a percorrer um caminho maior por cima do que por baixo, pois o intradorso diminui a sua área de incidência do escoamento ao passo que o extradorso aumenta a mesma. Isso produzirá a situação de sustentação.

Segue aqui um quadro com as características de cada tipo de perfil de asa.

Perfil Assimétrico	Perfil Simétrico
Produz sustentação no ângulo nulo	No ângulo nulo a sustentação é nula
Com determinado ângulo de ataque, a sustentação aumenta e o avião sobe	Com o mesmo ângulo de ataque positivo, a sustentação apenas mantém o avião em vôo reto horizontal.
O ângulo de ataque invertido durante o vôo de dorso é maior que o do vôo normal.	O ângulo de ataque no vôo de dorso é igual ao ângulo de ataque do vôo normal.

3 PROJETO

3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Antes da construção propriamente dita foi feito um estudo sobre os projetos já existentes nessa área para delimitarmos algumas premissas básicas. Foram analisados projetos de mini túneis de vento da UNISANTA, de estudantes da NASA, UPF entre outros donde obtivemos os seguintes resultados:

- Quanto ao tamanho da seção transversal do túnel:
 - A seção mais utilizada mede 400 x 400 mm;
 - A área útil da seção é de apenas 10% a área nominal da seção [4], ou seja, a área da seção transversal do corpo a ser testado deve ter no máximo 16000 mm² e como pretendíamos utilizar um perfil de maior área optamos por utilizar uma seção de 500 x 500 mm, o que nos leva a um corpo de teste com 25000 mm² (50 % maior que a comum).
- Ventilador vs. Exaustor:
 - A maioria dos túneis analisados utiliza exaustores ao invés de ventiladores por causarem menor turbulência no fluxo de ar, em consequência disto possibilitam a construção de túneis menores, logo optamos pelo exaustor.
- Potencia do motor:
 - A potencia media gira em torno de 400 watt obtendo baixas velocidades na seção de teste algo em torno de 5 m/s.
 - A potencia usada no projeto foi fixada em 1117.5 w por já possuirmos um motor com tal valor.
- Uso da seção de estabilização:
 - Esta peça raramente é utilizada neste tipo de túnel devido à sua baixa velocidade, mais sempre recomendada indistintamente para velocidades acima de 10 m/s(dez metros por segundo), como já possuímos peça que pode cumprir tal papel decidimos utiliza – la (devido ainda ao possível turbilhonamento gerado pelo exaustor).

3.2 DIMENSIONAMENTO

3.2.1 Nariz

O elemento em questão é formado por uma curva regida por uma equação específica chamada curva de Vitoshinskii [3] mostrada abaixo

$$r = \frac{r_0}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{r_0}{r_1}\right)\right]^2 \frac{\left(1 - 3x^3/a^2\right)^3}{\left(1 + 3x^3/a^2\right)^2}}} \quad (1)$$

Onde:

r → raio da seção infinitésima do nariz;

r₀ → raio inicial da seção do nariz (no caso da seção ser circular) ou raio do círculo inscrito da seção inicial do nariz;

r₁ → raio final da seção do nariz (no caso da seção ser circular) ou raio do círculo inscrito da seção final do nariz;

x → ponto da curva infinitesimal do nariz (implemento);

a → ;

Sendo que:

$$a = 4r_0 \quad (2)$$

Na Tabela 1, mostra – se os valores da plotagem da equação 1.

X	Incremento	R
0,00	0,03	0,50000000
0,03	0,03	0,49969659
0,06	0,03	0,49759129
0,09	0,03	0,49203604
0,12	0,03	0,48183940
0,15	0,03	0,46660841
0,18	0,03	0,44690379
0,21	0,03	0,42406469
0,24	0,03	0,39978175
0,27	0,03	0,37565164
0,30	0,03	0,35289962
0,33	0,03	0,33230427
0,36	0,03	0,31425538
0,39	0,03	0,29886096
0,42	0,03	0,28605012
0,45	0,03	0,27565079
0,48	0,03	0,26744050
0,51	0,03	0,26117537
0,54	0,03	0,25660399
0,57	0,03	0,25347172
0,60	0,03	0,25151925
0,63	0,03	0,25047880
0,66	0,03	0,25007031
0,69	0,03	0,25000007

Tabela 2 Valores de x e r

A partir destes resultados obtidos foi levantada uma curva que seria usada para construção do nariz mostrada em anexo.

OBS.:

- O incremento de 0,03 foi escolhido para gerar maior precisão de plotagem no programa AUTO CAD, pois o comando utilizado para plotagem da curva (SPLINE) os pontos são inseridos um a um gerando assim a curva.

3.2.2 Ventilador / Motor

O conjunto ventilador / motor foi dimensionado a partir dos seguintes variáveis de projeto:

- Velocidade do ar na seção de teste: 12 m/s;
- Utilização de um motor elétrico de 1,5 HP já existente.
- Mínima geração de turbulência no escoamento;

Com base nestas premissas decidimos por utilizar um exaustor simples com 6 pás.

A partir da informação de que a velocidade na seção de teste deve ser de aproximadamente 12 m/s foi utilizado a equação de Bernoulli [3] seguindo o esquema abaixo.

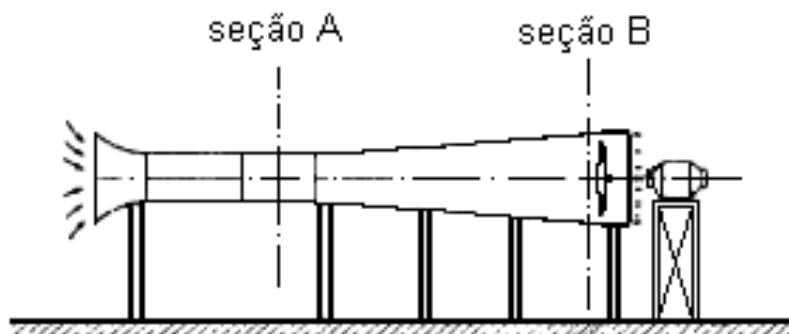


Figura 15 Desenho esquemático das seções

Sendo:

Seção A = seção de teste;

Seção B = seção imediatamente a frente do ventilador;

$$P_a + \frac{\rho V_a^2}{2} = P_b + \frac{\rho V_b^2}{2} \quad (3)$$

Sendo:

P_a = pressão estática na seção A (Pa);

P_b = pressão estática na seção B (Pa);

V_A = velocidade na seção A (m/s);

V_B = velocidade na seção B (m/s);

ρ = densidade do ar

Desprezando as variações de pressão entre as seções e usando conservação de massa temos que:

$$A_a V_a = A_b V_b \quad (4)$$

Logo temos:

$$V_b = \frac{A_a}{A_b} V_a$$

$$V_b = \frac{0,5^2}{\pi * 0,3^2} * 12$$

$$V_b = 10,61 \text{ m/s}$$

Logo a vazão do exaustor será:

$$Q = V_{b.} * A_{sb} \quad (5)$$

Sendo:

Q = Vazão do exaustor (m^3/s);

V_b = velocidade da seção B

A_{sb} = área da seção transversal da seção B (supondo que o diâmetro do exaustor seja de 600 mm)

$$Q = V_{b.} * A_{sb}$$

$$Q = 10,61 * \frac{1}{4} \pi D^2$$

$$Q = 10,61 * \frac{1}{4} \pi (0,6)^2$$

$$Q = 2,998 m^3 / s$$

$$Q = 179,903 m^3 / min$$

$$Q \approx 179,9 m^3 / min$$

Em consulta a catálogos de fabricantes foi constatado que um exaustor com esta dimensão acoplado a um motor de 1,5 HP possui uma vazão de 160 m^3 / min , ou seja aproximadamente 90% do valor de projeto e como buscamos um baixo custo utilizaremos esta medida o que nos levará ao seguinte equacionamento.

$$Q = V_{b.} * A_{sb}$$

$$Q = 160 \text{ m}^3 / \text{min}$$

$$Q = 2,666 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$2,666 = V_b * \frac{1}{4} \pi D^2$$

$$2,666 = V_b * \frac{1}{4} \pi (0,6)^2$$

$$V_b = 9,429 \text{ m / s}$$

$$V_b \approx 9,43 \text{ m / s}$$

O que resulta em uma variação de 6,7 % na velocidade, o que para os testes objetivados é perfeitamente aceitável.

3.2.3 Difusor

O dimensionamento do difusor foi baseado no ângulo de difusão, ou seja, o ângulo de abertura da seção. Segundo pesquisa feita entre construtores este ângulo pode variar de 6 graus a 12 graus, sendo o primeiro valor o mais indicado devido à suavidade gerada a seção[4]. A seguir uma figura esquemática do difusor em um túnel de vento.

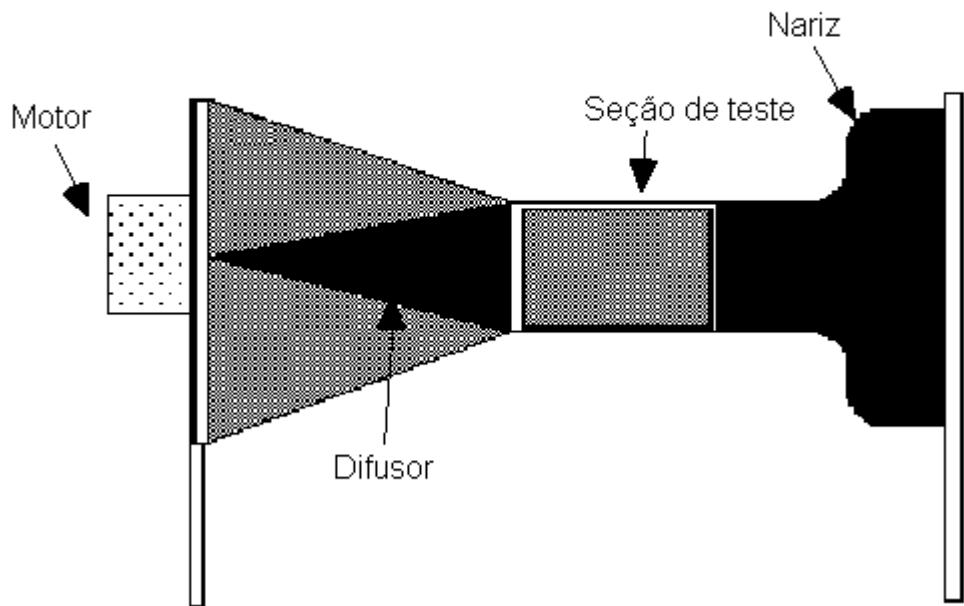


Figura 16 Exemplo de difusor em um desenho esquemático

Com o ângulo definido calculamos o comprimento necessário.

$$\operatorname{tg} 6 = \frac{50}{comp}$$

$$comp = \frac{50}{\operatorname{tg} 6} = 457.7 \text{ mm}$$

Com o seu comprimento determinado, suas seções de entrada e saída já foram determinadas em dimensionamentos anteriores.

- Seção de entrada: é a mesma seção transversal do túnel (50 x 50 cm);

- Seção de saída: é a mesma seção transversal do exaustor (60 cm de diâmetro);

3.3 CONSTRUÇÃO

Após a definição dos parâmetros de projeto, deu-se início fase de construção, detalhadas através de figuras.

3.3.1 Fabricação do exaustor.

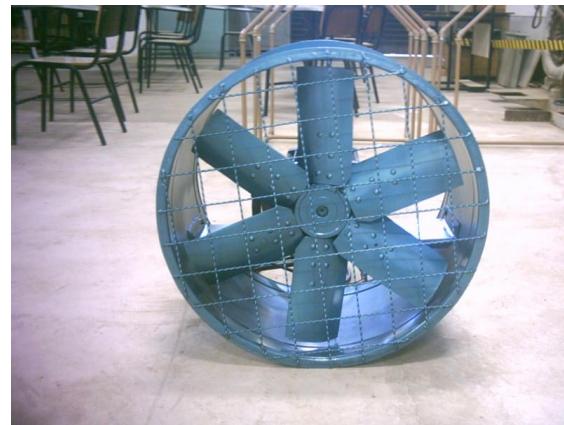


Figura 17 Exaustor utilizado no túnel de vento

3.3.2 Fabricação do difusor.



Figura 18 Difusor em fibra de vidro

3.3.3 Fabricação do nariz



Figura 19 nariz em fibra de vidro

3.3.4 Fabricação Colméia

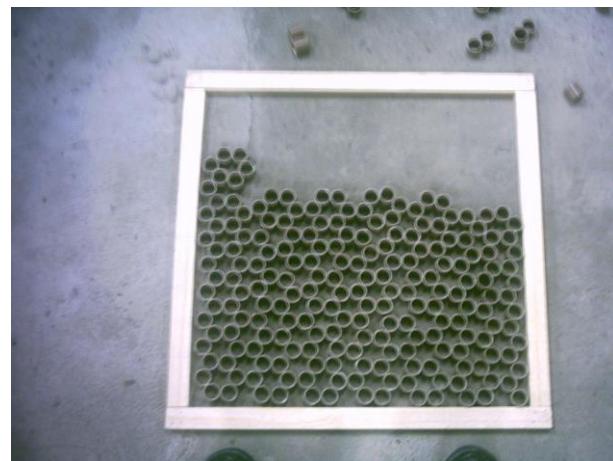


Figura 20 Colméia em tubos de PVC.

3.3.4 Fabricação do aerofólio



Figura 21 Aerofólio em madeira e revestido com plástico térmico

3.3.5 Túnel de vento em fase final de montagem



Figura 22 Túnel de vendo da Universidade Federal do Espírito Santo

4 EXPERIÊNCIAS

O túnel de vento possui ampla gama de experimentos possíveis, dos quais realizamos dois que serão citados abaixo:

4.1 TESTES DE PERFIS DE ASA NO TOCANTE A QUALIDADE DE ASA.

Este teste consiste na instalação de um perfil de asa na seção de teste do túnel por meio de uma haste roscada visando através da variação do seu ângulo de ataque determinar seu ângulo de ataque máximo antes do descolamento da camada limite, ou seja, determinarmos de maneira experimental a qualidade de asa[2].

Abaixo uma foto de um perfil Simétrico no referido teste ,primeiramente um ângulo de ataque nulo depois com um ângulo de ataque da qualidade de asa.

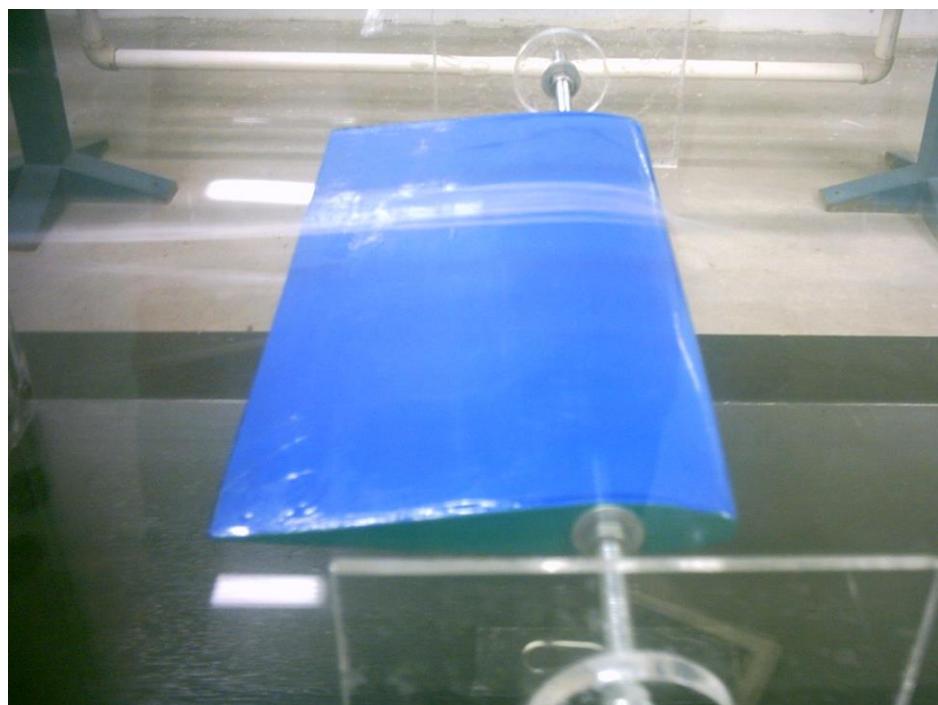


Figura 23 Foto de perfil simétrico com ângulo de ataque nulo

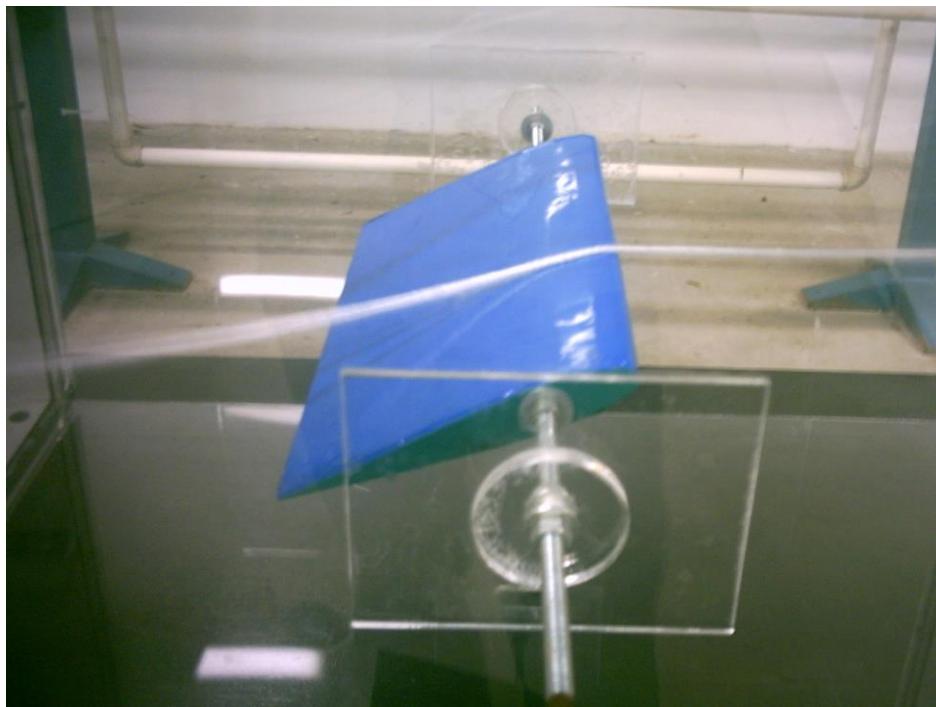


Figura 24 Foto de perfil simétrico com ângulo de ataque positivo

- Através de análise visual verifica-se a diferença do posicionamento do descolamento da camada limite com a variação do ângulo de ataque.
- Teste de perda de carga

Este teste tem como objetivo determinar de maneira teórica a perda de carga na seção de teste a partir da captação de dados práticos oriundos do túnel de vento.

A partir de tomadas de pressão feitas no nariz do túnel que são ligadas à um manômetro de coluna d'água obtém-se a diferença de pressão entre a seção de entrada do nariz e a de entrada da seção de estabilização. De posse destes dados utiliza-se a equação [9] e é possível a determinação da velocidade média na seção de teste.

A foto mostra o manômetro de coluna d'água ligado ao túnel



Figura 25 Túnel ligado ao painel manômetro

Em teste realizado obtivemos os seguintes resultados:

$$\Delta h = 6\text{mm}$$

Logo:

$$w = \rho_{LIQ} * g$$

$$w = 1 * 10^3 * 9,81$$

$$V_B = \sqrt{\frac{2w\Delta h}{\rho[1 - (\frac{A_B}{A_A})^2]}}$$

$$V_B = \sqrt{\frac{2 * 1 * 10^3 * 9,81 * 6 * 10^{-3}}{1,204[1 - (0,5^2 / 1^2)^2]}}$$

$$V_B = 10,22 \text{ m/s}$$

Por meio de medições com uso de anemômetro chegamos ao seguinte valor:

$$V_B = 10,29 \text{ m/s}$$

Conforme mostrado em foto abaixo:



Figura 26 Verificação da velocidade com o anemômetro

Figura 20 Verificação da velocidade com o anemômetro

A diferença encontrada nos dois métodos foi da ordem de um por cento, mostrando uma grande precisão do método e sendo esta pequena variação acontecida por não sabermos ao certo o comportamento do fluxo de ar com relação as paredes do túnel.

5 SUGESTÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DO TÚNEL

O túnel de vento é um equipamento de grande potencial de estudo, tanto em nível acadêmico quanto industrial, logo faremos algumas sugestões para ampliar esta gama de possibilidades de trabalho.

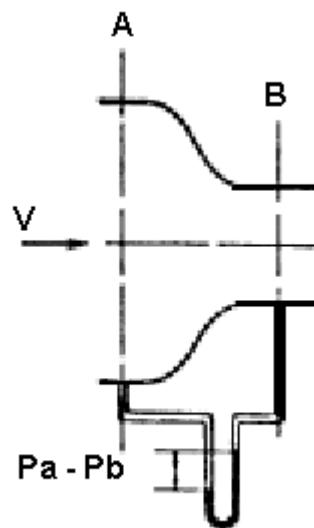
5.1 INVERSOR DE FREQÜÊNCIA

O inversor de freqüência possibilitaria o controle da velocidade de funcionamento do motor elétrico acoplado ao exaustor, logo assim poderíamos variar a sua vazão e em consequência disto à velocidade do ar na seção de teste.

5.2 MEDIDOR DE PRESSÃO DE ENTRADA

A inclusão de um instrumento de medição de pressão à entrada do túnel nos possibilitaria a medição da velocidade na seção de entrada e termos como compara – la com a velocidade na seção de teste, tendo assim uma possibilidade de medirmos perda de carga.

O medidor de velocidade sugerido obedece o seguinte diagrama esquemático



Logo a partir deste diagrama esquemático temos o seguinte equacionamento:

$$P_a + \frac{\rho V_a^2}{2} = P_b + \frac{\rho V_b^2}{2} \quad (4)$$

Pela equação da continuidade temos:

$$A_a * V_a = A_b * V_b = A_c * V_c \quad (6)$$

Logo temos que:

$$V_b = \frac{A_a}{A_b} V_a$$

$$V_c = \frac{A_b}{A_c} V_b$$

A variação de pressão nas seções influenciando a velocidade pode ser modelada pela equação de Bernouli donde se tem:

$$V_B^2 = \frac{2}{\rho}(P_A - P_B) + V_A^2$$

Logo a velocidade na seção de teste é dada por:

$$V_B = \sqrt{\frac{2(P_A - P_B)}{\rho[1 - (\frac{A_B}{A_A})^2]}} \quad (7)$$

Como já existe na UFES, um medidor de pressão do tipo painel de fluido, que mede a pressão por diferença de altura de um fluido de parâmetros conhecidos temos que:

$$P_A - P_B = w\Delta h \quad (8)$$

Onde:

W = peso por unidade de volume do fluido manométrico;

Δh = diferença de cota entre as colunas de fluido.

Logo temos:

$$V_B = \sqrt{\frac{2w\Delta h}{\rho[1 - (\frac{A_B}{A_A})^2]}} \quad (9)$$

Onde:

w = peso por unidade de volume do fluido manométrico

$$w = \rho_{LIQ} * g \quad (9)$$

Δh = Diferença de cota entre as colunas de fluido

COMO OS VALORES SÃO MUITO BAIXOS PARA Δh , O QUE É DE DIFÍCIL PERCEPÇÃO NO TIPO DE MANÔMETRO UTILIZADO SUGERIMOS A UTILIZAÇÃO DE UM MANÔMETRO DE COLUNA INCLINADA PARA OS TESTES, GERANDO ASSIM MAIOR FACILIDADE DE LEITURA E PRECISÃO NOS RESULTADOS.

5.3 PERFIL AERODINÂMICO COM PONTOS PARA TOMADA DE PRESSÃO

A utilização de perfil com tomada de pressão aumenta a gama de experimentos no que diz respeito a força de arrasto e de sustentação, já que através de equacionamento e levantamento de dados pode-se obter os valores dessas forças e assim, fazer uma comparação com a variação do ângulo de ataque.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o projeto e construção do túnel de vento surge na Universidade Federal do Espírito Santo uma nova forma de estudo, análise e obtenção de dados no que diz respeito a escoamento sobre perfis aerodinâmicos e fenômenos atmosféricos.

O túnel de vento aqui descrito supera todas as expectativas, haja vista que os parâmetros coletados através de experimentos condizem com os calculados, como a velocidade do escoamento, e as experiências desenvolvidas foram de fácil visualização e trouxeram os resultados condizentes.

Esse equipamento terá utilidade não só para pesquisas e desenvolvimento de projeto, mas também para fins didáticos. Assim, acredita-se que, além do conhecimento pessoal adquirido por nós, participantes desse projeto, o mesmo poderá prover de conhecimento outras pessoas.

7 REFERÊNCIAS

- [1] CREDER, Hélio. *Instalações de ar condicionado*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos Científicos, 1981.
- [2] DA SILVA, Lopes. *Mecânica dos Fluidos*. Rio de Janeiro, Makron Books , 1985.
- [3] BRADSHAW, Phil. *Techinal Notes Design rules for small low speed wind tunnels*, Melbourne, USA, The Aeronautical Journal of de Royal Aeronautical Society, Novembro 1979.
- [4] FRANK, Jorgen, *Dark's Wind Tunnel*, [s.l:s.n,1997?].
- [5] BUXTON, Tood, FLEET, Tood, ISRAEL, Davelene, HEILMAN, Jeffrey, HUMPHERY, Joshua, MONGIARDO, James. *The Wandering Wind Tunnel*, Hopocan, Barberton High School, USA, Janeiro 1995.
- [6] PRAVIA, Zacarias. *Um protótipo de um Mini Túnel de Vento (MTV) para ensino de graduação*, COBENGE, Passo Fundo, RS, 2003.
- [7] STREETER, Victor; WYLIE, E. *Mecânica dos Fluidos*, 7. ed. Rio de Janeiro, Mc Graw Hill.