



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE
VENTO SUBSÔNICO DO TIPO SUCÇÃO**

LAYSA ALMEIDA CAFÉ

CRUZ DAS ALMAS- BA
Agosto/2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA CENTRO DE CIÊNCIAS
EXATAS E TECNOLÓGICAS BACHARELADO EM CIÊNCIAS EXATAS E
TECNOLÓGICAS**

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO SUBSÔNICO DO TIPO SUCCÃO

LAYSA ALMEIDA CAFÉ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Ciências Exatas e Tecnológicas.

Orientador: Prof. Me. Adelson Ribeiro de Almeida Júnior

CRUZ DAS ALMAS – BA
Agosto/2018

LAYSA ALMEIDA CAFÉ

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO SUBSÔNICO DO TIPO SUCÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Ciências Exatas e Tecnológicas.

Aprovado em: ____ de ____ de ____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Me. Adelson Ribeiro de Almeida Júnior
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB

Prof. Me. Vânio Vicente Santos de Souza
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB

Prof. Esp. Cliver da Rocha Silva
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB

CRUZ DAS ALMAS – BA
Agosto/2018

Esforça-te e sê valente!

Josué 1:9

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

A Deus, pela Sua eterna graça, me considero abençoada,

Aos meus pais, que me criaram, amaram e me ensinaram princípios que levo para a vida,

Ao meu irmão, que sempre me apoiou nas minhas escolhas,

A minha família inteira, sem ela eu não seria tão feliz,

A Neto, além do amor, agradeço pela amizade,

A Adelson, meu professor, orientador e além de tudo conselheiro, sem sua ajuda eu não seria capaz de realizar esse trabalho,

A Lu, também chamada de Coisinha, pela amizade que foi iniciada na universidade, mas que permanecerá além dela,

A Raydan, e todos os meus AMIGOS da equipe EARB, pelos risos e pela paixão compartilhada no projeto,

Aqueles que me apoiaram e ajudaram essa jornada. Nem todos são citados aqui, porém sabem que têm meu apreço.

RESUMO

O presente trabalho trata do desenvolvimento do projeto e construção de um túnel de vento de circuito aberto subsônico do tipo sucção, cuja finalidade é servir como instrumento de análise aerodinâmica para o Laboratório de Engenharia Mecânica da UFRB. A partir de uma abordagem teórica, tanto da mecânica dos fluidos quanto da bibliografia disponível sobre túneis de vento, foi possível coletar as informações necessárias para realização desse projeto. Como premissa de projeto, foi adotado como sistema gerador de fluxo uma ventoinha axial já disponível no Laboratório de Usinagem da UFRB, sendo essa desprovida dos dados do fabricante. Devido a isso, não foi possível dimensionar o túnel a partir da pressão total fornecida pelo ventilador, sendo necessário basear-se em projetos com propósitos similares para definir as dimensões iniciais da seção de testes. Para tanto, o túnel foi definido com uma seção de trabalho retangular de 200mmx200mmx400mm, área considerada suficiente para acomodar protótipos e perfis aerodinâmicos, além de prováveis instrumentos de medidas necessários para análises de determinados parâmetros. Para sua fabricação, priorizou-se o uso de materiais de baixo custo e fáceis de serem manuseados. O custo total de fabricação foi de R\$ 264,90, o resultado obtido foi um túnel de vento com comprimento total de 2m, possuindo uma velocidade média na seção de testes de 8,5m/s, considerada satisfatória para o fim ao qual o túnel foi construído.

PALAVRAS-CHAVE: Mecânica dos fluidos, Túnel de vento subsônico, Análise aerodinâmica.

ABSTRACT

The present work deals with the development of the project and construction of an open subsonic wind tunnel of suction, whose purpose is to serve as an aerodynamic analysis instrument for the Mechanical Engineering Laboratory of UFRB. From a theoretical approach, both the fluid mechanics and the available bibliography on wind tunnels, it was possible to collect the necessary information to carry out this project. As a premise, an axial fan already available in the Machining Laboratory of the UFRB was used as a flow generating system, which is devoid of the manufacturer's data. Due to this, it was not possible to size the tunnel from the total pressure supplied by the fan, being necessary to base on projects with similar purposes to define the initial dimensions of the section of tests. Therefore, the tunnel was defined with a rectangular working section of 200mmx200mmx400mm, an area considered sufficient to accommodate prototypes and aerodynamic profiles, as well as likely evaluation tools for parameter announcements. For its manufacture, the use of low-cost and easy-to-handle materials was prioritized. The total cost of manufacture was R \$ 264.90, the result was a wind tunnel with a total length of 2m, with an average velocity in the section of tests of 8.5m / s, considered satisfactory for the end to which the tunnel was built.

KEYWORDS: Fluid mechanics, Subsonic wind tunnel, Aerodynamic analysis.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio da conservação da massa	18
Figura 2 -Desenvolvimento da camada limite em uma placa plana.....	23
Figura 3 - Desenvolvimento da camada limite em um duto de seção variada.....	24
Figura 4 – Vista do Túnel de vento transônico da NASA.....	26
Figura 5 – Túnel de vento de circuito aberto do tipo soprador.	27
Figura 6 - Túnel de vento de retorno aberto do tipo sucção.	28
Figura 7 – Elementos de um túnel de vento do tipo sucção.	29
Figura 8 - Parâmetros do bocal de contração.	31
Figura 9 – Parâmetros do difusor.	32
Figura 10 - Vista explodida de uma câmara de estabilização.	33
Figura 11- Tipos de favos de mel.	33
Figura 12 - Ventiladores axial (1) e centrífugo (2).	34
Figura 13 - Perspectiva isométrica do túnel de vento proposto.	35
Figura 14- Principais dimensões do túnel de vento.	36
Figura 15 - Croqui da seção de teste.	37
Figura 16 - Perfil do bocal de contração.....	38
Figura 17- Formato do difusor.	38
Figura 18 - Estrutura da câmara de estabilização.	39
Figura 19 - Ventilador axial de 8 pás.	40
Figura 20 - Fonte de corrente contínua utilizada.	40
Figura 21 - Seção de teste semiacabada.	42
Figura 22 - Adoçamento dos cantos internos da seção de teste.....	43
Figura 23 - Bocal de contração semiacabado.	44
Figura 24 - Estrutura do difusor semiacabada.....	45
Figura 25 - Câmara de estabilização semiacabada.....	46
Figura 26 - Esboço do suporte utilizado no túnel de vento.....	47
Figura 27 - Estrutura do túnel de vento finalizada.	48
Figura 28 - Vista do suporte feito para o ventilador.	49
Figura 29 - Esquema de ligação do ventilador.	50
Figura 30 - Modelo de anemômetro utilizado na medição da velocidade.	51
Figura 31 - Regiões de medida da velocidade na seção de testes.	51
Figura 32 - Medição da velocidade com anemômetro.....	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características de um escoamento confinado segundo o número de Reynolds.	22
Tabela 2 - Classificação da faixa operacional do túnel quanto ao Número de Mach.	29
Tabela 3 - Valores das velocidades nos pontos de medida.....	52
Tabela 4 - Dados de entrada.	53
Tabela 5 - Custos dos materiais utilizados na fabricação do túnel de vento.	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BWG *Birmingham Wire Gauge* (Medida de Arame de Birmingham).

EVA Espuma Vinílica Acetinada.

MDF *Medium Density Fiberboard* (Placa de fibra de média densidade).

PVC Policloreto de Polivinila.

UFRB Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

LISTA DE SÍMBOLOS

Δm_{vc} Variação mássica em um volume de controle

Δt Intervalo de tempo

\dot{m} Vazão mássica

ρ Massa específica

A Área da seção transversal

V Velocidade

P Pressão

g Gravidade

z Elevação em relação à um plano horizontal

P_{tot} Pressão total

P_s Pressão estática

P_d Pressão dinâmica

P_{atm} Pressão atmosférica

Ma Número de Mach

c Velocidade do som

Re Número de Reynolds

D Diâmetro da seção circular

ν Viscosidade cinemática

τ Tensão de cisalhamento

u Velocidade do escoamento

δ Espessura da camada limite

u_∞ Velocidade do escoamento livre

h_L Perda de carga f Fator de atrito

L Comprimento

Rugosidade h_{lm} Perda de
carga localizada

K Coeficiente de atrito

R_1 e R_2 Respectivamente, o diâmetro hidráulico de entrada e saída do difusor

CR = razão da área de contração

2θ Ângulo total de divergência

X' Distância no eixo das abscissas da entrada do bocal em direção à saída

$Y(X')$ Coordenada no eixo y em função de X'

H_i Raio do círculo inscrito na seção de entrada do bocal

H_e Raio do círculo inscrito na seção de saída do bocal

P Potência

U Tensão

I Corrente

Q Vazão Volumétrica

A_s Área da seção transversal imediata a entrada de ar do exaustor

V_s Velocidade do ar imediata a entrada do exaustor

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivos	16
1.1.1. Objetivo geral.....	16
1.1.2. Objetivos específicos.....	16
1.1.3. Justificativa.....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1. Conceitos Fundamentais da Mecânica dos Fluidos	17
2.1.1. escoamentos.....	17
2.1.2. Equação da Continuidade.....	18
2.1.3. Equação de Bernoulli.....	19
2.1.4. Pressão.....	20
2.1.5. Número de Mach.....	20
2.1.6. Número de Reynolds.....	21
2.1.7. Camada Limite.....	22
2.1.8. Perdas de carga nos componentes.....	25
2.2. Túneis de Vento	25
2.2.1. Classificação dos túneis de vento.....	25
2.2.1.1 Classificação quanto à geometria	26
2.2.1.2 Classificação quanto à velocidade	28
2.2.2. Componentes de um túnel de vento.....	29
2.2.2.1. Seção de teste.....	30
2.2.2.2. Bocal de contração.....	30
2.2.2.3. Difusor.....	32
2.2.2.4. Câmara de estabilização.....	32
2.2.2.5. Ventiladores.....	34

3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1. Dimensionamento	36
3.2. Construção dos componentes.....	41
3.3. Montagem do túnel de vento.....	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1. Faixa operacional obtida	50
4.2. Regime de escoamento na seção de testes	53
4.3. Custos do projeto	54
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
5.1. Recomendações para trabalhos futuros.....	56
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUÇÃO

Túneis de vento podem ser descritos como estruturas laboratoriais que tem por finalidade a simulação do fluxo de ar tal qual como ocorre na natureza (ANDERSON JR, 2015). Seu objetivo é possibilitar o estudo do efeito de um fluido, nesse caso o ar, sobre um determinado objeto, estando esse em escala real ou reduzida. É um recurso amplamente utilizado pelas indústrias aeronáutica, naval, automobilística, civil, entre outros ramos de atividades industriais. A natureza dos experimentos que podem ser realizados nesses instrumentos varia, indo desde análises aerodinâmicas, fenômenos climatológicos, avaliação de sistemas propulsores até fenômenos aeroacústicos (BARLOW; RAE; POPE, 1999).

Estima-se que no ano 1871, o britânico Francis Wenham foi o primeiro homem a projetar e construir um túnel de vento. Porém, a evolução desse equipamento se deu na virada do século XX, acompanhando o crescimento das ciências aeronáuticas (ANDERSON JR. 2015). Hoje, mesmo com atual avanço da modelagem computacional no estudo da dinâmica dos fluidos, ainda se faz necessário testes empíricos para análise detalhada de determinados fenômenos aerodinâmicos, visto que nem sempre é possível modelar um fenômeno físico com total exatidão. Além disso, tais métodos exigem processadores avançados para obtenção dos dados e os resultados, por muitas vezes, possuem uma interpretação complexa. Por esse motivo, os túneis de vento são ferramentas essenciais para análises aerodinâmicas, estando presentes tanto em instituições de ensino quanto em indústrias de ponta.

Devido a diversidade de estudos que podem ser realizados em túneis de vento, existem uma gama de configurações possíveis do dispositivo, visando atender as particularidades de cada pesquisa. Algumas delas serão brevemente apresentadas no referido trabalho, porém, o presente estudo dedicou-se ao projeto e construção de uma configuração específica, o túnel de vento subsônico do tipo sucção.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Construir um túnel de vento subsônico de retorno aberto do tipo sucção utilizando para isso materiais de baixo custo. Além disso, analisar parâmetros físicos envolvidos no sistema.

1.1.2. Objetivos específicos

- Utilizar como premissa de projeto o ventilador axial já existente no Laboratório de Usinagem da UFRB;
- Dimensionar os componentes do túnel;
- Avaliar a velocidade de escoamento obtida na seção de trabalho, através do instrumento digital anemômetro;
- Obter o regime de escoamento na seção de testes, baseando-se no número de Reynolds;
- Por meio de uma tabela de custo, apresentar o orçamento do projeto.

1.1.3. Justificativa

Foi percebida a necessidade de um segundo túnel de vento no Laboratório de Engenharia Mecânica da UFRB, com velocidade de operação superior à do túnel já existente realizado por Ferreira (2017). A ferramenta será útil tanto para fins didáticos quanto para projetos de pesquisa, envolvendo os fenômenos aerodinâmicos e seus efeitos sobre objetos em escala.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Conceitos Fundamentais da Mecânica dos Fluidos

Uma substância pode ser definida como um fluido quando sua taxa de deformação cresce proporcionalmente à tensão de cisalhamento aplicada, ou seja, quando ela é capaz de escoar. A mecânica dos fluidos pode ser compreendida como a ciência derivada da mecânica aplicada responsável pelo estudo da estática e dinâmica dos fluidos (MUNSON, 2004).

2.1.1. Escoamentos

Quando tratamos de fluidos em movimento, podemos lidar com diversos tipos de escoamentos. Para fins de estudo, costuma-se classificar os escoamentos de acordo com alguns parâmetros físicos, considerando o comportamento dos mesmos ao longo do tempo e do espaço (ROMA, 2003 apud GOMES, 2012).

Em relação a viscosidade, pode-se classificar um escoamento como viscoso quando é considerado o efeito do atrito do fluido com a superfície de contato. Quando analisamos um escoamento que está suficientemente afastado de uma superfície, é comum desprezarmos o efeito da viscosidade para simplificação das análises, classificando-o assim como escoamento invíscido (ÇENGEL E CIMBALA, 2007).

Se em um fluxo, o volume da massa do fluido varia ao longo do seu movimento, podemos classificá-lo como escoamento compressível. Escoamentos cuja densidade do fluido permanece praticamente constante são denominados incompressíveis (ÇENGEL E CIMBALA, 2007).

De acordo com a dependência do tempo, um escoamento pode ser de regime permanente ou não permanente. Um escoamento permanente (ou estacionário) segundo Fox (2006), pode ser entendido quando em um dado ponto fixo do fluido as propriedades não variam com o tempo. Em pontos distintos pode haver, por exemplo, diferentes velocidades das partículas, porém em cada ponto a velocidade permanece constante. Escoamento em regime não permanente (ou variável) é aquele cujas

propriedades em um ponto são função do tempo e das coordenadas, sendo esse o tipo de escoamento mais recorrente (QUINTELA, 1981).

Classifica-se ainda um escoamento de acordo com o estado de ordenamento das partículas do fluido. Um escoamento laminar é caracterizado por camadas de fluidos que se comportam de maneira suave durante sua trajetória em um regime de fluxo. Escoamentos com desordem das partículas, em movimentos considerados caóticos, são compreendidos como escoamentos turbulentos (ÇENGEL E CIMBALA, 2007).

2.1.2. Equação da Continuidade

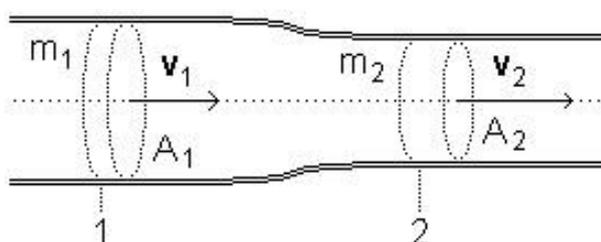
A equação da continuidade segue o princípio da conservação de massa. Sendo \dot{m} a vazão mássica (massa que atravessa uma seção transversal em um intervalo de tempo Δt) (ANDERSON JR., 2015), expressa por:

$$\frac{\Delta m_{VC}}{\Delta t} = \dot{m} = \rho AV \quad (1)$$

E partindo do pressuposto que matéria não pode ser criada ou destruída, como declarado por Lavoisier (1785), podemos aplicar o balanço de massa para um escoamento de fluido constante em regime estacionário, no intervalo do instante entre 1 e 2 (Figura 1), obtendo assim a equação abaixo:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (2)$$

Figura 1 - Princípio da conservação da massa



Fonte: GEF - Repositório Digital da UFRGS.

Resumidamente, a equação da continuidade (2) afirma, através da relação entre densidade, velocidade e área da seção transversal normal a linha de corrente, que a transferência total de massa em um volume de controle é igual a variação total da massa nesse volume de controle durante o mesmo intervalo de tempo Δt (ÇENGEL E CIMBALA, 2007).

2.1.3. Equação de Bernoulli

Em 1738, Bernoulli propôs umas das equações mais utilizadas na mecânica dos fluidos, que relacionava variações de pressão com aquelas de velocidade e elevação ao longo de uma linha de corrente. A equação Bernoulli, por ter interesse prático, é largamente utilizada em diversas situações. Contudo, para que haja validade na equação formulada por Bernoulli são necessárias algumas considerações. Primeiramente, deve-se considerar uma região do escoamento na qual os efeitos da viscosidade são desprezíveis, o escoamento deve ser incompressível e de regime permanente, além disso, a equação deve ser aplicada a uma mesma linha de corrente (MUNSON, 2004).

A dedução da equação de Bernoulli tem origem no princípio da conservação do trabalho e energia. Segundo Çengel e Cimbala (2007), pode ser entendida como um balanço da energia mecânica envolvendo energia cinética, potencial e de escoamento ao longo de uma linha de corrente.

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{constante} \quad (3)$$

Como a energia é transferida para um sistema em forma de trabalho, e segundo Munson (2004, p. 100) “quando uma partícula se move, tanto a força gravitacional quanto as de pressão realizam trabalho sobre a partícula”, podemos afirmar que o trabalho realizado por essas forças é equivalente ao aumento da energia cinética da partícula (ÇENGEL E CIMBALA, 2007). Para que haja o balanço da energia mecânica proposto por Bernoulli, a recíproca deve ser verdadeira, ou seja, se desconsiderarmos os efeitos da força gravitacional, a diferença de pressão de um escoamento está associada a variação da energia cinética do mesmo.

2.1.4. Pressão

Um dos parâmetros mais importantes na mecânica dos fluidos é a pressão. Fisicamente, conhecemos por pressão o efeito de uma força normal agindo sobre determinada área. Para um fluido em movimento, a pressão total (P_{tot}) é uma soma das contribuições da pressão estática (P_s) com a pressão dinâmica (P_d).

$$P_{tot} = P_s + P_d \quad (4)$$

Tratando-se da pressão, se multiplicarmos toda equação de Bernoulli pela densidade (ρ) do fluido, obtemos um trinômio (equação 5) formado pela contribuição de diferentes tipos de pressão, a pressão hidrostática (ρgz), a pressão dinâmica ($\frac{1}{2}\rho V^2$) e a pressão estática (P).

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gz = constante \quad (5)$$

Em um escoamento cujas hipóteses do princípio de Bernoulli são satisfeitas, se desconsiderarmos o efeito da elevação da linha de corrente ($\rho gz = 0$), o que ocorre na maioria dos casos práticos, a equação (5) se resume a soma das pressões estática e dinâmica, que equivale a pressão total, também chamada de pressão de estagnação. Essa correlação nos leva à outra interpretação para equação de Bernoulli, que a pressão total ao longo de uma linha de corrente é constante.

2.1.5. Número de Mach

Munson (2004 p.633) interpreta o número de Mach “como uma medida adimensional da compressibilidade do fluido no escoamento”. É definido pelo quociente entre a velocidade local do escoamento (V) e a velocidade local do som (c).

$$Ma = \frac{\text{Forças inerciais}}{\text{Forças de compressibilidade}} = \frac{V}{c} \quad (6)$$

O número de Mach classifica um regime de fluxo com $Ma < 0,3$ como um escoamento incompressível, ou seja, a variação da densidade do fluido é ínfima e pode ser desconsiderada. Para $Ma > 0,3$, os efeitos da compressibilidade podem ser sentidos e devem ser considerados em análises fluidodinâmicas (ANDERSON JR., 2015).

2.1.6. Número de Reynolds

O número de Reynolds pode ser entendido como um parâmetro adimensional capaz de determinar o comportamento de um escoamento, caracterizando-o como turbulento ou laminar. Pode ser expresso pela razão entre as forças inerciais com as forças viscosas que agem sobre um elemento de fluido.

$$Re = \frac{\text{Forças inerciais}}{\text{Forças viscosas}} = \frac{VD}{\nu} \quad (7)$$

Sendo, V a velocidade média do escoamento, D o diâmetro da seção circular do duto e ν a viscosidade cinemática do fluido.

Tabela 1 - Características de um escoamento confinado segundo o número de Reynolds.

Número de Reynolds	Regime de escoamento
$0 < Re < 1$	Movimento laminar altamente viscoso
$1 < Re < 100$	Laminar, forte dependência do número de Reynolds
$100 < Re < 10^3$	Laminar, a teoria da camada-limite é útil
$10^3 < Re < 10^4$	Transição para a turbulência
$10^4 < Re < 10^6$	Turbulento, dependência moderada do número de Reynolds
$10^6 < Re < \infty$	Turbulento, fraca dependência do número de Reynolds

Fonte: Adaptado de White, 2011.

Na tabela 1 é possível identificar o regime de um escoamento confinado segundo o número de Reynolds. Através do adimensional, é possível analisar o estado de turbulência que se encontra o fluido e sua relação com os efeitos da camada limite, conceito apresentado no próximo subtópico. É válido ressaltar, que o regime dependerá de fatores como rugosidade da superfície do duto, velocidade do fluxo, geometria na qual o fluido escoar, entre outros (WHITE, 2011).

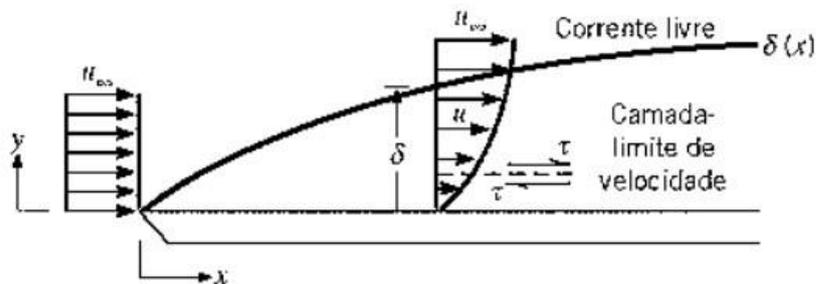
2.1.7. Camada Limite

Munson (2004, p. 488) afirma que “Se o número de Reynolds for grande o suficiente, o escoamento será controlado pelos efeitos de inércia e os efeitos viscosos serão desprezíveis, exceto nas regiões adjacentes a placa”. Isso se deve ao fato de que, quando existe movimento relativo entre um fluido real e uma superfície sólida, as moléculas do fluido tendem a aderir-se imediatamente a superfície devido a fricção com a parede, fenômeno decorrente da condição de não escorregamento. Por consequência, a camada de fluido imediata a parede sólida assume velocidade zero, e acaba por retardar uma fina camada de fluxo na vizinhança da superfície em contato.

Essa região onde os efeitos da viscosidade são sentidos é chamada de camada limite (ANDERSON JR., 2015).

Segundo Currie (2003), Prandtl em 1904 através de seu artigo introduzindo o conceito de camada limite, conseguiu conciliar duas questões contraditórias dentro da mecânica dos fluidos. Ele constatou que em baixas velocidades os efeitos da viscosidade podem ser desconsiderados na maior parte do campo de fluxo. Simultaneamente, confirmou que por menor que seja a viscosidade, a condição de não escorregamento na superfície de contato deve ser satisfeita.

Figura 2 -Desenvolvimento da camada limite em uma placa plana.

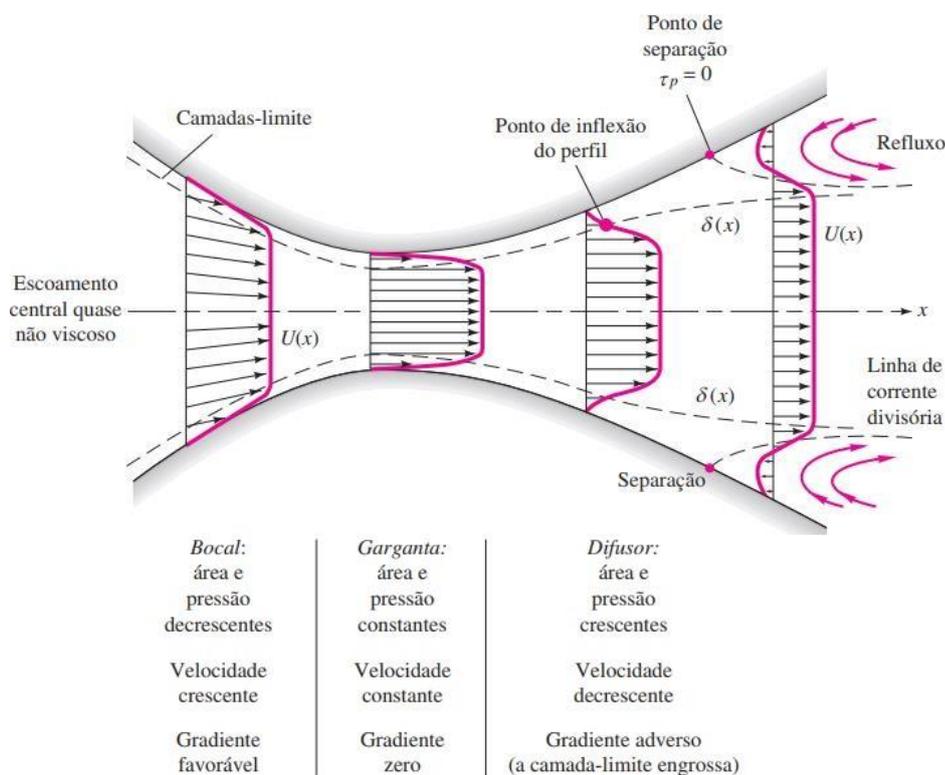


Fonte: Incropera et al., 2008.

Considerando um escoamento sobre uma placa plana (Figura 2), as tensões de cisalhamento (τ), devido ao atrito com a parede, influenciam diretamente no gradiente de velocidade do fluxo. Imediato a superfície, a velocidade u possui valor zero, e um perfil de velocidade é formado conforme o afastamento da parede. A espessura da camada limite (δ) pode ser definida como um valor de y no qual a velocidade u chega a 99% do valor da velocidade do escoamento livre (u_∞). A partir desse ponto, na região de escoamento livre, os efeitos da viscosidade são desprezíveis, caracterizando assim a fronteira da camada limite como uma divisa de duas regiões distintas (INCROPERA et al., 2008).

O mesmo ocorre em escoamentos confinados, em um duto de seção constante, existe um perfil de velocidade ao longo da seção transversal devido aos efeitos da camada limite. Como uma camada de fluxo é retardada nas paredes, existe no centro da seção uma velocidade média maior, de modo a compensar a perda de velocidade e manter a vazão constante (ÇENGEL E CIMBALA, 2007).

Figura 3 - Desenvolvimento da camada limite em um duto de seção variada.



Fonte: White, 2011.

Para um duto de seção variável, como ilustrado na figura 3, o perfil de velocidade é também dependente da diferença de pressão entre as regiões do duto. No bocal onde há diminuição da área, ocorre uma queda de pressão e um aumento da velocidade, nessa situação, podemos dizer que o gradiente de pressão é favorável. Na garganta onde a área é constante, a pressão e velocidade não variam e o gradiente de pressão é praticamente zero. Já no difusor, onde ocorre um aumento de pressão e diminuição da velocidade, existe um gradiente de pressão adverso, responsável pela separação da camada limite, fazendo com que a eficiência da recuperação de pressão seja comprometida (WHITE, 2011).

2.1.8. Perdas de carga nos componentes

A perda de carga (h_L) pode ser definida como “a altura adicional à qual o fluido precisa ser elevado por uma bomba para superar as perdas por atrito do tubo” (ÇENGEL E CIMBALA, 2007, p. 285). Matematicamente, a perda de carga é dada por:

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (8)$$

Sendo f o fator de atrito, expresso por:

$$f = f(Re_d, \frac{\varepsilon}{d}, \text{formato do duto}) \quad (9)$$

Segundo White (2011), existem ainda as perdas menores as quais um escoamento está susceptível. Acessórios, curvas, mudanças bruscas de áreas e regiões de separação da camada limite, são alguns agentes que provocam as perdas de cargas adicionais (h_{lm}), essas podem ser calculadas a partir da seguinte equação:

$$h_{lm} = K \frac{V^2}{2} \quad (10)$$

Sendo K o coeficiente de perda de carga. É um fator obtido experimentalmente, porém é possível de ser calculado através de formulações matemáticas (WHITE, 2011).

2.2. Túneis de Vento

2.2.1. Classificação dos túneis de vento

Mediante os diferentes objetos que podem ser ensaiados em túneis de vento, é razoável afirmar que existem diversas configurações possíveis para esse instrumento (BARLOW; RAE; POPE, 1999). Apesar das peculiaridades morfológicas e operacionais que um túnel de vento pode assumir visando satisfazer as

necessidades de um estudo, eles podem ser classificados essencialmente quanto à geometria e quanto à velocidade do escoamento na seção de testes.

2.2.1.1 Classificação quanto à geometria

Existem basicamente dois modelos de túneis de vento, são estes: túneis de circuito fechado e túneis de circuito aberto.

- **Túneis de vento de circuito fechado**

A figura 4 ilustra um túnel de circuito fechado localizado na Virgínia, no centro de pesquisa de campo da NASA (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço). Nesse tipo de túnel, o ar percorre um circuito fechado de forma cíclica, tendo um aproveitamento da energia cinética e um escoamento praticamente livre de impurezas da atmosfera. Porém, devido ao ar ser recirculado, existe nesse modelo a dificuldade em estudos que utilizam fumaça para visualização das linhas de corrente (BARLOW; RAE; POPE, 1999).

Figura 4 – Vista do Túnel de vento transônico da NASA.



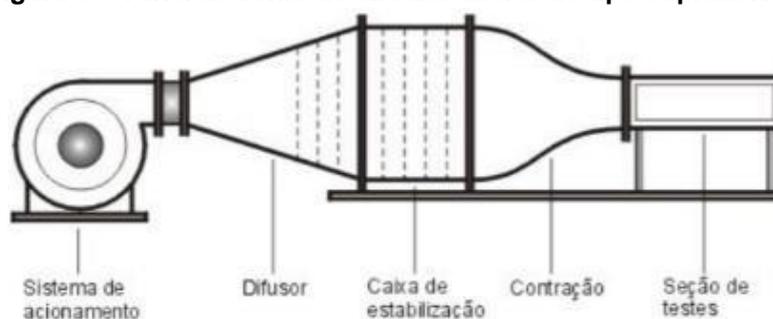
Fonte: NASA.

- **Túneis de vento de circuito aberto**

Os túneis de vento de circuito aberto, comparados com túneis de circuito fechado, são dimensionamento menores e têm sua composição mais simplificada. Por esse motivo, são economicamente mais viáveis e de fácil fabricação, além de serem comportados facilmente em laboratórios didáticos. Dentre as vantagens dos túneis de vento de circuito aberto pode-se citar o fácil acesso a seção de teste e a possibilidade do uso de fumaça em determinados ensaios. Em contrapartida, esses modelos exigem maior potência do ventilador além da inconstância da velocidade do fluido (GROFF, 2001 apud ARRIAS et al, 2008).

Tratando dos túneis de circuito aberto, o sistema de produção de fluxo utilizado determina se o túnel será do tipo soprador ou de sucção. O primeiro tipo é ilustrado na figura 5, neles são utilizados normalmente ventiladores centrífugos, posicionados antes da seção de testes. Túneis do tipo sopradores possuem a vantagem de gerar menos ruído e ter maior estabilidade na geração do fluxo de ar (BRADSHAW E MEHTA, 1979).

Figura 5 – Túnel de vento de circuito aberto do tipo soprador.



Fonte: Moreira Jr. e Antuniassi, 2010.

Os túneis de circuito aberto de sucção diferem dos sopradores na posição de alguns componentes. Como mostrado na figura 6, o ventilador, normalmente axial, se localiza após a seção de teste, sendo o último elemento do túnel. Nessa configuração, o ar aspirado pelo túnel fica suscetível as condições da atmosfera local, sendo sensível a pressões relativas e correntes de ar. Por esse motivo, é comum o uso da câmara de estabilização contendo telas anti-turbulência e colmeias (ou favos de mel), dispositivos também utilizados nos modelos sopradores.

Figura 6 - Túnel de vento de retorno aberto do tipo sucção.



Fonte: Universidade de Maryland.

Pode-se citar como uma vantagem dessa configuração, que “o duvidoso ar vindo da sala do túnel pode ser menos perturbado do que o que vem de um ventilador.” (Bradshaw e Mehta 1979, p.443, tradução nossa). Apesar de deixarem claro sua preferência pelos modelos sopradores, os autores Bradshaw e Mehta (1979) consideram insensato estabelecer um modelo único que possa ser considerado ótimo, diante de tantos requisitos considerados em um projeto de túnel de vento.

2.2.1.2 Classificação quanto à velocidade

Em relação a velocidade na seção de testes, os túneis de vento se classificam conforme o número de Mach, é possível observar essa distribuição através da tabela 2. De acordo com a NASA, a importância dessa relação da velocidade de trabalho na seção de testes com a velocidade do som dá-se pelos efeitos da compressibilidade, que já podem ser sentidos para $Ma \geq 1$.

Tabela 2 - Classificação da faixa operacional do túnel quanto ao Número de Mach.

Mach (Ma)	Escoamento
Ma<1	Subsônico
Ma=1	Sônico
Ma>1	Supersônico
Ma>>1	Hipersônico

Fonte: Autora, 2018.

2.2.2. Componentes de um túnel de vento

Os componentes que constituem um túnel diferem tanto em modelo quanto na ordem dependendo da configuração adotada. No presente trabalho, será utilizada a configuração de circuito aberto por sucção, na figura 7 é mostrado os elementos contidos e suas respectivas posições nesse modelo.

Figura 7 – Elementos de um túnel de vento do tipo sucção.



Fonte: Adaptado de Entreportes, 2016.

2.2.2.1. Seção de teste

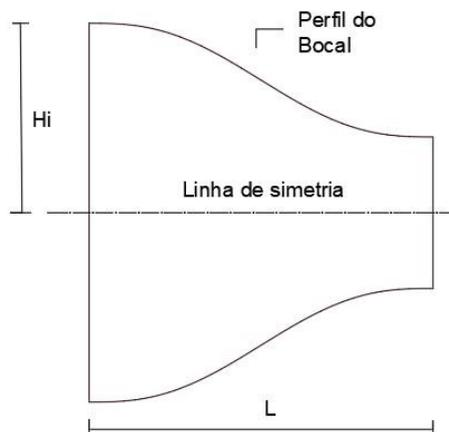
Corresponde ao trecho do túnel onde o ar desloca-se com maior velocidade, conseqüentemente havendo grande perda de carga devido a fricção do fluido com as paredes (JOHANSSON E LINDGRE, 2002). É a seção do túnel de vento responsável por acomodar o objeto de estudo, por esse motivo tanto sua geometria quanto os instrumentos de medida instalados são projetados que não provoquem efeitos de turbulência ou interferências sobre o corpo de prova.

Segundo Barlow, Rae e Pope (1999), a forma transversal da seção de testes é insignificante em termos de perda de carga. Devido a facilidade de fabricação e por acomodar melhor os instrumentos de medição utiliza-se normalmente paredes planas. Porém, Coutinho (2014) recomenda a instalação de filetes nos cantos da seção afim de manter a pressão estática constante e evitar o alargamento excessivo da camada limite ao longo do comprimento.

Quanto às dimensões, aconselha-se para seção transversal uma razão de aspecto de 1,5 (BARLOW; RAE; POPE, 1999), entretanto, diversos túneis já projetados possuem seções quadradas. O comprimento deve estar numa faixa de 0,5 à 3 vezes o diâmetro hidráulico da seção de testes, havendo projetos que excedem esse valor, segundo Bradshaw e Mehta (1979).

2.2.2.2. Bocal de contração

A contração é um bocal convergente responsável pelo aumento da velocidade do fluxo de ar na seção de trabalho. Bradshaw e Pankhurst (1964) recomendam para contrações de túneis de vento de baixa velocidade uma razão entre áreas de 6 a 12. Além disso, para se obter linhas de fluxo uniformes e constantes na saída da contração deve-se optar pela escolha adequada de dois parâmetros considerados críticos, são estes: o comprimento da contração e sua forma específica (GUPTA, 2012 apud ZANOUN, 2017).

Figura 8 - Parâmetros do bocal de contração.

Fonte: Autora, 2018.

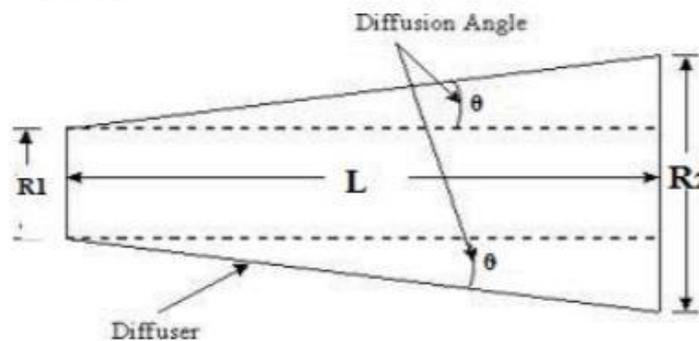
Para se estabelecer o comprimento do bocal, deve-se ponderar alguns fatores. Contrações mais curtas tendem a diminuir a espessura da camada limite, porém aumentam o risco de sua separação na saída do bocal, causando turbulência do fluxo na seção de teste. (MOREL, 1975). Como forma de atenuar o problema, Morel (1975) recomenda que o comprimento seja aumentado suficientemente, porém, o uso de um perfil adequado deve ser escolhido, de modo que se evite a separação da camada limite, sem que haja o aumento da espessura da mesma. Sendo assim, ele propôs que o comprimento da contração estivesse uma faixa de $0.75 < L/H_i < 1.25$, sendo L o comprimento do bocal e H_i na altura da entrada em relação a linha de simetria (Figura 8).

Devido a necessidade de um perfil adequado, muitos estudos a respeito do *design* de contrações foram realizados, Mikhail (1979), Morel (1975) e Bell e Mehta (1988) se dedicaram a estudos minuciosos a respeito de curvas ótimas para contrações de túneis de vento, uma delas será apresentada posteriormente no referido trabalho.

2.2.2.3. Difusor

Difusores são bocais divergentes que convertem energia cinética em energia de pressão, função oposta dos bocais de contração. Em túneis de vento, seu objetivo é reduzir a velocidade e recuperar a queda de pressão do fluxo de ar que sai da sessão de testes. Para que isso ocorra, dois fatores são determinantes: uma razão entre áreas (R_2/R_1) de 2-3 (BARLOW; RAE; POPE, 1999) e uma expansão suave com ângulo cônico (θ) não superior a 5° (BRADSHAW E MEHTA, 1979). Caso contrário, um ângulo muito grande causaria um gradiente de pressão adverso, fazendo com que a camada limite se descolasse das paredes do difusor, comprometendo a recuperação da queda de pressão e gerando perdas de carga e refluxo (WHITE, 2011). Através da figura 9 é possível concluir que em posse dos parâmetros citados e utilizando uma simples relação trigonométrica, obtém-se o comprimento desejado para o difusor.

Figura 9 – Parâmetros do difusor.

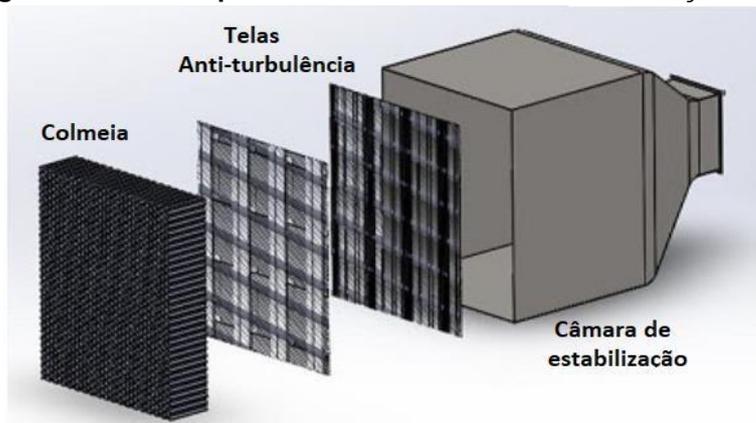


Fonte: Dsouza; Concessao; Quadros, 2015.

2.2.2.4. Câmara de estabilização

A câmara de estabilização é a seção responsável por acomodar as colmeias e as telas anti-turbulência. A principal função de cada um desses dispositivos é explicada a seguir.

Figura 10 - Vista explodida de uma câmara de estabilização.

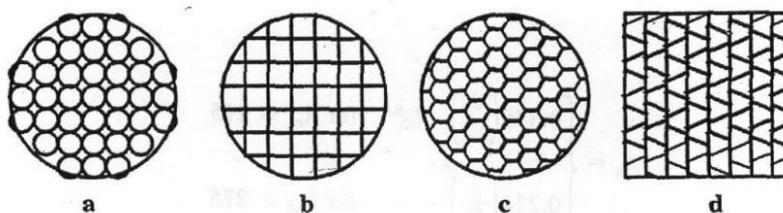


Fonte: Adaptado de Controlled Sand Dispersion Wind Tunnel.

- **Colmeias**

As colmeias são armações com finalidade de ordenar os filamentos de ar, tornando-os paralelos (PRANDTL, 1933 apud Barlow, Rae e Pope, 1999). A estrutura recebe esse nome devido ao formato remeter um favo de mel (Figura 10). No projeto das colmeias são considerados parâmetros como diâmetro hidráulico celular e porosidade, visando a mínimo de perda de carga possível.

Figura 11- Tipos de favos de mel.



Fonte: Barlow; Rae; Pope, 1999.

O tamanho das células geralmente é pequeno, de até $\frac{1}{4}$ " (BRADSHAW E PANKHURST,1964), e o comprimento deve estar entre seis ou oito vezes o diâmetro hidráulico unicelular, segundo Barlow, Rae e Pope (1999).

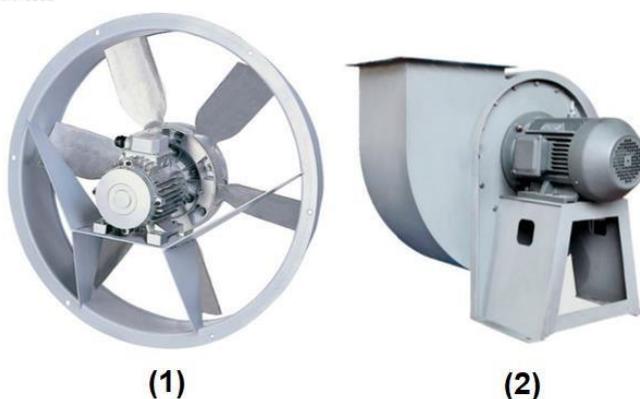
- **Telas anti-turbulência**

Como as colmeias não fornecem uma velocidade de fluxo constante, é necessário para isso o uso das telas de anti-turbulência. As telas de arames mantêm uma relação proporcional de resistência do fluxo de ar conforme o aumento da velocidade, Prandtl (1933, p.14 apud Barlow, Rae e Pope, 1999) conclui que “ [...] o filamento mais rápido se expande após bater a tela, o mais lento se contrai, e assim as velocidades tornam-se comparáveis ao passar através da tela. ”

2.2.2.5. Ventiladores

Munson (2004) caracteriza os ventiladores como máquinas de fluxo capazes de promover o escoamento de gases e vapores. Coutinho (2004) declara que o propósito do ventilador no túnel de vento é superar as perdas de cargas geradas nos componentes e fornecer a vazão necessária na seção de testes. Para isso, dois modelos são normalmente utilizados, são estes: os ventiladores axiais e os ventiladores centrífugos, apresentados na figura 12. Ventiladores axiais são preferenciáveis nas configurações de circuito fechado ou aberto quando do tipo sucção, à visto disso, resta os modelos centrífugos, geralmente empregados nos modelos sopradores (BRADSHAW E MEHTA, 1979).

Figura 12 - Ventiladores axial (1) e centrífugo (2).

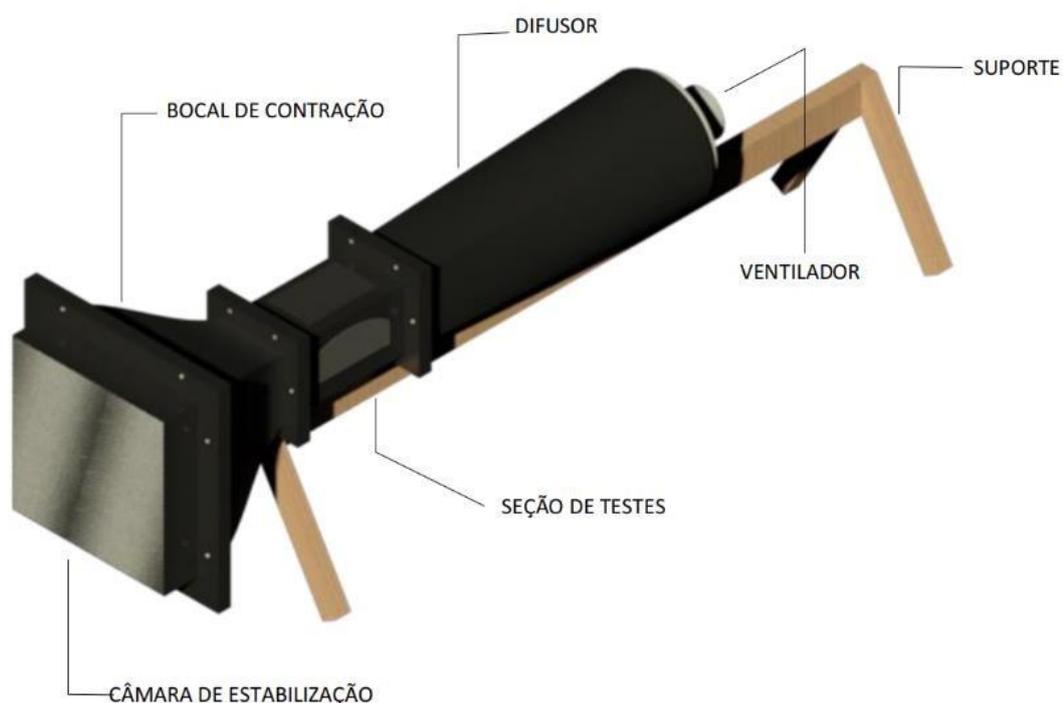


Fonte: Direct Industry.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é destinado à apresentação do dimensionamento e do processo de fabricação dos componentes do túnel de vento subsônico. Vale salientar, que o sistema de produção de fluxo não foi dimensionado a partir da queda de pressão total do túnel, como acontece em alguns projetos. Como premissa, foi adotado uma ventoinha axial já disponível no laboratório, o gerador de fluxo não apresentava dados do fabricante. De acordo com a bibliografia, o modo de aspiração do ar é mais eficiente quando se utiliza ventiladores axiais, pois propicia menor geração de turbulência na seção de testes. Partindo desse pressuposto, o túnel de vento foi caracterizado como do tipo sucção. Através do software AutoCad, foi modelado o layout proposto, representado na figura 13.

Figura 13 - Perspectiva isométrica do túnel de vento proposto.

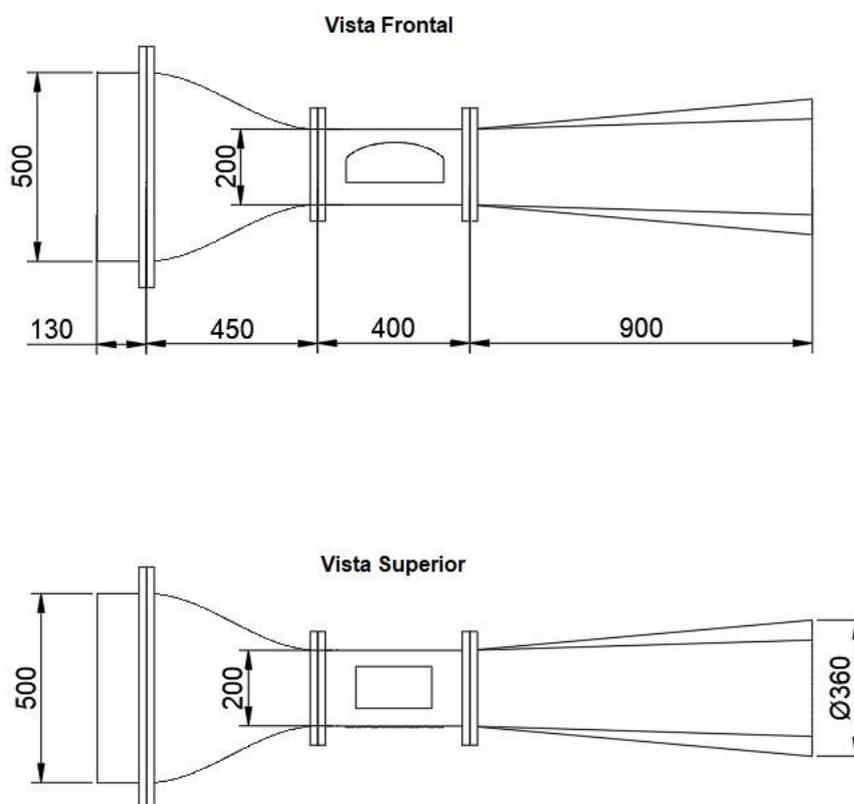


Fonte: Autora, 2018.

3.1. Dimensionamento

O dimensionamento dos componentes do túnel de vento subsônico teve como base as especificações e recomendações supracitadas na revisão da bibliografia. Na figura 14 é possível ver as principais dimensões estabelecidas para o projeto, porém o dimensionamento de cada componente será detalhado separadamente nos tópicos que se seguem.

Figura 14- Principais dimensões do túnel de vento.



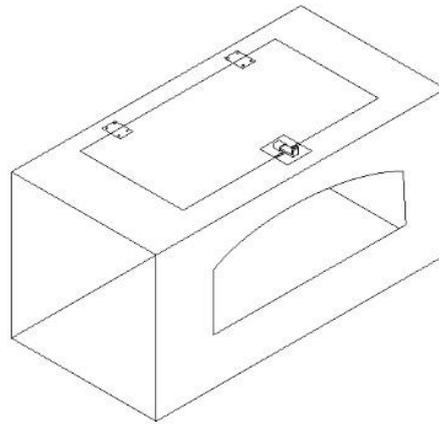
Fonte: Autora, 2018.

- **Seção de teste**

Como a seção de testes é o componente responsável por acomodar os corpos de prova, aconselha-se primeiramente seu dimensionamento em relação aos outros elementos. Visando comportar objetos em escala e instrumentos de medida necessários em análises aerodinâmicas, optou-se por uma seção transversal

quadrada de 200x200mm com 400mm de comprimento. A figura 15 detalha a posição dos elementos complementares, como a janela de visualização e a escotilha da cabine.

Figura 15 - Croqui da seção de teste.



Fonte: Autora, 2018.

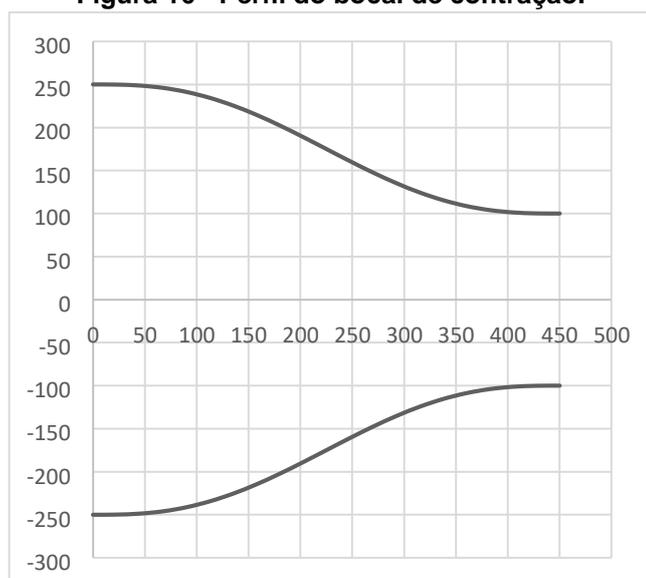
- **Bocal de contração**

Fixada a área da seção de testes, estabeleceu-se um $CR = 6.25$ para seção de entrada do bocal. Foi obtido uma seção quadrada de 500mmx500mm e comprimento de 450mm. A curva específica escolhida para contração da entrada à saída foi o polinômio de 5 grau expresso na equação (11) proposto por Bell e Mehta (1988).

$$Y(X') = H_i - (H_i - H_e)[6(X')^5 - 15(X')^4 + (10(X')^5)] \quad (11)$$

Onde, H_i é o raio de entrada do bocal (raio do círculo inscrito na seção inicial), H_e o raio de saída (raio do círculo inscrito na seção de saída) , e X' a distância no eixo X no sentido da entrada em direção a saída da contração. Utilizando o software Excel plotou-se o gráfico da função atribuída ao bocal (Figura 16).

Figura 16 - Perfil do bocal de contração.

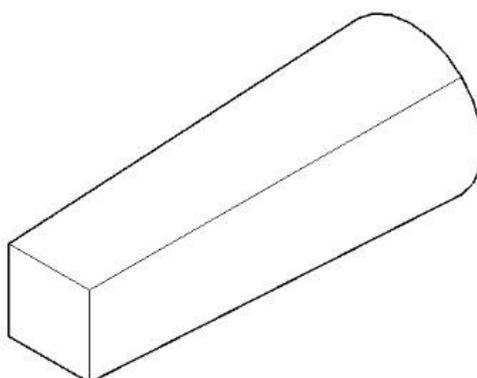


Fonte: Autora, 2018.

- **Difusor**

Sendo já estabelecida a sua seção de entrada (mesma dimensão da seção de teste) e sua seção de saída (diâmetro do ventilador), e partindo do princípio proposto por Bradshaw e Mehta (1988) onde, para difusores de túneis de vento do tipo sucção um ângulo de divergência 2θ de 10° se torna eficiente na recuperação da queda de pressão, obteve-se um difusor de seção variada com 900mm de comprimento. O formato do difusor pode ser visto na figura 17.

Figura 17- Formato do difusor.

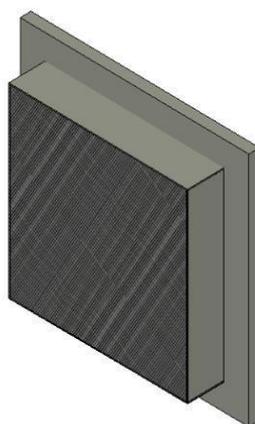


Fonte: Autora, 2018.

- **Câmara de estabilização**

Para configuração de túnel escolhida, é recomendado o uso de uma câmara de estabilização. Para compô-la, foi definida uma tela anti-turbulência, seguida de um vão de 130mm para o início do bocal de contração. Essa distância, entre a tela e a entrada da contração, respeita o espaçamento mínimo recomendado por Bradshaw e Pankhurst (1979), de 20% o comprimento do bocal. Para esse projeto, no primeiro instante optou-se pelo não uso de uma colmeia, permanecendo a geometria apresentada na figura 18.

Figura 18 - Estrutura da câmara de estabilização.



Fonte: Autora, 2018.

- **Ventilador**

O dispositivo gerador de fluxo utilizado no túnel de vento foi uma ventoinha de radiador com 8 pás já existente no laboratório (Figura 19). Devido à falta dos dados do fabricante, foi necessário realizar um procedimento para estimar a vazão fornecida pelo aparelho.

Figura 19 - Ventilador axial de 8 pás.



Fonte: Autora, 2018.

Primeiramente, o motor da ventoinha foi alimentado com uma fonte de corrente contínua de 13,8V (Figura 20), mantido no sentido de aspiração do ar. Com o auxílio de um amperímetro a corrente absorvida pelo motor foi medida, retornando um valor de 12A.

Figura 20 - Fonte de corrente contínua utilizada.



Fonte: Autora, 2018.

Em posse dessas informações, foi possível obter a potência fornecida pelo motor, através da equação 12.

$$P = U \cdot I \quad (12)$$

$$P = 13,8 V \cdot 12A$$

$$P = 165,6W$$

Sendo:

P a potência do motor, dada em watts (W);

U a tensão que o motor está submetido, dada em volts (V);

I a corrente absorvida pelo motor, dada em ampères (A).

A partir de buscas realizadas em catálogos de fabricantes de exaustores, um exaustor com dimensão e potência similares às do ventilador possuído fornece uma vazão de $0,58\text{m}^3/\text{s}$, valor considerado suficiente para o túnel projetado tendo em vista trabalhos acadêmicos similares.

3.2. Construção dos componentes

Um dos princípios propostos para o projeto do túnel de vento foi o uso de materiais de baixo custo para fabricação do mesmo. Ademais, para escolha das matérias-primas foram consideradas características mecânicas de flexibilidade e facilidade de corte e perfuração. Nos tópicos que se seguem, são explanados os procedimentos e materiais utilizados para confecção dos respectivos componentes que constituem o túnel de vento proposto.

- **Seção de testes**

Para construção da seção de testes foi utilizada uma chapa de MDF de 3mm. Nela, foram marcadas as quatro paredes que compõe a caixa da cabine e com o uso de uma serra do tipo “tico-tico” as mesmas foram cortadas. Em uma das paredes foi marcada a abertura relativa à porta e em outra o formato relativo à janela de visualização. Para o corte das duas aberturas, foi feito inicialmente um furo central com uma fresa, para posteriormente ser possível o corte com a serra dos formatos específicos.

Feito isso, para o tapamento da janela de visualização foi utilizada uma viseira de policarbonato para capacetes de moto. A fixação da viseira foi realizada utilizando fita dupla face de espuma, com intuito de vedar a saída de ar, além de pregos em suas extremidades. Em outra chapa de MDF foi marcada e cortada a porta nas dimensões

da abertura realizada para a mesma. Com o uso de duas dobradiças, um ferrolho e parafusos, a porta foi instalada. Posteriormente, as quatro laterais foram unidas com cola para madeira e pregos, estando a janela posicionada frontalmente e a porta localizada na face superior, resultando na estrutura semiacabada ilustrada na figura 21.

Figura 21 - Seção de teste semiacabada.



Fonte: Autora, 2018.

Adiante, foi feito um adoçamento de 45° nos cantos da cabine, afim de evitar o crescimento da camada limite ao longo de seu comprimento. Para isso, utilizou-se uma massa feita de serragem com cola branca (Figura 22).

Figura 22 - Adoçamento dos cantos internos da seção de teste.



Fonte: Autora, 2018.

Para o acabamento final da seção de testes, foi dada uma demão de massa para madeira nos adoçamentos, que possuíam textura áspera. Após isso, o interior a seção foi lixado e toda estrutura foi coberta com tinta à base de óleo, conferindo à madeira proteção contra umidade e acabamento superficial. Para ser possível a posterior união da seção de testes com os demais componentes do túnel, duas molduras de madeira de pinos foram postas em cada umas das extremidades, funcionando como flanges. A estrutura final obtida será mostrada no próximo tópico do presente trabalho.

- **Bocal de contração**

A fabricação do bocal foi feita inicialmente com a construção de um molde respeitando sua curva característica. Para isso, foram marcados os pontos apresentados na figura 16 em 4 folhas de papel cartão, que posteriormente foram recortadas e unidas formando a estrutura tridimensional do bocal. Após a montagem da estrutura do molde, o mesmo foi fixado em duas molduras de madeiras com as dimensões internas da área de entrada (500mmx500mm) e saída (200mmx200mm) do bocal.

Em seguida, o molde foi reforçado com uma técnica conhecida por papietagem, que consiste em camadas de papel fixadas com cola branca sobre o objeto até que

se atinja o formato e espessura desejados (Figura 23). Antes do acabamento final, foi feito um adoçamento nos cantos internos do bocal, tendo a mesma finalidade da aplicação do adoçamento na seção de testes, para isso utilizou-se a mesma técnica empregada na mesma.

Figura 23 - Bocal de contração semiacabado.



Fonte: Autora, 2018.

Para impermeabilizar toda a estrutura, foi dada uma primeira demão com uma mistura na proporção de 2:1 do solvente tipo Aguarrás em relação a tinta à base de óleo. A segunda demão tinha por objetivo o acabamento superficial, então foi utilizado apenas 10% do solvente para diluir a tinta, como recomendado pelo fabricante.

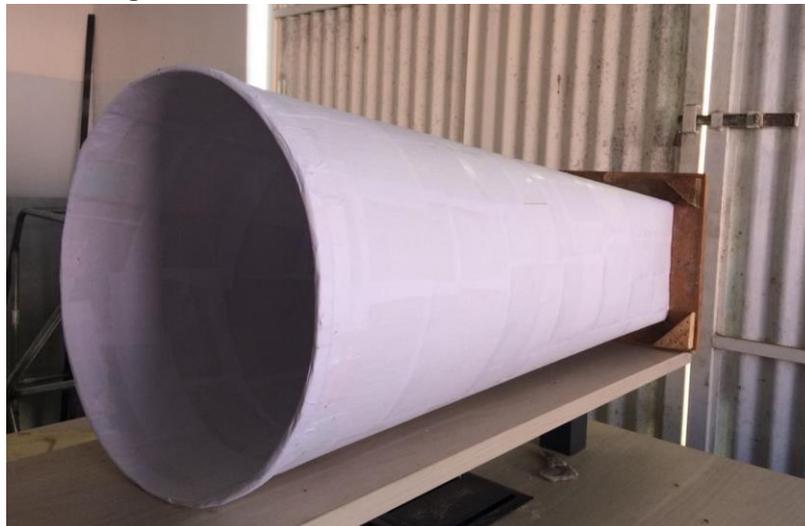
- **Difusor**

Devido a sua geometria variável, o material para fabricação do difusor deveria apresentar certa flexibilidade, por esse motivo, optou-se pelo papel paraná de 1,7mm de espessura. Preliminarmente, foi feito um tronco de cone com a união de duas folhas do material, unidas com auxílio de um grampeador tapeceiro. A área maior do tronco de cone era equivalente a circunferência do ventilador e a área menor possuía o perímetro da seção de testes.

A partir de uma moldura de madeira no formato da seção quadrada (200mmx200mm), e de um aro de aço com o diâmetro do ventilador (360mm), a estrutura obtida foi fixada em cada uma dessas molduras, tomando assim a forma

específica do difusor. Foi respeitado o comprimento definido no projeto de 900mm e ângulo cônico de 5°, o resultado obtido é ilustrado na figura 24.

Figura 24 - Estrutura do difusor semiacabada.



Fonte: Autora, 2018.

O acabamento final do difusor foi semelhante ao realizado no bocal de contração, visando a durabilidade da estrutura. Antes da aplicação da solução para impermeabilização, o difusor foi coberto com uma camada de recortes de papel sulfite, afim de suavizar os grampos resultantes da emenda do papel paraná e dar uma cobertura extra na estrutura como um todo. Finalmente, a primeira demão da mistura de solvente com tinta tinha a finalidade de encharcar o papel paraná, impermeabilizando-o, e a segunda demão tinha por objetivo o acabamento superficial e estético.

- **Câmara de estabilização**

Para estrutura da câmara de estabilização, foi feito um flange de madeira de pinos com dimensão interna de 500mmx500mm, referente à entrada do bocal. Nele, foram fixadas quatro chapas de MDF de 3mmx130mmx494mm nas paredes internas, através de cola para madeira e pregos. Para tela anti-turbulência, foi escolhida uma tela de arame galvanizado BWG 20x32, presa na entrada da câmara de estabilização com o uso de um grampeador tapeceiro. O resultado final obtido pode ser visto na figura 25.

Figura 25 - Câmara de estabilização semiacabada.



Fonte: Autora, 2018.

3.3. Montagem do túnel de vento

Após a fabricação dos componentes, foi elaborado um método de montagem para o túnel visando facilitar o acesso a cada elemento individualmente, para que quando necessário, fosse possível realizar ajustes ou substituição de peças. Desse modo, o túnel se tornaria adaptável a diferentes configurações que variariam de acordo com a necessidade do experimento realizado.

A união das peças que compõem o túnel foi feita mediante dispositivos semelhantes a um flange. As molduras fixadas nas extremidades dos componentes foram unidas umas às outras por seções de 60mm de barra enroscada de 3/8", e ajustadas com auxílio de porcas e arruelas. Para vedação do sistema foi posto entre as junções uma camada de EVA - Espuma Vinílica Acetinada.

O suporte para o conjunto de componentes foi construído com ripas de madeiras, constituído por uma tira de 2,3m de comprimento sustentada por dois apoios fixos nas extremidades em forma de cavaletes (Figura 28).

Figura 26 - Esboço do suporte utilizado no túnel de vento.



Fonte: Autora, 2018.

Já com todos os elementos unidos em sua devida ordem, o túnel de vento foi instalado no suporte, inicialmente posicionando-se em balanço a câmara de estabilização juntamente com o bocal de contração (Figura 27). A partir de uma tira de madeira que unia os dois flanges da seção de testes foi possível fixar a região da seção no suporte através de roscas e porcas de 1/4". O difusor, sendo o último elemento do túnel, foi pregado no ponto de contato de sua curva inferior com o suporte.

Figura 27 - Estrutura do túnel de vento finalizada.



Fonte: Autora, 2018.

Na instalação do ventilador ponderou-se os efeitos das vibrações e do torque gerados pelo motor para escolha do melhor modo de sua fixação. Sendo exigido alta resistência e estabilidade em seu apoio, optou-se pelo uso de barras chatas de aço na construção do mesmo. Duas barras paralelas à caixa do motor o sustentaram verticalmente, e além disso, foi posto uma barra inclinada com intuito de limitar mais um grau de liberdade (Figura 28). A união barras/suporte se deram a partir de parafusos franceses de 1/4" firmemente inseridos, já para união das barras com o motor foram utilizadas porcas auto travantes.

Figura 28 - Vista do suporte feito para o ventilador.



Fonte: Autora, 2018.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Faixa operacional obtida

Após a conclusão da fabricação do túnel e de sua posterior instalação, o motor do ventilador foi alimentado pela fonte (figura 29), ambos anteriormente utilizados anteriormente na análise da potência do ventilador.

Figura 29 - Esquema de ligação do ventilador.



Fonte: Autora, 2018.

Após uma espera necessária para estabilização do fluxo de ar, foi realizado um procedimento similar ao realizado por Ferreira (2017) para se obter a média da velocidade na seção de testes. Para medição, utilizou-se o anemômetro digital representado na figura 30.

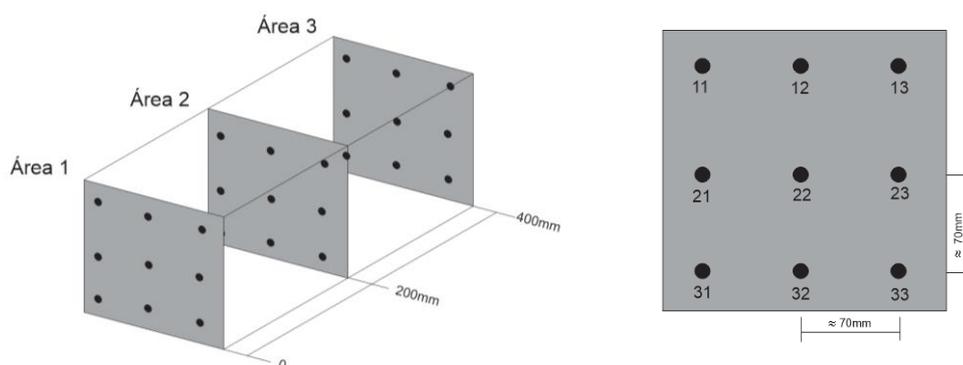
Figura 30 - Modelo de anemômetro utilizado na medição da velocidade.



Fonte: Autora, 2018.

O procedimento consiste basicamente em dividir a seção de testes em três áreas da seção transversal, localizadas no início, meio e fim. Em cada área foram medidos 9 pontos de velocidades, tais passos são exemplificados na figura 31.

Figura 31 - Regiões de medida da velocidade na seção de testes.



Fonte: Autora, 2018.

Para coletar os dados nos pontos específicos, o instrumento foi sendo fixado com fita dupla face nas paredes da seção de testes, como ilustrado na figura 32.

Figura 32 - Medição da velocidade com anemômetro.



Fonte: Autora, 2018.

Desse modo, foram medidos os 27 valores de velocidade ao longo da seção de testes. Os dados obtidos estão dispostos na tabela 3.

Tabela 3 – Valores das velocidades nos pontos de medida.

	Velocidade (m/s)								
	11	12	13	21	22	23	31	32	33
Área 1	8,3	9,1	8,5	10	10,2	10,2	8,1	4,7	5,3
Área 2	8,2	9,1	8,7	9	9,4	9	5,8	6,5	4,9
Área 3	7,8	9	7,6	7,5	7,6	7,1	3,8	4,1	7,7

Fonte: Autora, 2018.

A partir disso foi possível calcular a velocidade média na seção de testes, cujo valor obtido foi 7,67m/s. É interessante notar que há um perfil de velocidade ao longo das áreas de seção transversal. Os pontos próximos à parede da seção de testes têm velocidade reduzida, isso deve-se ao retardamento do fluxo de ar causado pelo atrito do mesmo com as paredes. Esse efeito, consequente do efeito da camada limite, tem uma região limitada. No centro da seção de testes, especificamente nos pontos 22 das três áreas distintas, há um perfil de velocidade plenamente desenvolvido, onde se encontra as velocidades mais altas.

4.2. Regime de escoamento na seção de testes

Em posse do valor da velocidade média, e a partir dos dados de entrada apresentados na tabela 4, foi possível analisar o regime de escoamento obtido através do número de Reynolds.

Tabela 4 - Dados de entrada.

Parâmetro	Valor	Unidade
Viscosidade cinemática do ar (ν)	1,51. 10 ⁻⁵	m ² /s
Diâmetro hidráulico da seção de testes (D)	0,2	m
Velocidade na seção de testes (V)	7,67	m/s

Fonte: Autora, 2018.

Aplicando os valores da tabela 3 na equação (7) obtém-se;

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{7,67 \cdot 0,2}{1,51 \cdot 10^{-5}} = 1,02 \cdot 10^5$$

O valor obtido de regime de escoamento é considerado turbulento, assim como ocorre em outros projetos de túneis de vento de baixa velocidade. O conselho proposto por White (2011) recomenda evitar no projeto de escoamentos confinados um fluxo em regime de transição, que ocorre em um Reynolds crítico entre $10^3 < Re < 10^4$. Visto isso, o valor alcançado está fora dessa faixa e usando princípios de similaridade e análise dimensional, que visam manter a coerência nos ensaios de objetos em escala em relação as condições reais, é possível de se realizar análises com resultados fidedignos no túnel de vento aqui apresentado.

4.3. Custos do projeto

Os itens e seus respectivos valores listados na tabela 5 são referentes aos materiais que foram utilizados para fabricação do túnel de vento.

Tabela 5 - Custos dos materiais utilizados na fabricação do túnel de vento.

Quantidade	Material	Valor total (R\$)
1	MDF de 3mm	45,00
5	Ripa de madeira de pinos (5x2)cmx3m	45,00
2	Folha de papel Paraná de 1,7mmx120mmx80mm	9,00
24	Porcas, arruelas	10,00
4	Parafuso Francês ¼" por 3 ½"	5,50
50	Prego	3,00
2	Barra enroscada 1/4"	11,00
1	Barra enroscada 3/8"	4,00
3	Cola Branca 1L	45,00
12	Folha de papel Cartão	14,40
1	Viseira de policarbonato	5,60
1	Fita de espuma	4,00
600mmx600mm	Tela de arame galvanizado BWG 20x32	29,00
2	EVA	5,00
1	Tinta à base de óleo	17,00
1	Solvente tipo aguarrás	12,00
TOTAL		264,90

Fonte: Autora, 2018.

Visto que o orçamento total da matéria-prima do túnel de vento foi de R\$ 264,90, é razoável afirmar que o mesmo atendeu a proposta de ser um projeto de baixo custo se comparado a projetos de portes similares, cujo orçamento geralmente é elevado devido a terceirização de serviços e uso de materiais de alto custo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A base dos estudos realizados para concretização do projeto foi considerada de grande importância, apesar de haver um número reduzido de bibliografia específica sobre túneis de vento, a mesma mostrou-se eficiente. As dimensões finais do túnel foram suficientes para atender a proposta de um aparato experimental de laboratório acadêmico. A seção de testes se mostrou propícia para acomodar objetos de diferentes dimensões, além disso, há possibilidade de instalação de equipamentos de medição. Com um orçamento baixo para o tipo de objeto construído, foi obtida uma estrutura rígida e eficaz que obedecia às regras de projetos. A respeito da velocidade, o valor de 7,67m/s está numa faixa operacional razoável e promissora para diversos ensaios aerodinâmicos. No fim do projeto, percebeu-se uma flexibilidade no transporte do túnel de vento, podendo ser utilizado como kit didático para diversos fins acadêmicos e projetos de extensão. Considerando que o objetivo do presente trabalho era a construção de um túnel de vento subsônico de baixo custo, pode-se afirmar que a conclusão do feito foi obtida com êxito.

5.1. Recomendações para trabalhos futuros

- Calcular a perda de carga total e partir disso dimensionar um gerador de fluxo que forneça a vazão necessária para suprir a perda e fornecer uma velocidade maior na seção de trabalho.
- Confeccionar uma colmeia para seção de estabilização.
- Instalar um sistema de iluminação de LED.
- Traçar o perfil de velocidade na seção de testes.
- Realizar testes em perfis aerodinâmicos.
- Utilizar o túnel de vento como kit didático em projetos de extensão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aerospace Lab 1014. University of Maryland Eastern Shore. Disponível em: <<https://www.umes.edu/Engineering/DynPage/Aerospace-Lab-1014/>>. Acesso em: 22 de Jul. de 2018.

ANDERSON JR., John D. **Fundamentos de Engenharia Aeronáutica.** 7ª ed. Editora AMGH, 2015.

ARRIAS, Lucas; et al. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO SUBSÔNICO DE CIRCUITO ABERTO PARA UTILIZAÇÃO EM LABORATÓRIO DIDÁTICO.** 2008. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008.

BARLOW, B.J.; RAE W.H.; POPE, A. **Low Speed Wind Tunnel Testing.** 3ª ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

BELL, J. H; MEHTA, R. D. **Contraction Design for Small Low-Speed Wind Tunnels.** Stanford: 1988.

BRADSHAW, P., PAUKHURT, R.C. **The design of low-speed wind tunnels.** Prog. Aeronautical Sci. 1964.

CAMPOS, Filipe; DENADAI, Marcelo; FEIDEN, Adriana. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TUNEL DE VENTO, SIMULAÇÃO DE DESCOLAMENTO DA CAMADA LIMITE.** 2005. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

ÇENGEL, Yunus A., CIMBALA, John M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e aplicações.** Ed. MCGRAW-HILL BRASIL, 2007.

CONTROLLED Sand Dispersion Wind Tunnel. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/temple.edu/enter-sandman/design-process>>. Acesso em: 30 jul. 2018.

COUTINHO, Felipe Rodrigues. **Projeto de um túnel aberto subsônico.** 2014. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)-UFRJ/ Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2014.

CURRIE, I. G. **Fundamental Mechanics of Fluids.** 3ª ed. New York: Marcel Dekker. 2003.

DIRECT INDUSTRY. **Ventilador de circulação de ar.** Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/prod/novovent/product-19905-1547003.html>>. Acesso em: 8 de Ago. de 2018.

D'SOUZA, Alister Gleason; CONCESSAO, Joel; QUADROS, Jaimon. Study of Aerofoil Design Parameters for Low Speed Wind Tunnel. **Journal Of Mechanical Engineering And Automation**. India, p. 47-54. out. 2015.

ENTREPORTES, Lucas S. S. **Automação Túnel de Vento**. 2016. 108p. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº 18/2016, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

FOX, R.W.; MCDDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6ª ed. LTC, 2006.

FERREIRA, S, Tatiane. **Análise Comparativa de Linhas de Corrente de Perfil NACA0012 em Túnel de Vento**. 2017. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Exatas e Tecnológicas) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2017.

GOMES, M. H. R. **APOSTILA DE MECÂNICA DOS FLUIDOS**. 2012. 80f. Notas de aula. Juiz de Fora: UFJF, 2012.

HALL, Nancy. **Types of wind tunnels**. NASA. 2015. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuntype.html>>. Acesso em: 30 Jul. 2018.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

Lei dos fluidos ideais. Grupo de Ensino de Física da Universidade Federal de Santa Maria (GEF-UFSM). Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/gef/l-fluidos.html>>. Acesso em: 3 de Ago. de 2018.

LINDGREN, Bjorn; JOHANSSON, Arne. **Design and Evaluation of a Low-Speed Wind-Tunnel with Expanding Corner**. Sweden: Universitetservice Us Ab, 2002. 47 p. (100 44).

MEHTA, R. D.; BRADSHAW, P. **Tecnical Notes: Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels**. The Aeronautical Journal of The Royal Aeronautical Society, November 1979.

MIKHAIL, M. N. **Optimum Design of Wind Tunnel Contractions**. AIAA Paper 78-819, presented at the AIAA Tenth Aerodynamic Testing Conference, May, 1979.

MOREIRA JUNIOR, Orlando; ANTUNIASSI, Ulisses Rocha. **CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO PARA ENSAIOS DE ESTIMATIVA DA DERIVA EM PULVERIZAÇÕES AGRÍCOLAS**. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 3, p.118-136, 2010.

MOREL, T. **Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions**. Journal of Fluids Eng., ASME, 97, p. 225-233, Junho de 1975.

MUNSON, Bruce R. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**. 4ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004,

QUINTELA, António C. **Hidráulica**. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1981.

UHER, Bill. **NASA's 16-Foot Transonic Tunnel Leaves Powerful Legacy**. 2004. NASA. Disponível em: < <https://www.nasa.gov/vision/earth/improvingflight/16ft.html>>. Acesso em: 2 de Jul. de 2018.

WHITE, Frank M. **Mecânica dos Fluidos**. 6ª ed. Editora McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda, 2011.

ZANOUN, E.-S. **Flow characteristics in low-speed wind tunnel contractions: Simulation and testing**. Alexandria Engineering Journal, 2017.