

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO – DEMECP

DIÓGENES LEITE SOUZA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MINI TUNEL DE VENTO DIDÁTICO DE
BANCADA EXPERIMENTAL PARA ESTUDOS AERODINÂMICOS**

São Luís
2016

DIÓGENES LEITE SOUZA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MINI TUNEL DE VENTO DIDÁTICO DE
BANCADA EXPERIMENTAL PARA ESTUDOS AERODINÂMICOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Lima

São Luís

2016

Souza, Diógenes Leite

Projeto e construção de um mini túnel de vento didático de bancada experimental para estudos aerodinâmicos/ Diógenes Leite Souza. – São Luís, 2016.

69 f.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, 2016.

1. Túnel de vento 2.Mecânica dos Fluidos 3.Escoamentos I. Título
CDU 624.042.8

DIÓGENES LEITE SOUZA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MINI TUNEL DE VENTO DIDÁTICO DE
BANCADA EXPERIMENTAL PARA ESTUDOS AERODINÂMICOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fernando Lima de Oliveira (Orientador)
Doutor em Engenharia Aeronáutica e Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Lourival Matos de Sousa Filho (Examinador)
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho (Examinador)
Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por tudo, mas em especial por ter chegado até aqui. Gostaria de agradecer a Ele também por ter me dado pais maravilhosos que souberem me educar e me dá todo amor que eu precisava.

Ao meu pai que, hoje se encontra ainda vivo em meu coração e nas minhas lembranças, me ensinou que a maior herança que ele podia deixar para mim era a educação e sua maior alegria seria me ver chegando neste momento.

A minha mãe que como sempre se mostrou zelosa, atenciosa e carinhosa comigo, me o alicerce que precisava durante toda a minha vida.

A família maravilhosa que eu tenho que a qualquer instante posso recorrer a qualquer um e sempre estarão ali para me ajudar.

A Mariana, minha namorada que percorreu comigo todos esses anos acadêmicos, me dando apoio, auxílio, colocando a mão na massa, me escutando e me dando amor.

Aos meus amigos irmãos que se fazem presente desde a minha infância, me proporcionando momentos de alegria, conversas, distração.

A minha turma de universidade, que sempre se mostrou unida e capaz de tornar as aulas, os momentos na universidade mais divertidos.

A todos da equipe Zeus, os quais me ajudaram crescer como pessoa e tornaram dias de trabalho árduo em passatempos que deixarão mais que saudade.

Agradeço ao professor orientador, o qual deu o apoio necessário para a realização deste projeto.

Aos meus companheiros profissionais, que estão sempre ajudando na minha formação. Fica aqui o meu eterno obrigado a todos que contribuíram de alguma forma para tudo isso. Muito obrigado!

“Quem espera e confia em Deus sempre alcança, não importa o tempo que demore, o importante é ter fé, sabedoria, amor e alegria, pois para tudo tem seu tempo. Por isso, em tudo dai graças.”

Autor desconhecido.

RESUMO

Túneis de vento são dispositivos de suma importância para simulação de escoamentos em estudos aerodinâmicos, facilitando análises e proporcionando suporte prático para melhor compreensão de disciplinas como a mecânica dos fluidos. Dessa forma, este trabalho visa o projeto e construção de um túnel de vento de pequeno porte que servirá para fins didáticos de diversas áreas como mecânica, aeronáutica, entre outras. Para isso definiu-se o desenvolvimento de um dispositivo de circuito aberto e do tipo sugador, realizando análises bibliográficas e cálculos para avaliar as melhores geometrias dos componentes e métodos para controle da camada limite e maior uniformidade do escoamento. Após as etapas de dimensionamento e modelagem foi iniciado o processo de construção de um protótipo com materiais de baixo custo para verificação dos parâmetros abordados no projeto. Posteriormente foi construído o mini túnel de vento final baseado nas análises de possíveis melhorias do protótipo, realizando cálculos de perda de carga para verificação do acionamento e análise de escoamentos em corpos de prova, de forma a confrontar com resultados simulados. Por fim, apresentou-se as plantas para confecção do túnel para servir como base para os alunos de graduação e também como uma ferramenta didática.

Palavras-chave: Túnel de vento. Mecânica dos Fluidos. Escoamentos.

ABSTRACT

Wind tunnels are extremely important devices for simulation of flows for aerodynamic studies, facilitating analysis and providing practical support for a better understanding of disciplines such as fluid mechanics. In this way, this work aims at the design and construction of a small wind tunnel that will serve for didactic purposes of several areas such as mechanics, aeronautics, among others. For this, the development of an open-circuit and sucker-type device was defined, performing bibliographical analyzes and calculations to evaluate the best geometries of the components and methods to control the boundary layer and greater uniformity of the flow. After the sizing and modeling steps the process of constructing a prototype with low cost materials was started to verify the parameters approached in the project. Subsequently, the final wind tunnel was built based on the analysis of possible improvements of the prototype, performing load loss calculations to verify the drive and analysis of flows in test bodies, in order to confront with simulated results. Finally, the tunnel preparation plants were presented to serve as a base for undergraduate students and also as a didactic tool.

Keywords: Wind tunnel. Mechanics of Fluids. Flows

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - escoamento laminar à direita e escoamento turbulento à esquerda.	18
Figura 2 - Semelhança entre um modelo real e um protótipo.	21
Figura 3 - Camada limite sobre uma placa plana.	21
Figura 4 – Modelo Alteado.	22
Figura 5 – Modelo Alargado.	22
Figura 6 – Modelo profundo.	23
Figura 7 - Túnel de vento de circuito fechado e seus componentes.	24
Figura 8 - Túnel de Vento do tipo soprador.	25
Figura 9 - Túnel de vento aberto do tipo sugador.	25
Figura 10 - Tipos de colmeia.	26
Figura 11 - Bocal de contração.	27
Figura 12 - Difusor de paredes planas.	28
Figura 13 - Limites de projeto para difusores com telas.	29
Figura 14 - Ventilador centrífugo à esquerda e ventilador axial à esquerda.	30
Figura 15 – Fluxograma de metodologia de trabalho.	37
Figura 16 - Desenho de um túnel de vento sugador de circuito aberto.	38
Figura 17 – Vistas da modelagem da seção de testes.	39
Figura 18 - Modelagem do bocal de contração.	40
Figura 19 - Modelagem colmeia, tela e seção da câmara.	41
Figura 20 - Modelagem do difusor.	42
Figura 21 - Exaustor escolhido.	42
Figura 22 - Modelagem do túnel de vento.	43
Figura 23 - Corte dos componentes no papelão.	43
Figura 24 - Velocidade do escoamento (a) no bocal, (b) na seção de testes e (c)..... no final do difusor.	44
Figura 25 - Confecção colmeia de canudos.	45
Figura 26 – Máquina de fumaça adaptada.	46
Figura 27 – <i>Dimmer</i> utilizado para controlar a velocidade do vento.	46
Figura 28 - Velocidade e linhas de escoamento.	48
Figura 29 – Análise da pressão no túnel de vento.	48
Figura 30 – Análise de vorticidade.	49
Figura 31 – Protótipo inicial construído.	49

Figura 32 – Vedação na parte final do túnel de vento.....	50
Figura 33 - Mini Túnel de Vento construído.....	51
Figura 34 - Detalhes máquina de fumaça e câmara de estabilização.	51
Figura 35 - Aferição da velocidade na seção de testes.	52
Figura 36 - Comparação da análise computacional e experimental do escoamento ... no bloco.....	52
Figura 37 - Comparação da análise computacional e experimental do escoamento ... na esfera.	52
Figura 38 – Comparação da análise computacional e experimental do conjunto.....	53
Figura 39 – Visualização de escoamento em um carro de brinquedo.....	53
Figura 40 - Visualização de escoamento em um carro de brinquedo com objeto em cima.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Re	Número de Reynolds	-
ρ	Densidade	kg/m ³
v	Velocidade	m/s
D	Diâmetro	m
μ	Viscosidade	Pa.s
ν	Viscosidade Cinemática	m ² /s
Q	Vazão	m ³ /s
A	Área	m ²
\dot{m}	Vazão Mássica	kg/m ³
p_{est}	Pressão Estática	Pa
g	Gravidade	m/s ²
z	Altura	m
w	Largura da Célula	m
β_s	Porosidade da Tela	%
d_f	Diâmetro do fio	m
ρ_t	Densidade do Entrelaçado do Arame	
σ_s	Solidez do Arame	%
Y	Matriz de Coordenadas Eixo Y Bocal	-
He	Altura da Entrada do Bocal	m
Hs	Altura da Saída do Bocal	m
Δp_{total}	Queda de Pressão Total	Pa
k	Coeficiente de Perda	-
f	Coeficiente de atrito de Prandtl	-
L	Comprimento	m
D_H	Diâmetro Hidráulico	m
e	Rugosidade Superficial do Material	m
e/D	Rugosidade Relativa	-
K_{st}	Coeficiente de Perda de Carga na Seção de Testes	-
K_{bc}	Coeficiente de Perda de Carga no Bocal	-
f_{es}	Coeficiente de atrito de Prandtl médio entre entrada e saída	-
L_{bc}	Comprimento do Bocal	m
D_{Hsb}	Diâmetro Hidráulicos Saída do Bocal	m
K_t	Coeficiente de Perda de Carga na Tela	-
K_{malha}	Coeficiente de Perda de Carga na Malha	-
K_{RN}	Coeficiente de Rugosidade das Telas	-
Re_{tela}	Número de Reynolds nas Telas	-
K_C	Coeficiente de Perda de Carga na Colmeia	-
λ	Parâmetro Material da Colmeia	-
L_c	Comprimento Colmeia	m
β_c	Porosidade da Colmeia	%
Δ	Rugosidade da Colmeia	m
Re_{Δ}	Número de Reynolds baseado na Rugosidade da Colmeia	-
K_{ap}	Coeficiente de Perda de Carga devido atrito das paredes	-
A_R	Razão entre áreas	-
θ	Ângulo do difusor	Graus

K_{ex}	Coeficiente de Perda de Carga devido atrito a expansão	-
K_e	Coeficiente de Perda de Carga baseado no ângulo	-
Pot_{mtv}	Potência do Túnel de Vento	Watts
γ	Peso Específico	N/m ³
H	Perda de Carga	m
Pot_{vent}	Potência do Ventilador	Watts
FS	Fator de Segurança	-
μ_{vent}	Rendimento do Ventilador	%
μ_{motor}	Rendimento do Motor	%

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Mecânica dos Fluidos	16
2.1.1	Viscosidade	17
2.1.2	Escoamento Laminar ou Turbulento	17
2.1.3	Linhas de Corrente, Linhas de Emissão e Trajetória	18
2.1.4	Conservação da Massa	19
2.1.5	Equação de Bernoulli	20
2.1.6	Similaridade	20
2.1.7	Camada Limite	21
2.2	Túneis de vento	23
2.2.1	Tipos de Túnel de Vento	23
2.2.2	Túnel de Vento de Circuito Fechado	23
2.2.3	Túnel de Vento de Circuito Aberto	24
2.2.4	Tipo Soprador	24
2.2.5	Tipo Sucção	25
2.3	Componentes de um Túnel de Vento	25
2.3.1	Câmara de Estabilização	25
2.3.2	Contração	27
2.3.3	Seção de Testes	28
2.3.4	Difusor	28
2.3.5	Ventilador	29
2.4	Perda de Carga	30
2.4.1	Seção de Testes	32
2.4.2	Bocal	32
2.4.3	Câmara de Estabilização	33
2.4.4	Difusor	34
2.4.5	Potência do Ventilador	35
2.5	Visualização do Escoamento	35

2.6	Simulação do Escoamento	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Definições dos Parâmetros	38
3.2	Dimensionamento e Modelagem	38
3.3	Construção do Protótipo	43
3.3.1	Coleta de Dados	44
3.4	Construção do Protótipo Final	44
3.4.1	Cálculo das Perdas de Carga e Potência do Ventilador	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	Análise Computacional	48
4.2	Análise de Velocidades e Construção dos Protótipos	49
4.3	Análises de Escoamentos	52
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
	REFERÊNCIAS	55
	APÊNDICES	57

1 INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento dos fluidos sempre foi algo que despertou muito interesse e de grande importância ao longo da história da humanidade. Nos tempos antigos, já eram utilizadas noções de aerodinâmica na confecção de flechas e em embarcações movidas à vela, sempre tendo como objetivo a diminuição da força contrária ao movimento denominada arrasto. Porém, a análise de comportamentos dos fluidos sobre diversos tipos e modelos de corpos, devido às suas características, possui certa complexidade e dificuldade de visualização. Isso levou à busca de meios que proporcionassem um melhor entendimento, na prática, sobre tais princípios.

Na tentativa de melhorar os estudos destes fenômenos foi que surgiram os túneis de vento. A fabricação do primeiro no mundo ocorreu em 1871 por Frank H. Wenham e John Browning no *Royal Aeronautical Society of Great Britain* (Sociedade Aeronáutica Real da Grã-Bretanha), de forma a validar seus estudos sobre planadores. Porém, mesmo com o advento das simulações computacionais e avanços tecnológicos, o movimento dos fluidos é baseado nas equações de Navier-Stokes, que possuem uma alta complexidade se trabalhadas em sua forma completa. Assim, para corpos com geometrias mais difíceis, uma análise minuciosa de escoamento por simulação necessita de diversas aproximações (ISMAIL e LINO, 2010).

Um túnel de vento, de maneira geral, é um dispositivo que possui como finalidade produzir correntes de maneira uniforme e que possam ser controladas. Tem o objetivo de determinar condições de escoamento e capaz de aferir distribuições de forças, temperaturas, acompanhamento de partículas e elementos que possam ser importantes dentro do experimento estudado (GORECKI, 1988).

Dessa forma, ensaios em túneis de vento constituem uma ferramenta confiável para a determinação dos efeitos de cargas de vento sobre diversas estruturas, modelos e protótipos que necessitam ser avaliadas. Mesmo com os computadores hoje em dia, este dispositivo ainda é uma ferramenta essencial da engenharia para modelagem de testes, pesquisa experimental e validação dos resultados computacionais (BELL e MEHTA, 1988). Sua aplicação está inteiramente relacionada à estudos que necessitam de resultados com grande exatidão e maior confiabilidade. Ou, quando o que se sabe sobre o que está sendo analisado, está fora das condições previstas em norma técnicas.

Contudo, a instalação deste equipamento costuma ser onerosa, não permitindo que todos os cursos de engenharia mecânica, civil e/ou arquitetura a possuam. No mais, no Brasil existem poucos laboratórios de universidades que os possuem, gerando uma enorme carência nesta área de pesquisa.

Com o intuito de mostrar como o vento atua na simulação de um ambiente tipo túnel de vento, propõe-se aqui o desenvolvimento de um projeto de um Mini Túnel de Vento (MTV) de baixo custo, pequeno porte e fácil construção, com o objetivo de expor qualitativamente o comportamento do vento sobre as formas geométricas. O presente trabalho pretende indicar que esta ferramenta laboratorial seja suficiente no ensino de pequenos modelos de automóveis, corpos esféricos, maquetes de construção residenciais e outras que são muito exigidas pela ação dinâmica do vento. Durante o projeto será feita análises e escolhas dos tipos e melhores parâmetros para a construção de um túnel de vento a ser utilizado em análises de escoamento e ferramenta prática de ensino na graduação.

Do ponto de vista econômico, atualmente, preza-se muito pela melhor qualidade, menores custos e maior segurança de um produto. Portanto, deve-se economizar nos meios que possam ajudar a proporcionar tal feito. É de fundamental importância testar o objeto a ser fabricado, a fim de verificar o seu comportamento em situações reais ou próximas da realidade, analisando também as suas limitações além de comparar dados teóricos com dados empíricos.

Como dito anteriormente, no Brasil, os túneis de vento são equipamentos raros de serem encontrados em instituições para auxiliar o ensino e a pesquisa. Essa escassez se agrava ainda mais quando se restringe ao estado do Maranhão, talvez por ser uma ferramenta de elevado custo e de complexidade construtiva, sendo um item de carência em diversos cursos que possuem em sua grade a disciplina de mecânica dos fluidos.

Sendo assim, esta pesquisa pretende construir, com pequenos custos e de forma científica, um pequeno túnel de vento para a Universidade Estadual do Maranhão, criando um instrumento capaz de atender a necessidade da existência de um equipamento deste no curso de Engenharia.

Destarte, a elaboração deste projeto de pesquisa também partiu da necessidade de se obter um instrumento capaz de auxiliar no ensino e testes laboratoriais, ainda que de pequenos modelos e protótipos, nos cursos de Engenharia e de Arquitetura. Este equipamento compreende uma ótima ferramenta para o

desenvolvimento de aulas práticas, experimentos, simulações e análises em mecânica dos fluidos. Pode colaborar também para simulações e testes de outros projetos dentro da própria universidade, com proposta de auxiliar os projetos especiais como o Aerodesign, Eficiência Energética, Baja e outros que necessitam desta ferramenta para avaliar qualitativamente seus protótipos de forma a definir melhorias em suas geometrias e enriquecer seus relatórios técnicos com dados experimentais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Construir um mini túnel de vento para ensaios experimentais que permitam estudar os conceitos fundamentais da mecânica dos fluidos, principalmente sobre o fenômeno de aerodinâmica e sua aplicação em objetos do tipo protótipo ou maquetes.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar um estudo para aquisição de conhecimento específico para o desenvolvimento e projeto de um túnel de vento enfatizando os detalhes e as tecnologias envolvidas para a sua construção e uso;
- ✓ Projetar um mini túnel de vento para fins de ensino e pesquisas sobre efeitos aerodinâmicos a partir do escoamento do ar;
- ✓ Construir o dispositivo com qualidade e capacidade de atender os corpos de provas testados;
- ✓ Realizar ensaios experimentais: a visualização do escoamento em contato com o corpo de prova e a diferença da ação aerodinâmica em modelos/protótipos diversos;
- ✓ Disponibilizar um mini túnel de vento de bancada experimental que sirva de estudo de modelos e/ou protótipo de grupos de estudos nas engenharias.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os túneis de vento são instrumentos de grande importância no desenvolvimento de estudos aerodinâmicos em objetos sólidos. Eles possibilitam a visualização da descrição do movimento do fluido, de forma a realizar análises tanto de caráter quantitativo como qualitativo, havendo a possibilidade da coleta de dados experimentais dos ensaios propostos para avaliação.

Segundo Mehta e Bradshaw (1979), as características desse equipamento dependerão da finalidade para qual o túnel será solicitado. Estes equipamentos são instrumentos de fundamental importância para reprodução de modelos físicos, de forma a determinar parâmetros de projeto nas áreas aeroespacial, automobilística, construção civil, além de treinamentos para esportes radicais, como salto com paraquedas. Em São Paulo, por exemplo, no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), há o maior do tipo subsônico da América Latina, que possibilita simular catástrofes em furacões, e averiguar como uma construção reage no quesito da aerodinâmica.

Como dito anteriormente, o túnel de vento possui grande importância na formação acadêmica como ferramenta de estudos práticos na área de mecânica dos fluidos. Porém, no Brasil, equipamentos como esse de médio e pequeno porte são dificilmente encontrados nas instituições de ensino. Algumas das poucas que a possuem são a UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), USP (Universidade de São Paulo), ITA (Instituto Tecnológico da Aeronáutica) e a UNIVAP (Universidade do Vale do Paraíba).

2.1 Mecânica dos Fluidos

Os fluidos têm a capacidade de escoar quando interagem com algum corpo, diferentemente dos sólidos, que possuem uma forma própria. Assim, uma definição aceitável do que é um fluido é que se trata de uma substância que sofre deformação continuamente de uma tensão de cisalhamento aplicada. Um sólido também se deforma sob tensão de cisalhamento, porém não aumenta ininterruptamente com o tempo (FOX, MCDONALD e PRITCHARD, 2006). Para o estudo do comportamento dos fluidos é necessário a introdução de alguns conceitos.

2.1.1 Viscosidade

A massa específica (ρ) e o peso específico (γ) são propriedades muito importantes para a identificação e estudo de um fluido. Porém, apenas essas duas grandezas não são suficientes para identificar o seu comportamento, uma vez que há a possibilidade de fluidos apresentarem, por exemplo, massa aproximadamente iguais mas possuírem comportamentos diferentes quando estão escoando, como é o caso da água e o óleo. Ou seja, uma grandeza ainda é necessária para caracterizar a “fluidez” das substâncias. Esta propriedade é chamada de viscosidade (MUNSON, YOUNG e OKIISHI, 2004).

A viscosidade, de forma simplificada, é originada por uma coesão entre moléculas e o contato entre elas, não sendo uma propriedade observável em um fluido em repouso, já que qualquer força tangencial ocasiona sua deformação. Dessa forma, a viscosidade é uma propriedade indicadora do grau de dificuldade em uma substância escoar (BRUNETTI, 2008).

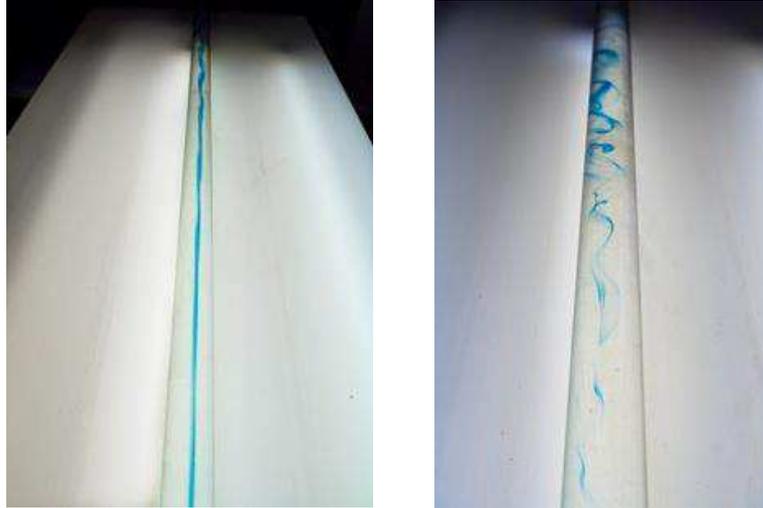
A viscosidade dinâmica trata-se da propriedade que permite equilibrar, dinamicamente, forças tangenciais quando o fluido não está em repouso. Pelo lado matemático, nada mais é que uma constante de proporcionalidade (μ) da Lei de Newton para viscosidade, sendo diferente para cada tipo de substância. Introduce-se também o conceito de viscosidade cinemática, a qual aparece muitas vezes em deduções e simplificações de fórmulas, sendo o quociente entre a viscosidade dinâmica (também chamada de absoluta) e a massa específica. Para o ar, a viscosidade é encontrada no valor de $17,9 \times 10^{-6} \text{Pa}\cdot\text{s}$ (BRUNETTI, 2008).

2.1.2 Escoamento Laminar ou Turbulento

Para conceituar escoamentos laminares e turbulentos, deve-se primeiramente analisar o resultado da experiência realizada pelo irlandês Osborne Reynolds, que introduziu um número adimensional batizado com o seu nome. A reprodução do experimento para visualização dos regimes de escoamento realizado por este físico e engenheiro hidráulico consiste na utilização de um tubo transparente, onde há água escoando, partindo de um reservatório que está em repouso. Colocando-se um filete de tinta na água corrente para visualização do experimento e o mesmo percorre de forma retilínea ao longo do tubo sem mistura efetiva com a água.

Esse tipo de escoamento é chamado de laminar. Caso haja uma mistura rápida, de forma que o filete desapareça, este escoamento se tornou turbulento (LABTERMO).

Figura 1 - Escoamento laminar à esquerda e escoamento turbulento à direita.



Fonte: LABTERMO, 2016

Em outras palavras, é denominado escoamento laminar quando as partículas se movimentam em lâminas individualizadas, sem troca de massas entre as mesmas. Já o turbulento é quando as partículas possuem movimentos macroscópicos desordenados e aleatórios, ou seja, o movimento do fluido se encontra transversalmente aos componentes da velocidade (BRUNETTI, 2008).

Este comportamento dos fluidos pode ser representado pela equação (1), e seu valor também pode indicar se o mesmo está em regime laminar ($Re < 2000$) ou turbulento ($Re > 4000$), ou mesmo se está em um estado de transição ($2000 < Re < 4000$). No caso do túnel de vento, é necessário realizar o cálculo nas suas seções para análises de perdas de carga, como será relatado posteriormente.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (1)$$

2.1.3 Linhas de Corrente, Linhas de Emissão e Trajetória

A visualização dos escoamentos, às vezes, pode possuir uma certa complexidade, mas há alguns conceitos que podem ser introduzidos para facilitar a

análise. Entre esses conceitos estão as linhas de corrente, linhas de emissão e trajetória.

Utilizada mais em trabalho analíticos, o conceito de linha de corrente é aquela desenhada no campo de escoamento a qual é tangente aos vetores de velocidade das partículas. A visualização da linha de corrente pode ser feita lançando serragem no meio e tirando uma fotografia. O conceito de trajetória, assim como linha de emissão, é mais utilizado em trabalhos experimentais e abrange o caminho traçado por uma partícula em movimento do fluido, enquanto a linha de emissão consiste em todas as partículas do escoamento as quais passaram por um único ponto (MUNSON, YOUNG e OKIISHI, 2004; FOX, MCDONALD e PRITCHARD, 2006 BRUNETTI, 2008). Estes parâmetros de análise podem ser visualizados com a utilização de fumaça, por exemplo, ou pigmentos.

2.1.4 Conservação da Massa

A grandeza que proporciona medir o quanto de volume de um fluido passa por alguma seção de um conduto em um espaço de tempo é a vazão volumétrica (Q), que pode ser indicada pela equação abaixo (VICENSI, 2014):

$$Q = VA \quad (2)$$

Um escoamento de regime permanente não possui mudanças de propriedades ao passar do tempo em nenhum ponto, além de não haver fluxo lateral de massa em seu conduto. Dessa forma, segundo a equação da continuidade o fluxo de massa (\dot{m}) é o mesmo na entrada e na saída de um conduto.

$$\dot{m} = VA\rho \quad (3)$$

$$\sum_i (\dot{m}_i)_{ent} = \sum_i (\dot{m}_i)_{sai} \quad (4)$$

2.1.5 Equação de Bernoulli

O teorema proposto por Daniel Bernoulli, em 1738, apresenta o comportamento de um fluido que se move em uma linha de corrente e aplica o princípio da conservação da energia para os fluidos sob as hipóteses de ser incompressível e em um regime permanente.

A equação que representa este teorema, batizada de Equação de Bernoulli, assume então que a pressão total é constante (WHITE, 2002):

$$p_{\text{est}} + \rho \frac{V^2}{2} + \rho g z = \text{constante} \quad (5)$$

Para um túnel de vento, podemos reescrever esta equação para altura $z=0$, ficando apenas com os dois primeiros termos:

$$p_{\text{est}} + \rho \frac{V^2}{2} = \text{constante} \quad (6)$$

O segundo termo da equação é a chamada pressão dinâmica, que é a pressão ligada a velocidade do escoamento, representando o aumento de pressão quando o fluido está em processo de parada.

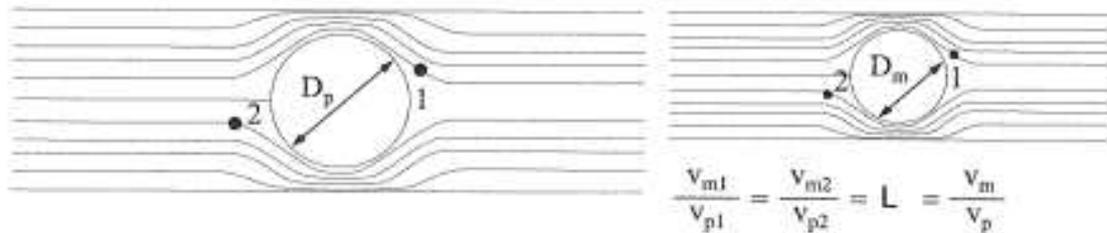
2.1.6 Similaridade

O estudo de um objeto na mecânica dos fluidos, dependendo de suas características, pode possuir certa complexidade, já que um grande número de variáveis é envolvido e normalmente não é possível determinar todos os resultados numéricos de forma analítica. Portanto, com a intenção de tornar as análises e pesquisas referentes a um fenômeno de um modelo em tamanho real, é possível confeccionar um modelo em escala, simulando as condições originais.

Porém, é necessário que algumas condições sejam cumpridas para que os resultados do protótipo e o real sejam equivalentes como a semelhança geométrica, semelhança cinemática e semelhança dinâmica. Ou seja, o objeto em estudo simulado deve possuir dimensões diferentes, mas com mesmo formato e de forma

proporcional, além de haver uma relação constante das velocidades das partículas dos fluidos, assim como das forças atuando em pontos iguais. Porém, nem sempre essas condições são perfeitamente atingidas, sendo necessário a experiência do pesquisador ao interpretar os resultados (BRUNETTI, 2008).

Figura 2 - Semelhança entre um modelo real e um protótipo.



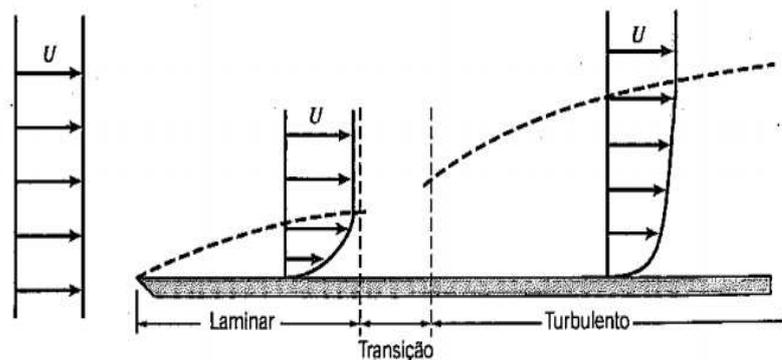
Fonte: BRUNETTI, 2008

2.1.7 Camada Limite

Introduzido inicialmente em 1904 por Ludwig Prandtl, o conceito de camada limite surgiu como a ligação que faltava entre teorias matemáticas e dados experimentais, introduzindo a possibilidade teórica do arrasto, e permitindo a solução de problemas viscosos, até então impossíveis. Dessa forma, este conceito deu início a era moderna da mecânica dos fluidos (FOX, MCDONALD e PRITCHARD, 2006).

A camada limite é uma região adjacente a uma superfície sólida, como um objeto em estudo, por exemplo, onde as tensões viscosas estão presentes devido ao cisalhamento das camadas do fluido, ou seja, gradientes de temperaturas.

Figura 3 - Camada limite sobre uma placa plana.

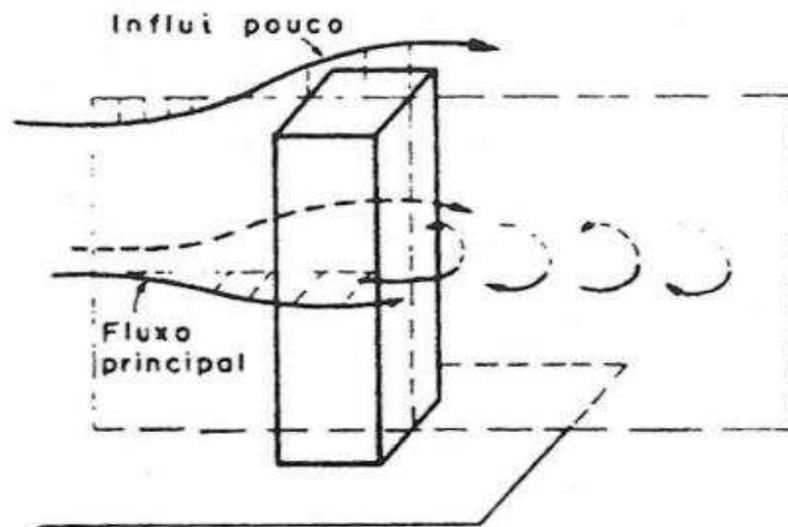


Fonte: Fox, McDonald e Pritchard, 2006

2.1.8 Escoamentos Externos

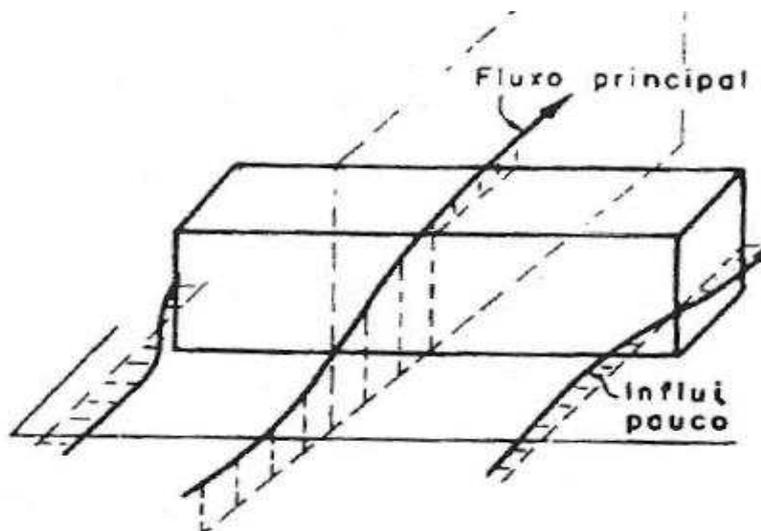
Os escoamentos sobre os corpos podem possuir diversos comportamentos, os quais podem ser vistos, dependendo do tipo de visualização. Segundo (BLESSMANN, 2011), estes podem ser classificados de acordo com suas proporções e forma, caracterizando os modelos em alteados, alargados e profundos.

Figura 4 – Modelo Alteado.



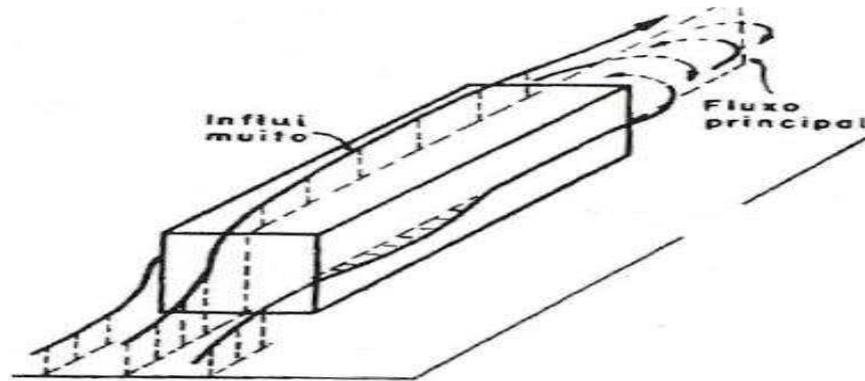
Fonte: Blesmman, 2011

Figura 5 – Modelo Alargado.



Fonte: Blesmman, 2011

Figura 6 – Modelo profundo.



Fonte: Blesmman, 2011

Dessa forma, pode-se prever alguns comportamentos e geração de vórtices em corpos de prova que não possuem certa complexidade. Porém, há modelos que possuem características mais complicadas e podem não haver bases bibliográficas para prever precisamente o comportamento do fluxo. Dessa forma, pode-se utilizar o CFD para simular esses corpos, validar os resultados e realizar ensaios em túneis de vento.

2.2 Túneis de vento

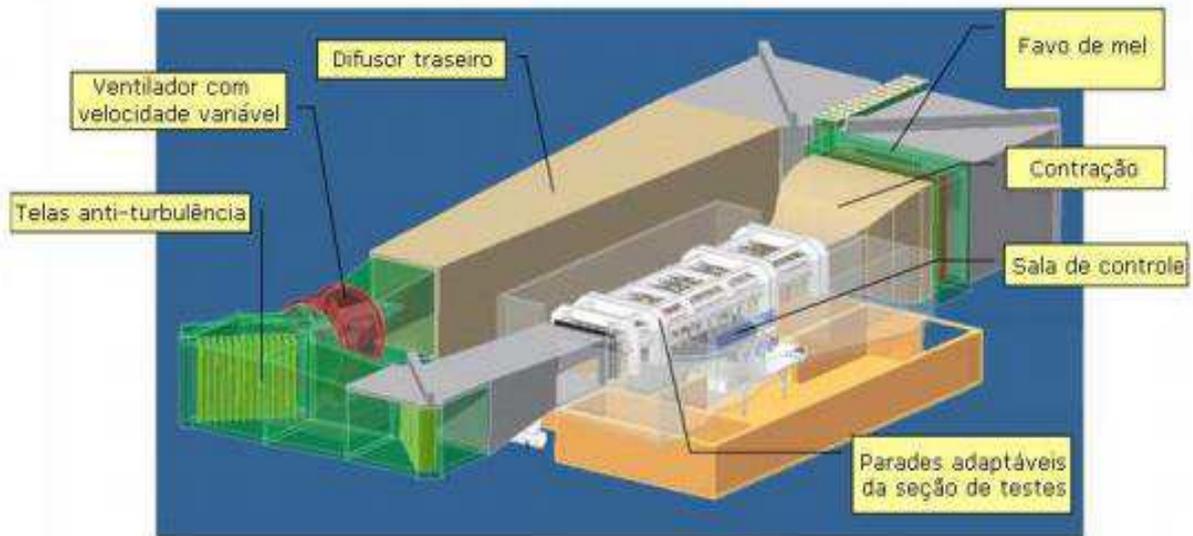
2.2.1 Tipos de Túnel de Vento

Existem basicamente dois tipos de túneis de vento, considerando sua geometria, circuito aberto e circuito fechado. Mesmo assim são inúmeras as variações de layout dos mesmos.

2.2.2 Túnel de Vento de Circuito Fechado

Túnel de vento de circuito ou retorno fechado, como a própria nomenclatura sugere, é aquele em que o fluido circula pelo equipamento sendo reutilizado de forma a recircular, proporcionando economia de energia elétrica e obtenção de um fluxo de ar mais estável e contínuo. Porém um equipamento dessa configuração necessita de uma construção e estudos um pouco mais complexos devido às curvas para guiar o escoamento.

Figura 7 - Túnel de vento de circuito fechado e seus componentes.



Fonte: Soethe, Souza e Deyna, 2011

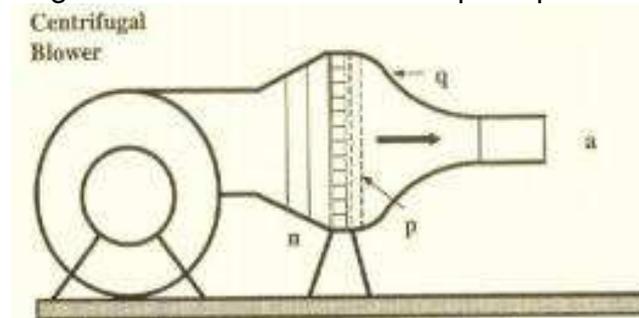
2.2.3 Túnel de Vento de Circuito Aberto

Essa configuração possui um design mais simples que o circuito de fechado, já que possui menos componentes e devolve para o ambiente o ar que retirou através dos ventiladores. Conseqüentemente, essa configuração apresenta custos menores em relação aos túneis de circuito aberto. A configuração mostrada no item anterior trabalha ainda com túneis de vento do tipo soprador, enquanto esta trabalha em regime do soprador e de sucção.

2.2.4 Tipo Soprador

São utilizados ventiladores centrífugos nestes túneis de vento, os quais tendem a ter um melhor desempenho sob uma maior carga se comparados aos ventiladores axiais (VICENSI, 2014), soprando o ar diretamente no difusor. Possui tamanho menor e têm acesso mais fácil à secção de testes, uma vez que esse componente se encontra no final do túnel.

Figura 8 - Túnel de Vento do tipo soprador.

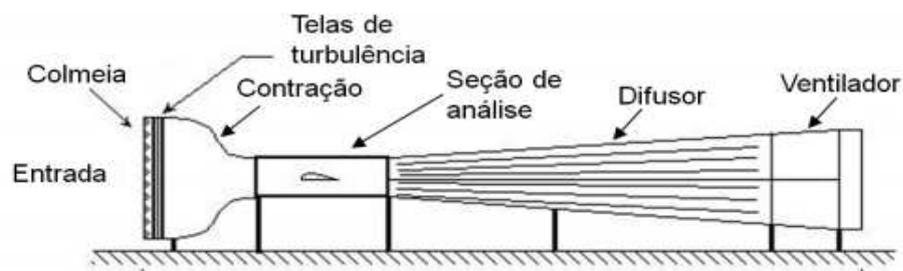


Fonte: BARLOW, RAE e HOPE, 1999

2.2.5 Tipo Sucção

Esse tipo de túnel possui os mesmos componentes do tipo soprador, porém com suas posições de forma diferente. O ar no início do túnel está sob as condições de entrada, que podem conter o ar agitado e instável de baixa frequência (VICENSI, 2014), sendo preciso a instalação de uma câmara de estabilização para corrigir essas agitações. Essa configuração possui custo de construção mais baixo e utilizam ventiladores do tipo axial como último elemento.

Figura 9 - Túnel de vento aberto do tipo sugador.



Fonte: VICENSI, 2014

2.3 Componentes de um Túnel de Vento

2.3.1 Câmara de Estabilização

A câmara de estabilização é composta pela colmeia e a tela de turbulência as quais tem o objetivo de laminar e uniformizar a velocidade do ar, melhorando a qualidade do escoamento.

As telas são tecidas formando seções quadradas ou retangulares, tendo como principais parâmetros a determinação do diâmetro do fio (d_f), a porosidade (β_s) e o coeficiente de perda de pressão, este estando diretamente ligado com número de Reynolds (FARIA, SILVA e RIBEIRO, 2014). Segundo Vincensi (2014, MEHTA e BRADSHAW, 1979) o aumento da velocidade média do fluido é maior para telas de plástico do que de metal, já que as não uniformidades produzidas pelas telas de metal no escoamento eram maiores, devido à rugosidade superfície do material.

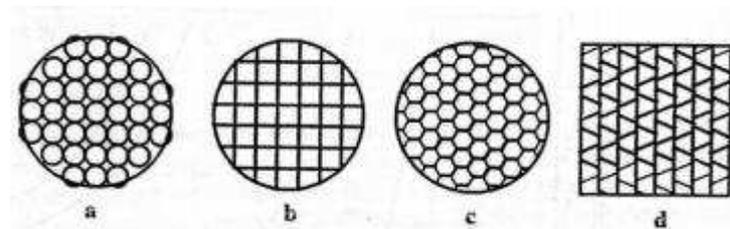
A porosidade é um termo que relaciona o diâmetro do fio e a densidade do entrelaçado (ρ_t), a qual é o inverso da largura da célula (w).

$$\beta_s = (1 - d_f \rho_t)^2 \quad (7)$$

Outra propriedade importante das telas que é utilizada posteriormente para cálculos de perda de carga é a solidez, que é o complemento da porosidade, ou seja, $\sigma_s = 1 - \beta_s$, possuindo valores normalmente variando entre 0,5 e 0,8 (COUTINHO, 2014).

Há vários tipos de colmeias, tendo que ser verificado alguns parâmetros como a razão de comprimento ao longo da direção do escoamento ao diâmetro hidráulico de uma célula individual e a porosidade ou solidez da mesma maneira para telas (ISMAIL e LINO, 2010). Assim, deve ser verificada a perda de carga de cada tipo e qual a melhor opção para o projeto. De acordo com Mehta (1977), o comprimento das células deve ser entre 7 a 10 vezes o tamanho do diâmetro.

Figura 10 - Tipos de colmeia.



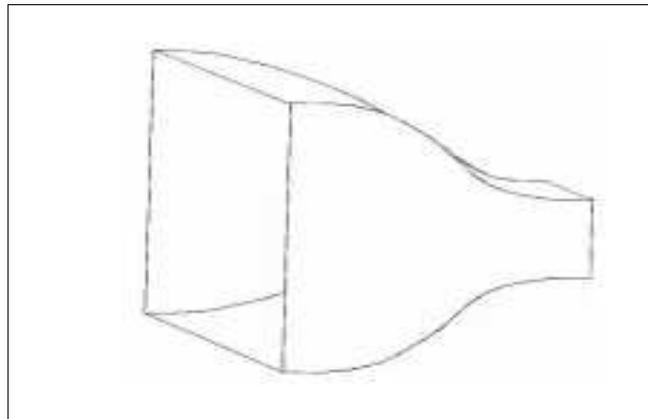
Fonte: BARLOW, RAE e HOPE, 1999

Para a dimensão da câmara de estabilização, Mehta (1977) recomenda que seja de no mínimo 20% da maior dimensão da entrada da contração para evitar possíveis distorções causadas pela tela.

2.3.2 Contração

Bocal de contração, ou simplesmente contração, é o elemento que, por se tratar de um regime subsônico, eleva a velocidade do ar. Isso se dá devido a razão de contração entre a sua seção de entrada e a de saída. Este aumento de velocidade pode chegar a 20 vezes (VINCENSI, 2014).

Figura 11 - Bocal de contração.



Fonte: SOETHE, SOUZA e DEYNA, 2011.

Com a utilização de bocais, não há a necessidade de utilizar-se um ventilador de tamanho e potência maiores, exatamente pela utilização da razão de contração. Sem o uso deste artifício ocorreria um aumento de custo na execução do projeto (SOETHE, SOUZA e DEYNA, 2011)

Segundo estudos realizados por Bell e Mehta (1988), para túneis de vento de baixa velocidade a relação entre as áreas de entrada e saída do bocal devem ser entre 6 e 10. Em seus experimentos computacionais foi fixado um valor de 7,7, que serviu de base para a otimização de seus resultados, o qual também será usado neste projeto. Foi verificado também que há uma relação entre o comprimento do bocal (L) e a metade da altura da entrada (H_e), de forma que a razão L/H_e deve possuir valores entre 0,89 e 1,79, garantindo a uniformidade do fluxo.

Para dimensionamento da melhor curvatura do bocal, utiliza-se o método proposto por Morel e otimizado por Bell e Mehta (1988), chegando à equação do quinto grau (adaptado), onde H_s é a metade da altura da saída da contração:

$$Y\left(\frac{X}{L}\right) = H_e - (H_e - H_s)\left[6\left(\frac{X}{L}\right)^5 - 15\left(\frac{X}{L}\right)^4 + 10\left(\frac{X}{L}\right)^3\right] \quad (8)$$

2.3.3 Seção de Testes

Para Ismail e Lino (2010), a primeira etapa no projeto de um túnel de vento é a determinação do tamanho e a geometria da seção de testes. Porém, para a definição dessas características, deve-se introduzir alguns conceitos importantes para a elaboração teórica do projeto.

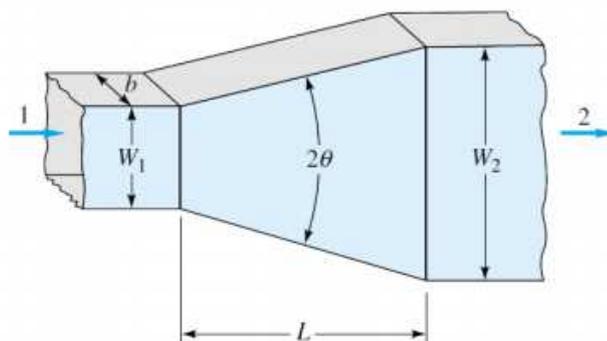
É neste componente que o objeto de estudo é colocado para análise do comportamento do fluido e de onde é iniciado o processo de dimensionamento. Possui várias geometrias, mas a mais usada é a seção quadrado. É necessário que pelo menos um dos lados seja transparente para a visualização interna, além de possuir uma abertura para possíveis modificações no posicionamento do objeto.

Geralmente o comprimento mínimo necessário para suavizar o escoamento a níveis aceitáveis deve equivaler a 50% do diâmetro da garganta do bocal, mas existem casos onde são utilizados mais do que 3 vezes deste diâmetro (MEHTA e BRADSHAW, 1979)

2.3.4 Difusor

O difusor é um aumento de área destinado a reduzir a velocidade a fim de recuperar a altura de pressão do escoamento (WHITE, 2002). Em um túnel de vento do tipo sugador é importante ter esse componente para promover a desaceleração do ar que sai da seção de testes e é retornado à atmosfera.

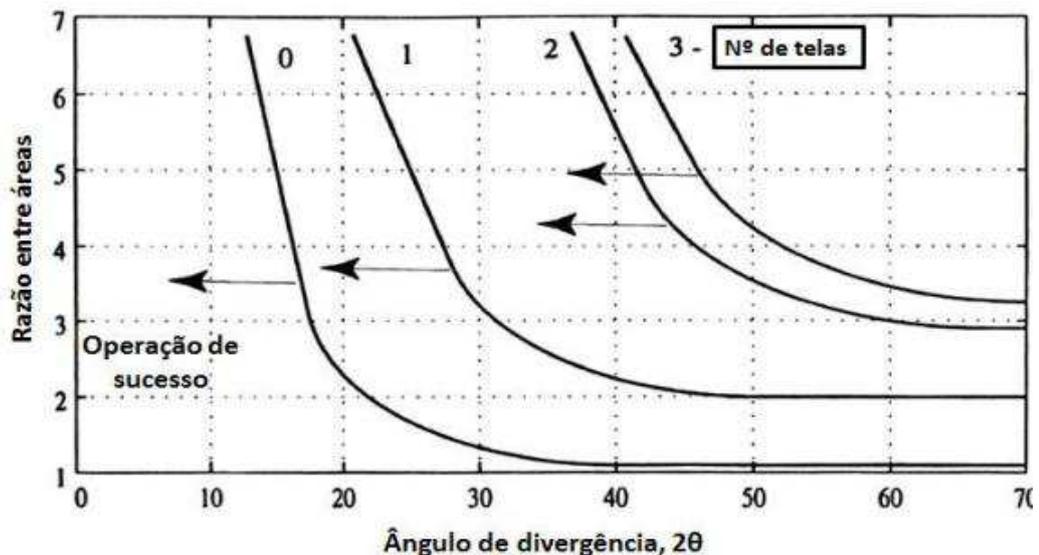
Figura 12 - Difusor de paredes planas.



Fonte: VINCENSI, 2014.

Em túneis de vento de sucção utilizam-se difusores com ângulos de abertura baixos que, de acordo com Mehta e Bradshaw (1979), usualmente não podem ultrapassar 5° , porém para que as perdas de carga sejam mínimas e melhor recuperação da queda de pressão, utiliza-se um ângulo de 10° com razão entre as áreas de entrada e saída de 2-5. É possível verificar também a partir da Figura 9 o número de telas em função do ângulo de aberturas, podendo ser verificado a necessidade do uso de telas de acordo com a operação, que neste caso não é necessário.

Figura 13 - Limites de projeto para difusores com telas.

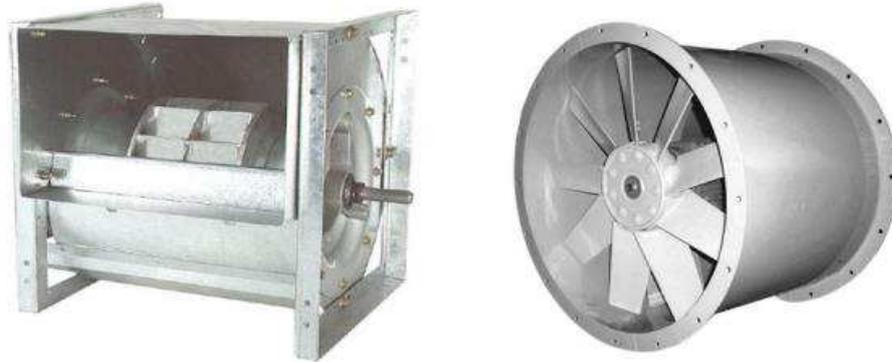


Fonte: Mehta e Bradshaw, (1979) (Traduzido)

2.3.5 Ventilador

O ventilador a ser escolhido para um túnel de vento deve superar as perdas de carga geradas em cada componente do túnel e fornecer a vazão de ar esperada (VINCENSI, 2014). Há dois tipos que são utilizados nesse equipamento: o axial e o centrífugo. O centrífugo é utilizado em circuitos abertos do tipo soprador, enquanto o axial é mais utilizado em circuitos fechados ou abertos do tipo sugador, o qual é a proposta deste projeto.

Figura 14 - Ventilador centrífugo à esquerda e ventilador axial à esquerda.



Fonte: Vincensi (2014).

2.4 Perda de Carga

Para um túnel de vento funcionar é necessário que o ventilador escolhido seja capaz de suprir a vazão do sistema e supere a queda de pressão total, assim como dito na seção anterior.

A queda de pressão total do sistema pode ser visualizada em parâmetros de perda de carga, que é obtida somando-se os valores dos coeficientes de perda de carga local de cada componente (K) multiplicados pela carga cinética (q) como mostra a equação abaixo.

$$H = \sum_i^n k_i q_i \quad (9)$$

O coeficiente de perda de carga é um termo da equação que pode ser expandido e encontrado colocando-o em função do fator de atrito de Prandtl (f), o comprimento do componente em questão (L) e o diâmetro hidráulico do mesmo (D_H).

$$k = f \frac{L}{D_H} \quad (10)$$

O coeficiente de atrito de Prandtl é a definição de uma função que relaciona o número de Reynolds e a rugosidade relativa (e/D), a qual é um parâmetro entre a rugosidade superficial do material (e) e o diâmetro da seção do componente. Este fator

pode ser encontrado utilizando o diagrama de Moody, utilizando os parâmetros de entrada, porém neste projeto será utilizada a expressão matemática de Colebrook, a qual é a mais usual entre as diversas existentes criadas por ajuste de dados experimentais.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (11)$$

Nesta expressão encontra-se f implicitamente. Dessa forma é necessário realizar iterações para encontrar um valor convergido, mas sem a necessidade de métodos muito extensos, já que a equação é muito estável, podendo-se chegar ao resultado com poucas iterações. Para isso, pode-se criar rotinas no *Excel* ou softwares como o *MatLab* para agilizar e facilitar o processo de cálculo.

Para a rugosidade superficial dos componentes neste projeto, será adotado o maior valor da faixa imposta na tabela dos materiais abaixo, já que esta variável é encontrada experimentalmente e possui valores diversos dependendo da variação do material e também com a intenção de gerar um fator de segurança para a determinação final da potência do ventilador.

Tabela 1 - Rugosidade para materiais comuns na engenharia.

MATERIAL	RUGOSIDADE (mm)
<i>Aço Rebitado</i>	0,9-9
<i>Concreto</i>	0,3-3
<i>Madeira</i>	0,2-0,9
<i>Ferro Fundido</i>	0,26
<i>Ferro Galvanizado</i>	0,15
<i>Ferro Fundido Asfaltado</i>	0,12
<i>Aço Comercial</i>	0,046
<i>Trefilado</i>	0,0015

Fonte: Fox, McDonald e Pritchard, 2006 (Adaptado).

O outro fator que é multiplicado ao coeficiente de perda de carga para encontrar a queda de pressão do sistema é a carga cinética. Esta é uma variação da fórmula que parte da pressão dinâmica, de forma que ao ser multiplicada pelo coeficiente de perda de carga, obtém-se o resultado em metros.

$$q = \frac{V^2}{2g} \quad (12)$$

Os coeficientes de perda de carga dos componentes do túnel de vento apresentam algumas particularidades, as quais serão mostradas a seguir.

2.4.1 Seção de Testes

A seção de testes é o único componente que, para encontrar o coeficiente de perda de carga, não difere do que já foi abordado anteriormente, já este é um duto de seção contínua. Assim, esse coeficiente pode ser encontrado pela expressão:

$$K_{st} = f \frac{L}{D_H} \quad (13)$$

Assim como os demais componentes, por não se tratar de seções de geometria circular com a finalidade de facilitar a construção, o diâmetro hidráulico precisa ser calculado para ser inserido nas equações, mas como todas as seções deste projeto são quadradas, o seu diâmetro hidráulico é igual ao lado da seção quadrada (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2006).

2.4.2 Bocal

Este componente é o que possui um dos menores valores de perdas carga totais do sistema completo, não havendo assim a necessidade de utilizar equacionamento de grande complexidade para representá-los, considerando então apenas as perdas por atrito. Assim, pode-se utilizar a expressão para perdas de contrações curvadas propostas por (WATTENDORF, 1938):

$$K_{bc} = 0,32f_{es} \frac{L_{bc}}{D_{Hsb}} \quad (14)$$

Como o bocal possui variação do tamanho de suas seções, é necessário ser feitas algumas observações:

- O termo f_{es} é o fator de atrito médio entre as seções de entrada e saída do bocal, sendo necessário calculá-los individualmente para posteriormente encontrar o valor médio entre eles;
- L_{bc} refere-se ao comprimento total do bocal, ou seja, a distância entre sua seção de entrada e a sua seção de saída;
- D_{Hsb} é o termo da equação que refere-se apenas ao diâmetro hidráulico da saída do bocal.

2.4.3 Câmara de Estabilização

Esta área do túnel de vento é constituída pela tela e a colmeia, fazendo-se necessário calcular as perdas de carga em cada um.

Para as telas, utiliza-se como referência (BARLOW, RAE e HOPE, 1999), o qual utiliza a expressão:

$$K_t = K_{malha}K_{RN} + \left(\frac{\sigma_s^2}{\beta_s^2} \right) \quad (15)$$

Nesta expressão, o termo K_{malha} é o coeficiente de rugosidade da tela, que para telas de arame de aço é igual a 1,3 (VICENSI, 2014). O termo K_{RN} pode ser encontrado de duas formas diferentes, dependendo do tipo de escoamento. Para um escoamento laminar tem-se:

$$K_{RN} = \left[0,785 \left(1 - \frac{Re_{tela}}{354} \right) + 1,01 \right] \quad (16)$$

Para escoamentos turbulentos, esse fator é igual a um.

O coeficiente para a colmeia pode ser encontrado da expressão empírica mostrada por (ECKERT, MORT e JOPE, 1976).

$$K_C = \lambda \left(\frac{L_c}{D_H} + 3 \right) \left(\frac{1}{\beta_c} \right)^2 + \left(\frac{1}{\beta_c} - 1 \right)^2 \quad (17)$$

O termo λ é um parâmetro que é baseado no material utilizado para confecção da colmeia, podendo ser encontrado por:

$$\lambda = \begin{cases} 0,375 \left(\frac{\Delta}{D_H} \right)^{0,4} Re_{\Delta}^{-1} \rightarrow \text{Para } Re \leq 275 \\ 0,214 \left(\frac{\Delta}{D_H} \right)^{0,4} \rightarrow \text{Para } Re > 275 \end{cases} \quad (18)$$

O material da colmeia é avaliado de acordo com comprimento da célula (L_c), seu diâmetro, Reynolds baseado na rugosidade (Re_{Δ}), a própria rugosidade da colmeia (Δ) e porosidade (β_c).

2.4.4 Difusor

Diferentemente do bocal, o difusor apresenta uma grande contribuição na perda de carga total do sistema. Dessa forma, é necessário analisar este componente de forma mais complexa, avaliando as perdas do difusor como resultado da soma do coeficiente de atrito das paredes e o de expansão (BARLOW, RAE e HOPE, 1999).

O coeficiente de atrito das paredes pode ser encontrado pela expressão:

$$K_{ap} = \left(1 - \frac{1}{A_R^2} \right) \frac{1}{8 \text{sen}\theta} \quad (19)$$

Já a perda por expansão é encontrada por correspondência experimental, representado pelo produto de um fator que relacionada a razão entre as áreas de entrada e saída do difusor e outro que relaciona o ângulo cônico deste componente.

$$K_{ex} = K_e(\theta) \left(\frac{A_R - 1}{A_R} \right)^2 \quad (20)$$

O termo em função do ângulo cônico é baseado em dados experimentais por ECKERT, MORT e JOPE (1976). Como neste projeto, será utilizada uma seção quadrada devido à sua facilidade de construção, e serão apresentadas apenas as expressões referentes a esse tipo de seção.

$$K_e = \begin{cases} 0,0923 - 0,004152\theta & \text{para } 0 < \theta < 1,5^\circ \\ 0,1222 - 0,04590\theta + 0,002203\theta^2 + 0,003269\theta^3 - 0,0006145\theta^4 \dots \\ -0,000028\theta^5 + 0,00002337\theta^6 & \text{para } 1,5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ -0,09661 + 0,04672\theta & \text{para } \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (21)$$

2.4.5 Potência do Ventilador

Assim como dito anteriormente, a potência do ventilador precisa superar toda a potência gerada pelas perdas de carga total do túnel de vento. Essa potência do sistema pode ser encontrada a partir da expressão abaixo, de forma a encontrá-la em watts (MUNSON, YOUNG e OKIISHI, 2004).

$$Pot_{mtv} = \gamma QH \quad (22)$$

Para dimensionar a potência necessária do ventilador pode-se utilizar um fator de segurança e levar em consideração o rendimento do ventilador e do motor, de forma a gerar a expressão (VICENSI, 2014).

$$Pot_{vent} = \frac{Pot_{mtv} FS}{\mu_{vent} \mu_{motor}} \quad (23)$$

2.5 Visualização do escoamento

Para visualizar as linhas de escoamento é possível utilizar métodos que proporcionem tal feito. Então surgem como alternativas a implantação de fios de lã nos corpos de prova ou a utilização de fumaça para seguir junto ao fluxo, a qual pode ser originada de uma máquina própria para essa finalidade ou da produção a partir de gelo seco. Devem sempre ser observadas características que garantam a integridade

física das pessoas e do meio ambiente, além de proporcionar uma boa visualização, relacionando com um bom índice de reflexão à luz (ALÉ, DIAS, et al., 2001).

2.6 Simulação do Escoamento

O túnel de vento é uma ferramenta didática e experimental bem eficaz, mas também é um instrumento de validação de resultados computacionais. Essas análises são chamadas de CFD ou fluidodinâmica computacional, as quais são utilizadas para simular o comportamento de experimentos envolvendo fluidos, térmica, assim como outros processos físicos. Seu princípio é baseado na resolução numérica das equações que ditam o escoamento dos fluidos como Navier-Stokes, aplicando-se condições de contorno no sistema. Dessa forma, utiliza-se o método de volumes finitos e geração das malhas do sistema para as análises numéricas (MIGUEZ, 2008)

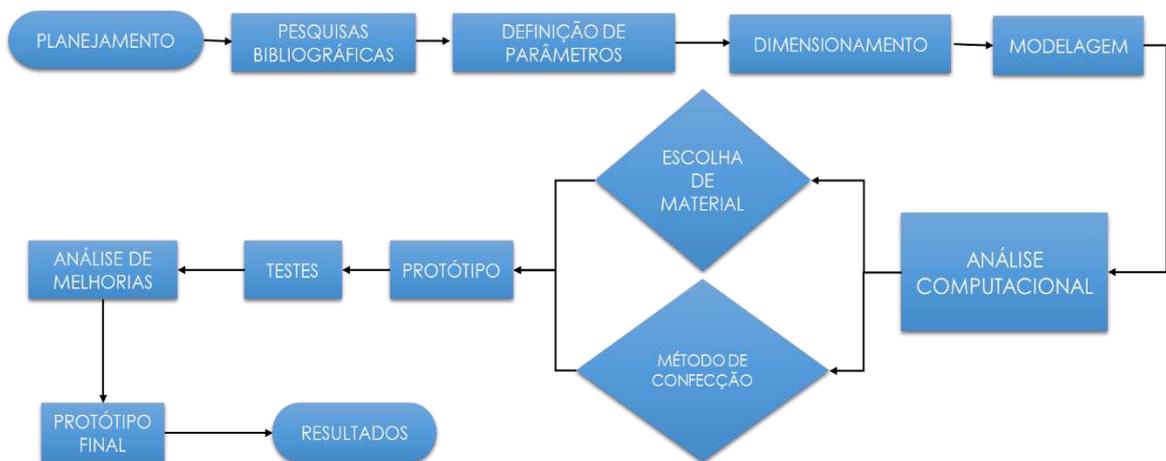
Existem diversos softwares que realizam essas simulações como *Ansys*, extensões do *Solidworks* como o *FlowSimulation*, programas da plataforma *Autodesk*, entre outros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Baseado no fluxograma acima, realizou-se a metodologia completa de concepção do projeto e construção do mini túnel de vento de bancada experimental.

Como primeira etapa, buscou-se diversas referências bibliográficas de projeto de túneis de vento e recomendações de dimensionamento de autores especializados na área para dar o ponto de partida do projeto, o que foi realizado a fundo na seção 2 deste trabalho.

Figura 15 – Fluxograma de metodologia de trabalho.



Fonte: Souza, 2016.

Com objetivo de realizar simulações para auxiliar no dimensionamento do equipamento, utilizou-se também softwares de modelagem e análise numérica.

Também foram estudados modelos e diversas geometrias de túneis de vento bem como possíveis materiais de baixo custo para a confecção. Mas antes da construção final, foi confeccionado um protótipo de papelão de acordo com as especificações propostas, para verificação em escala real do dispositivo e propor possíveis melhorias e habilidades construtivas para o projeto final, além de avaliar os resultados parciais obtidos.

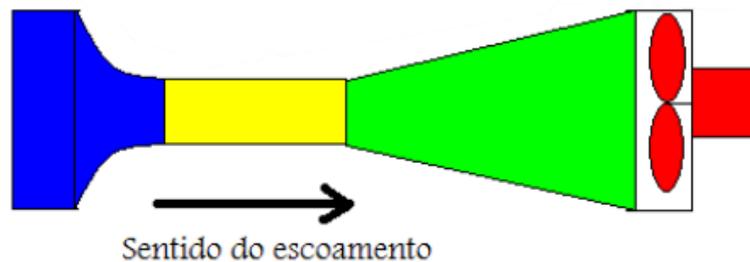
O projeto protótipo foi executado na seguinte linha de ações:

- a) definição de parâmetros;
- b) dimensionamento e modelagem 3D;
- c) construção do protótipo; e
- d) coleta de dados.

3.1 Definições dos Parâmetros

Este projeto visa a construção de um túnel de vento de pequeno porte, que seja de fácil construção e baixo custo, podendo chegar à sua seção de testes uma velocidade de escoamento de cerca de 10 m/s, de forma que possa atender diversos grupos de engenharia na modelagem de seus ensaios. Dessa forma, entre as geometrias e tipos de túnel de vento analisados, aquela que se encaixa como a mais simples é o do tipo sugador de circuito aberto, como mostra a Figura 9, além de proporcionar um fluxo mais uniforme, conforme a literatura. Os principais componentes deste tipo é a câmara de estabilização (tela e colmeia), bocal de contração, seção de testes, difusor e ventilador.

Figura 16 - Desenho de um túnel de vento sugador de circuito aberto.



Fonte: Soethe, 2011(adaptado).

3.2 Dimensionamento e Modelagem

Após a etapa de definição de parâmetros, foi realizado primeiramente a etapa de dimensionamento dos componentes do túnel de vento. Para isso, foram realizados análises e cálculos baseados nas referências bibliográficas e recomendações citadas na Seção 2.2, com auxílio do software *MatLab* e *Excel*.

Para a etapa de modelagem utilizou-se o software *SolidWorks*, para visualização 3D dos componentes e simulação de escoamento do sistema utilizando a extensão *FlowSimulation*, para a verificação de parâmetros do projeto.

De modo geral a metodologia de dimensionamento do projeto segue os passos a seguir:

a) Seção de Testes

Assim como foi relatado, este é primeiro componente do túnel de vento a ser dimensionado. Desse modo, foi definido primeiramente que este teria seção quadrada, com a finalidade de facilitar o processo construtivo e dimensionamento dos demais componentes. Com o objetivo de projetar um dispositivo com dimensões pequenas que chegasse a cerca de 1,5 metro de comprimento, optou-se por fixar o valor de 150 mm de lado, o que seria suficiente para testar pequenos corpos de prova, gerando uma vazão de cerca 0,225 m³/s. Calculou-se o comprimento em 450 mm, já que esse pode ser até 3 vezes o tamanho do lado da seção, além de que quanto mais comprida a seção de testes, melhor o comportamento do fluxo.

Figura 17 – Vistas da modelagem da seção de testes.

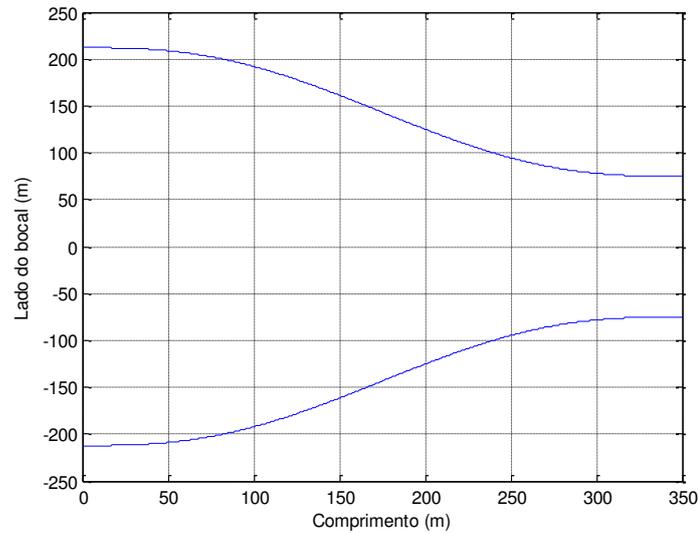


b) Bocal

A saída deste elemento é ligada a seção de testes, portanto tem como dimensão 150mmx150mm. Obedecendo a recomendação de que a razão entre as áreas de entrada e saída deve estar entre 6-10, sendo que a razão ótima encontrada por Bell e Mehta (1988) deve ser cerca de 7.7, fixou-se o valor de 8 (próximo do valor otimizado), o qual proporcionou uma área de entrada de com dimensões de 424mmx424mm. Como a relação L/He deve ser entre 0.89-1.79, foi adotado um comprimento L de 350mm que gerou uma razão de 1.64, garantindo o dimensionamento dentro das recomendações.

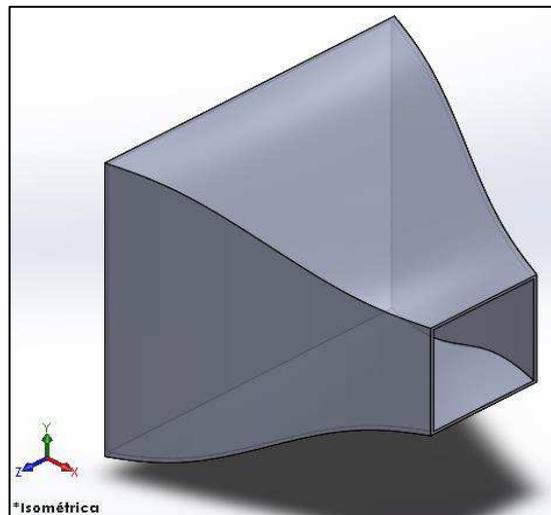
Para traçar a curva do bocal, utilizou-se o método de Morel otimizado por Bell e Mehta (1988) para a equação do quinto grau mostrada na Seção 2.2.2, a qual foi utilizada em uma rotina no *MatLab* para plotar o gráfico mostrado abaixo.

Gráfico 1 - Curvatura do Bocal.



Com a aquisição dos pontos do gráfico e das demais dimensões foi possível modelar de forma mais precisa o bocal, resultando na figura abaixo.

Figura 18 - Modelagem do bocal de contração.



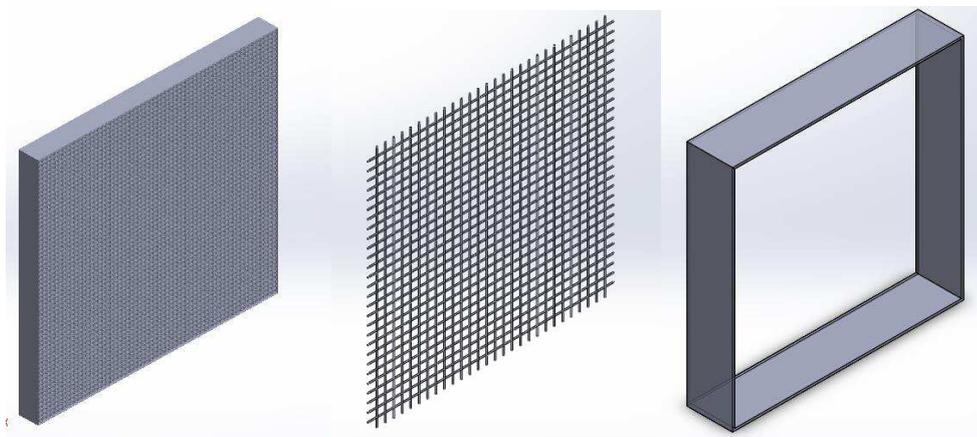
c) Câmara de Estabilização

A câmara de estabilização é composta pela colmeia e a tela de turbulência, as quais tem o objetivo de laminar e uniformizar a velocidade do ar. Seguindo as bases bibliográficas, a câmara deve possuir comprimento com cerca de 20% da maior dimensão do bocal (424mm), gerando assim, o valor de 85mm.

A tela foi escolhida baseada em dados comerciais, de forma a facilitar o processo construtivo, tendo como seu material o aço, forma de célula quadrada e com 0,7 mm de diâmetro do fio de arame.

Para as colmeias, por motivo de custos e facilidade de encontrar no mercado, decidiu-se usar canudos de plástico para a confecção. Como possuem diâmetro de 5mm, o comprimento da colmeia, que deve ser de 7 a 10 vezes desse valor, foi de 35mm. Foram utilizadas cerca de 7000 células para completar a câmara.

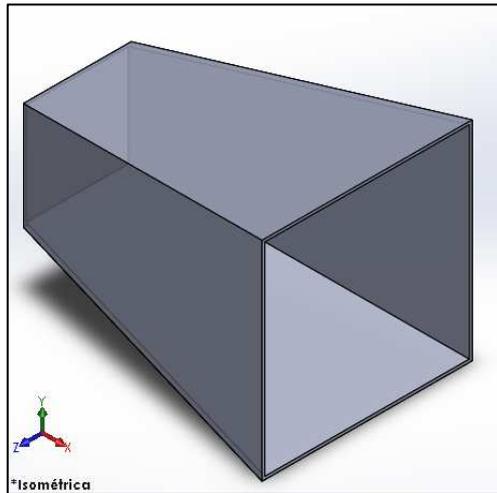
Figura 19 - Modelagem colmeia, tela e seção da câmara



d) Difusor

O difusor é um aumento de área destinado a reduzir a velocidade a fim de recuperar a altura de pressão do escoamento. Por este ser um projeto de um túnel de vento de pequeno porte, trata-se de um difusor com ângulo de abertura baixo. Este componente tem a sua entrada conectada a seção de testes e foi dimensionado com o a angulação de 10° para melhor recuperação da perda de pressão. A razão entre as áreas foi fixada em 4, de forma que o lado da saída do difusor ficou em 300mm, seguindo as recomendações (3 a 5) e o seu comprimento em 425mm. Através da análise da Figura 7, verificou-se que não será necessária a utilização de telas no difusor.

Figura 20 - Modelagem do difusor.



e) Ventilador

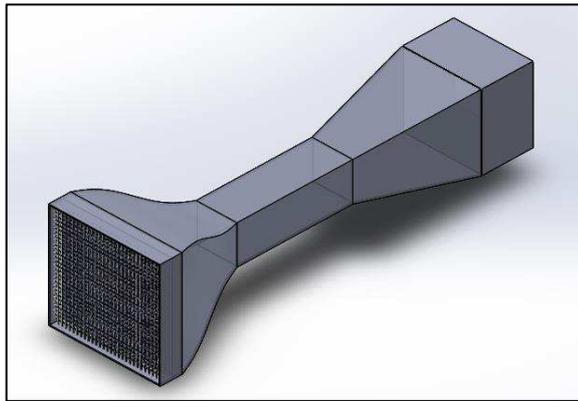
O ventilador a ser escolhido para o túnel de vento teve a finalidade de obter a vazão necessária para visualização do escoamento. O ventilador a ser utilizado foi do tipo exaustor com diâmetro de 300mm e comprimento da seção de 200mm, com a finalidade de deixar o túnel de vento com cerca de 1,5 metro, utilizado em projetos anteriores e reaproveitado para o protótipo, inicialmente, sem haver os cálculos de perda de carga dos componentes. Sua vazão é de 1500 m³/h e potência 130 w, mas encontrado facilmente no mercado e a baixo custo.

Figura 21 - Exaustor escolhido



A modelagem completa do túnel de vento pode ser verificada na Figura 15.

Figura 22 - Modelagem do túnel de vento.



3.3 Construção do Protótipo

Na construção do protótipo utilizou-se o software *AutoCad* para realizar os desenhos 2D dos componentes. Posteriormente, fez a impressão em tamanho real dos desenhos de forma a colá-los em folhas de papelão, com a finalidade de preparar um gabarito para facilitar a realização dos cortes para a montagem dos componentes.

Figura 23 - Corte dos componentes no papelão

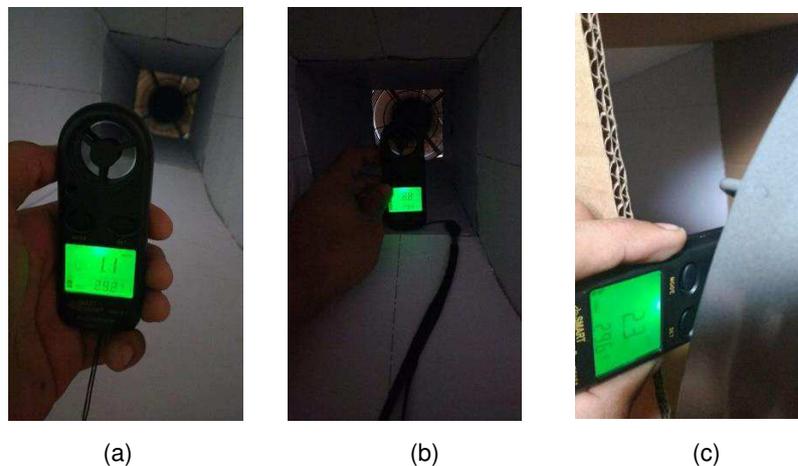


Com todas as peças cortadas, realizou a montagem utilizando álcool para moldagem do papelão e cola instantânea para fixação, iniciando-se pela seção de testes, assim como ocorreu no dimensionamento.

3.3.1 Coleta de Dados

No protótipo, como pode ser verificado nas figuras abaixo, foi verificado se a velocidade do escoamento, a qual foi medida com o auxílio de anemômetro digital em várias partes do túnel, estava condizendo com os dados, podendo-se avaliar se houve pequenas diferenças nos valores teóricos para o real.

Figura 24 - Velocidade do escoamento (a) no bocal, (b) na seção de testes e (c) no final do difusor.



3.4 Construção do Protótipo Final

Com base na construção e nos bons testes do protótipo, partiu-se para a construção do mini túnel de vento final. Para isso, adotou-se os mesmos parâmetros e substituiu-se os materiais empregados de forma a dar maior resistência estrutural e melhor visualização dos escoamentos. Assim, os materiais empregados foram:

- 01 Folha de compensado de 4 mm;
- 01 placa de acrílico;
- Canudos;
- Uma tela de célula 7mm e diâmetro 0,7 mm;
- 2 dobradiças;
- Máquina de fumaça e exaustor;

- Cano;
- Alfinetes e tachinhas.

Utilizou-se as mesmas dimensões projetadas para o protótipo, aproveitando-se os desenhos 2D para realizar os cortes das peças na máquina a laser para posterior montagem, utilizando a folha de compensado e a placa de acrílico na seção de testes para que fosse possível a verificação dos ensaios. Para o projeto final, adicionou-se mais uma peça de vedação do fim do túnel, de forma que esta proporcionasse a velocidade desejada na seção de testes, diminuindo o erro encontrado no protótipo.

A colmeia foi confeccionada com canudos colados em fileiras como pode ser visto na figura abaixo.

Figura 25 - Confeção colmeia de canudos.



Para a visualização do escoamento, utilizou-se uma máquina de fumaça modelo F -1000 EPP de 750 W, a qual é capaz de gerar a fumaça necessária para a visualização do escoamento. Porém, adaptou-se uma tubulação para canalizar a fumaça e proporcionar que a mesma chegue o mais uniforme possível na seção de testes. Para melhorar a visualização também, utilizou-se um papel de cor preta para forrar a parede da seção de testes.

Figura 26 – Máquina de fumaça adaptada.



Assim como no protótipo, confeccionou-se o mini túnel de vento final, seguindo os passos adotados no projeto.

Com a finalidade de flexibilizar as análises e modelagem de testes no mini túnel de vento, implementou-se um *Dimmer* de forma a variar a velocidade do ventilador e obter a visualização dos escoamentos para diferentes experimentos.

Figura 27 – *Dimmer* utilizado para controlar a velocidade do vento.



3.4.1 Cálculo das Perdas de Carga e Potência do Ventilador

No protótipo final, realizou-se o cálculo de perdas de cargas total do sistema para verificar se o ventilador utilizado no protótipo teria potência necessária para superar a obtida pelo túnel de vento.

Assim, baseando nas referências e equacionamentos mostrados na Seção 2.4 (Perdas de Carga), realizou-se os cálculos para cada componente do túnel de vento, os quais podem ser vistos de forma mais detalhada no Apêndice B. Os valores de rugosidade foram adotados conforme mostrado na tabela (1) e os valores para o

coeficiente de atrito de *Prandtl* foram encontrados através de iterações realizados no *MatLab*. Os resultados podem ser visualizados na tabela abaixo.

Tabela 2 – Valores de perdas de carga dos componentes.

COMPONENTE	PERDA DE CARGA (m)
<i>Seção de Testes</i>	9,411
<i>Bocal</i>	0,035
<i>Câmara de Estabilização</i>	0,009
<i>Colmeia</i>	0,479
<i>Tela</i>	5,26
<i>Difusor</i>	7,969
<i>Seção do Ventilador</i>	0,003
TOTAL	23,286

Com o valor total da perda de carga do equipamento, pode-se calcular a potência requerida pelo mesmo através da equação (22).

$$Pot_{mtv} = 12,01 \times 0,225 \times 23,17 = 62,611 \text{ watts}$$

Adotando um fator de segurança 1,4, um rendimento para o ventilador de 80% e para o motor de 90%, podemos chegar a ventilador com a seguinte potência:

$$Pot_{vent} = \frac{62,611 \times 1,4}{0,8 \times 0,9} = 121,74 \text{ watts}$$

Como o ventilador utilizado no protótipo possui 130 watts de potência, o mesmo pode ser usado para a construção final, já que apresenta potência maior que a gerada pelo sistema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise Computacional

Com a modelagem 3D realizou-se simulações de escoamento através da extensão *FlowSimulation* do *SolidWorks*, sendo possível verificar as linhas de escoamento assim como vorticidade, velocidades e pressão em diferentes trechos do túnel de vento projetado.

Figura 28 - Velocidade e linhas de escoamento.

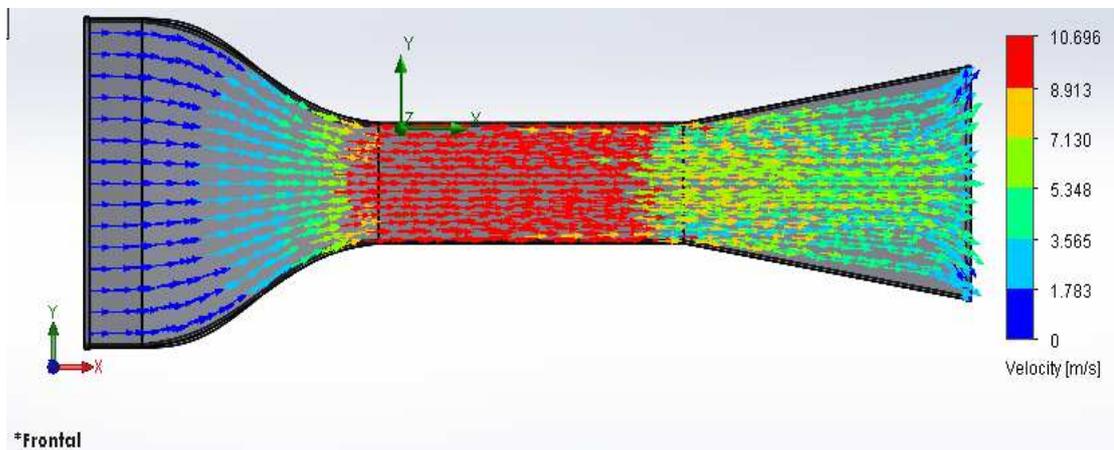


Figura 29 – Análise da pressão no túnel de vento.

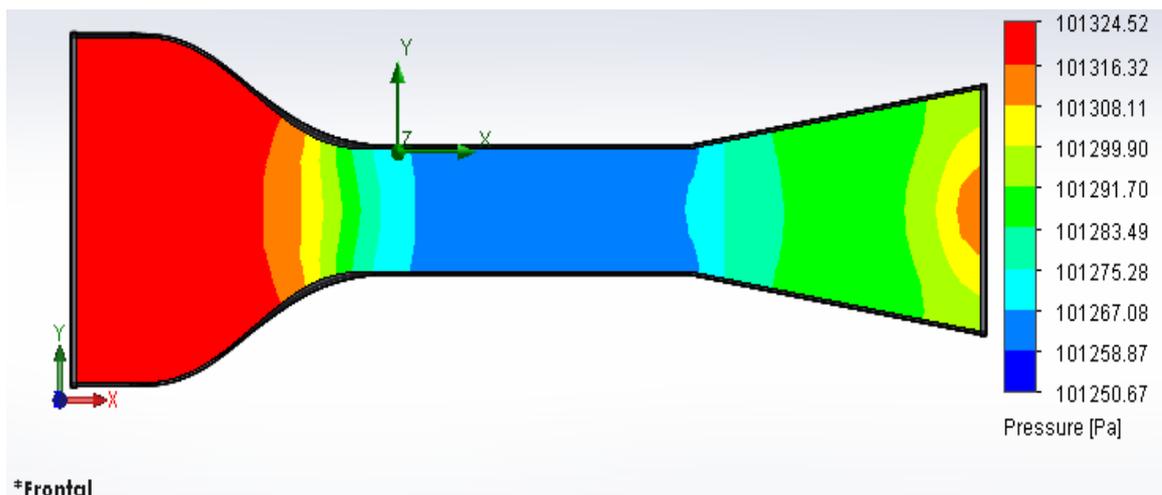
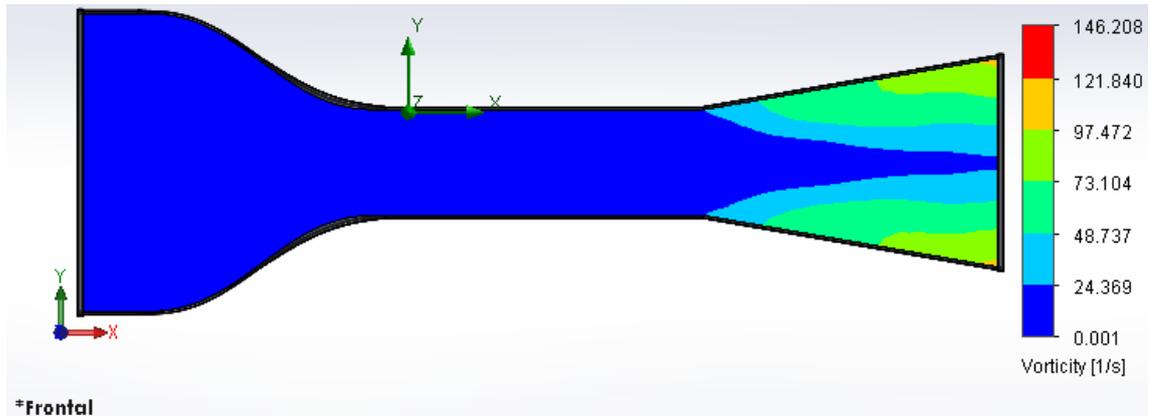


Figura 30 – Análise de vorticidade



Pôde-se verificar que o fluxo mostrou bom comportamento segundo a simulação, mostrando que as velocidades desejadas são atendidas, além de possuir uma boa distribuição de escoamento. Verificou-se também que houve vorticidade praticamente nula na seção de testes, mostrando que o dimensionamento atendeu aos requisitos de garantir que o ar chegue o mais uniforme possível nos corpos de prova segundo a simulação.

4.2 Análise de Velocidades e Construção dos Protótipos

Com o protótipo inicial construído, coletou-se os dados nos pontos indicados na figura abaixo e realizou-se a comparação entre os valores calculados e os medidos com auxílio do anemômetro digital. Os resultados podem ser visualizados na tabela abaixo.

Figura 31 – Protótipo inicial construído.



Tabela 3 – Comparação entre dados coletados e medidos.

SEÇÃO	VELOCIDADE (m/s)		ERRO (%)
	Teórico	Medido	
<i>Bocal (início)</i>	1,25	1,1	12
<i>Seção de testes</i>	10	8,8	12
<i>Difusor (fim)</i>	2,5	2,3	8

Através dos dados tabelados foi possível averiguar que houve uma considerável diferença percentual de velocidade dentro da seção de testes, fazendo com que o protótipo inicial não chegasse à sua meta.

Um dos motivos dos erros percentuais da medição da velocidade deve-se ao material empregado na confecção, já que o papelão possui muitas imperfeições e devido ao método de confecção com cola instantânea impossibilitou um vedamento mais eficaz do equipamento, além de apresentar maiores rugosidades na superfície, devido ao dobramento deste material. Por isso, para o projeto final utilizou-se chapa de compensado, de forma a eliminar essas imperfeições e agregar maior rigidez ao projeto, mas colocando em evidência ainda o baixo custo, a facilidade construtiva e garantida um peso relativamente baixo. Além disso, realizou-se o vedamento no final do túnel, na seção do ventilador, já que esta é quadrada e o ventilador possui formato circular.

Figura 32 – Vedação na parte final do túnel de vento.



Com a análise das melhorias a serem feitas para o protótipo final, realizou-se a construção mini túnel de vento.

Figura 33 - Mini Túnel de Vento construído.



Figura 34 - Detalhes máquina de fumaça e câmara de estabilização.



Com o túnel de vento pronto, novamente aferiu-se a velocidade na seção de testes e foi encontrado o valor de 10 m/s, anulando o erro encontrado no protótipo em relação aos parâmetros de projeto.

Figura 35 - Aferição da velocidade na seção de testes.



4.3 Análises de Escoamentos

Posteriormente iniciou-se os testes com os corpos de prova. Como forma de comparar e validar os resultados obtidos, realizou-se, por meio do *Flow Simulation*, a simulação de escoamentos dentro da seção de testes com alguns corpos de prova os quais foram escolhidos um bloco, uma esfera e o conjunto bloco-esfera. As comparações podem ser vistas abaixo e é possível verificar que o túnel de vento construído conseguiu reproduzir experimentalmente as análises computacionais.

Figura 36 – Comparação da análise computacional e experimental do escoamento no bloco.

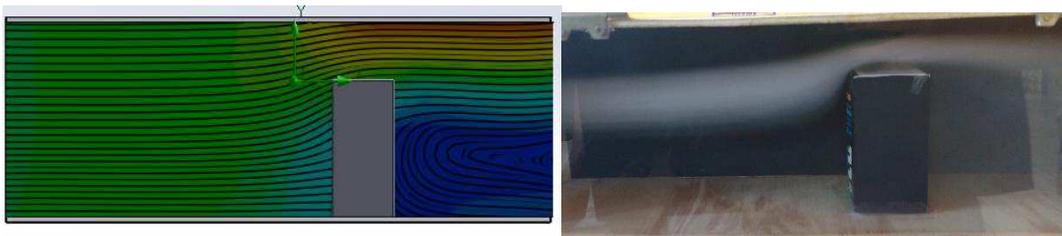


Figura 37 – Comparação da análise computacional e experimental do escoamento na esfera.

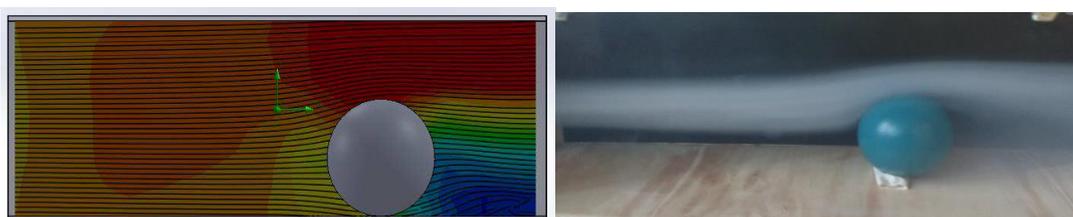
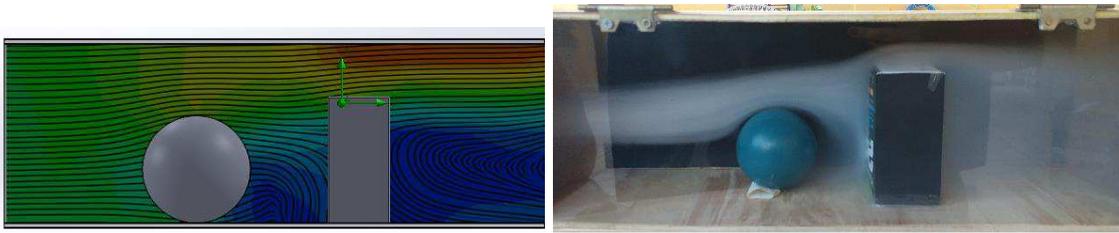


Figura 38 – Comparação da análise computacional e experimental do conjunto.



Realizou-se também a visualização das linhas de escoamento para efeito de comparação em um carro de brinquedo com e sem um objeto em cima do mesmo, onde verificou-se o deslocamento das linhas e aumento de vórtices.

Figura 39 – Visualização de escoamento em um carro de brinquedo.



Figura 40 - Visualização de escoamento em um carro de brinquedo com objeto em cima.



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da revisão bibliográfica para atualização do estado da arte e seguindo o cronograma proposto, foi possível realizar o que foi traçado pela proposta do estudo.

Com os parâmetros definidos, realizou-se de forma satisfatória o dimensionamento e a modelagem do protótipo do túnel de vento, aliando ideias às recomendações. Assim, resultou posteriormente na construção de um túnel de vento com materiais leves e baratos para a verificação do processo construtivo e comportamento do dispositivo, analisando a velocidade dentro da seção de testes e analisando possíveis melhorias para etapa final.

De posse dos resultados do protótipo, construiu-se o projeto final mostrando-se fiel ao que foi planejamento, sendo possível realizar ensaios didáticos como os que foram realizados, de forma dinamizar mais o aprendizado desta área, com análises de objetos e corpos de prova.

Desta forma, o Mini Túnel de Vento projetado, construído e testado servirá como mais uma ferramenta didática para os alunos de graduação que realizam estudos na área de Mecânica dos Fluidos na Universidade Estadual do Maranhão.

Como sugestão para trabalhos futuros e possíveis melhorias para o equipamento, propõe-se a implantação de um sistema de medição de forças de arrasto e sustentação dos corpos de prova, além de um sistema integrado de instrumentação e acionamento capaz de regular a velocidade, fumaça, indicador de temperaturas e pressão dentro da seção de testes.

REFERÊNCIAS

- ALÉ, J. A. V. et al. **Desenvolvimento de Equipamentos Didáticos para Visualização de Fluxo**. COBENGE. Porto Alegre, p. 62. 2001.
- BARLOW, J. B.; RAE, W. H.; HOPE, A. **Low-Speed Wind Tunnel Testing**. 3. ed. Nova York: Wiley, 1999.
- BELL, J. H.; MEHTA, R. D. **Contraction Design For Small Low-Speed Wind Tunnels**. Stanford. 1988. (JIAA-TR-84).
- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das Construções**. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2011.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- COUTINHO, F. R. **Projeto de um Túnel de Vento Subsônico do Tipo Soprador**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.
- ECKERT, W. T.; MORT, K. W.; JOPE, J. **Aerodynamic Design Guidelines and**. National Aeronautics and Space Administration: Washington, 1976.
- FARIA, A. I. R.; SILVA, E. F. D.; RIBEIRO, M. V. **Projeto, Construção e Avaliação de um Mini-Túnel de Vento para Fins Didáticos**. Faculdade Pitágoras: Anápolis, 2014.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- GOECKI, J. P. **Túneis Aerodinâmicos: passado, presente e futuro**. Águas de Lindóia: [s.n.], 1988.
- ISMAIL, K. A. R.; LINO, F. A. M. Aerodinâmica Experimental. In: ISMAIL, K. A. R. **Aerodinâmica Experimental**. Campinas: do Autor, v. I, 2010. Cap. 2, p. 59-95.
- LABTERMO. **Labtermo**. Disponível em: <<http://www.labtermo.ufsc.br/>>. Acesso em: 20 Setembro 2016.
- MEHTA, R. D. **The Aerodynamic Design of Blower Tunnels with Wide-Angle Diffusers**. Aerospace Sci. Londres, p. 59-120. 1977.
- MEHTA, R. D.; BRADSHAW, P. **Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels**, November 1979. 443-449.
- MIGUEZ, M. F. **Estudo em CFD do Escoamento de Líquido e**. Agência Nacional de Petróleo. Rio de Janeiro, p. 66. 2008.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos de Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

SOETHE, L. V.; SOUZA, L. F. S.; DEYNA, A. Projeto e Construção de um Túnel de Vento Didático. **XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, Blumenau , 2011.

SOUZA, Diógenes Leite. Projeto e construção de um mini túnel de vento para estudos aerodinâmicos. In: CONGRESSO NACIONAL DOS ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, 23., 2016, Piauí. Anais...Piauí: CREEM, 2016.

VICENSI, A. **Dimensionamento de um Túnel de Vento Subsônico**. Panambi: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2014.

WATTENDORF, F. L. **Factors Influencing the Energy Ratio of Return Flow Wind Tunnels**. 5th International Congress for Applied Mechanics. Cambridge. 1938.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2002.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Rotina no software matlab para dimensionamento do bocal

```

%%%%%%%%%% DIMENSIONAMENTO BOCAL MINI TUNEL VENTO %%%%%%%%%%%
clc
clear all
clear figure
%%%%%%%%%% DADOS DA SEÇÃO DE TESTES %%%%%%%%%%%
disp('Dimensões Seção de Testes (Quadrada)')
Ht=input('Altura e Largura (em milímetros): ');
Ls= Ht*3;
As=Ht^2;
fprintf('Comprimento Seção de Testes: %.0f mm\n',Ls);
disp(' ');
%%%%%%%%%% DADOS DO BOCAL %%%%%%%%%%%
disp('Dimensionamento do Bocal')
L=input('Comprimento (em milímetros): ');
He=(sqrt(As*8))/2;
Hs=Ht/2;
n=5;
z=0:0.1:L;
x=z/L;
y = He-(He-Hs)*(6*(x.^n)-15*(x.^(n-1))+10*(x.^(n-2)));
plot(z,y);hold on
y = -(He-(He-Hs)*(6*(x.^n)-15*(x.^(n-1))+10*(x.^(n-2))));
plot(z,y);grid on;
fprintf('Altura da Entrada do Bocal: %.0f mm\n',He*2);
fprintf('Altura da Saída do Bocal: %.0f mm\n',Hs*2);
Razao_L_Hi=L/He;
Razao_area_bocal=(He^2)/(Hs^2);
fprintf('Razão L/Hi: %.2f\n',Razao_L_Hi);
fprintf('Razão áreas do bocal: %.2f\n',Razao_area_bocal);
%%%%%%%%%% CÂMARA DE ESTABILIZAÇÃO %%%%%%%%%%%
disp(' ');
disp('Dimensionamento da Câmara de Estabilização')
fprintf('Altura e Largura da Câmara: %.0f mm\n',He*2);
fprintf('Comprimento da Câmara: %.0f mm\n',He*2*0.2);
%%%%%%%%%% DIFUSOR %%%%%%%%%%%
disp(' ');
disp('Dimensionamento do Difusor')
Lv = input('Lado da seção do ventilador (em milímetros): ');
Angulo=input('Ângulo do Difusor (Em Graus): ');
fprintf('Altura da Entrada do Difusor: %.0f mm\n',Ht);
Razao = Lv/Ht;
fprintf('Razão entre áreas: %.2f\n',Razao);
C=((Lv-Ht)/2)/tan(Angulo*pi/180);
fprintf('Comprimento do Difusor: %.0fmm\n',C);

```

```
Command Window

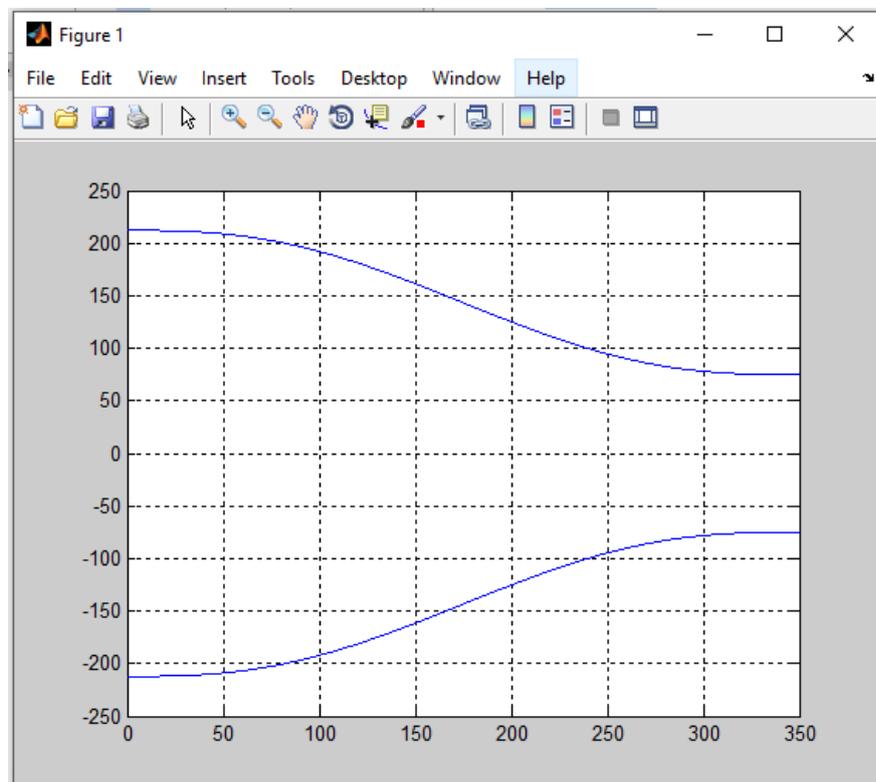
Dimensões Seção de Testes (Quadrada)
Altura e Largura (em milímetros): 150
Comprimento Seção de Testes: 450 mm

Dimensionamento do Bocal
Comprimento (em milímetros): 350
Altura da Entrada do Bocal: 424 mm
Altura da Saída do Bocal: 150 mm
Razão L/Hi: 1.65
Razão áreas do bocal: 8.00

Dimensionamento da Câmara de Estabilização
Altura e Largura da Câmara: 424 mm
Comprimento da Câmara: 85 mm

Dimensionamento do Difusor
Lado da seção do ventilador (em milímetros): 300
Ângulo do Difusor (Em Graus): 10
Altura da Entrada do Difusor: 150 mm
Razão entre áreas: 2.00
Comprimento do Difusor: 425mm

fx >>
```



APÊNDICE B – Cálculos de perda de carga do túnel de vento

DADOS DE PROJETO		
ENTRADA	VALOR	UNIDADE
Velocidade Seção de Teste	10	m/s
Densidade do Fluido	1,225	kg/m ³
Viscosidade	0,0000179	Pas
Vazão	0,225	m ³ /s
Pressão	101325	Pa
Gravidade	9,81	m/s ²

SEÇÃO DE TESTES		
ENTRADA	VALOR	UNIDADE
Forma Geométrica	Quadrada	
Altura	0,15	m
Largura	0,15	m
Comprimento	0,45	m
Diâmetro Hidráulico	0,15	m
Carga Cinética	490,5	m
Velocidade	10	m/s
Reynolds	1,03E+05	
Fator de Atrito	0,0063956	
Coeficiente de Perda	0,0191868	
Perda de Pressão	9,4111254	m

BOCAL					
ENTRADA	VALOR	UNIDADE	SAÍDA	VALOR	UNIDADE
Forma Geométrica	Quadrada		Forma Geométrica	Quadrada	
Altura	0,424	m	Altura	0,150	m
Largura	0,424	m	Largura	0,150	m
Comprimento	0,35	m	Comprimento	0,35	m
Área de Entrada	0,1800	m ²	Área de Entrada	0,0225	m ²
Razão de Área	8,0		Razão de Área	8,0	
Carga Cinética	7,66	m	Carga Cinética	490,50	m
Velocidade	1,25	m/s	Velocidade	10,00	m/s
Diâmetro Hidráulico	0,424	m	Diâmetro Hidráulico	0,150	m
Reynolds	3,63E+04		Reynolds	1,03E+05	
Fator de Atrito	0,005882		Fator de Atrito	0,0063956	
Fator de Atrito Médio			0,0061388		
Coeficiente Perda			0,004583637		
Perda de Pressão			0,035130631 m		

COLMEIA		
ENTRADA	VALOR	UNIDADE
Forma Geométrica	Quadrada	
Forma Célula	Hexagonal	
Altura	0,424	m
Largura	0,424	m
Rugosidade	0	(LISO)
Comprimento	0,035	m
Espessura	0,001	m
Porosidade	0,8	
Diâmetro Hidráulico Célula	0,005	m
Carga Cinética	7,66	m
Velocidade	1,25	m/s
Área Célula	0,015707963	m ²
Área	0,180	m ²
Coefficiente Perda	0,0625	
Perda de Pressão	0,479022281	

TELAS		
ENTRADA	VALOR	UNIDADE
Forma Geométrica	Quadrada	
Forma Célula	Quadrada	
Altura	0,424	m
Largura	0,424	m
Diâmetro Arame	0,0007	m
Largura da Célula	0,005	m
Densidade da Malha	200	
Porosidade	0,7396	
Complemento	0,2604	
Fator de Malha	1,3	
Reynolds	59,88243	
Fator Krn	1,66221	
Coefficiente de Perda	0,686653	
Carga Cinética	7,66	
Perda de Pressão	5,262755	m

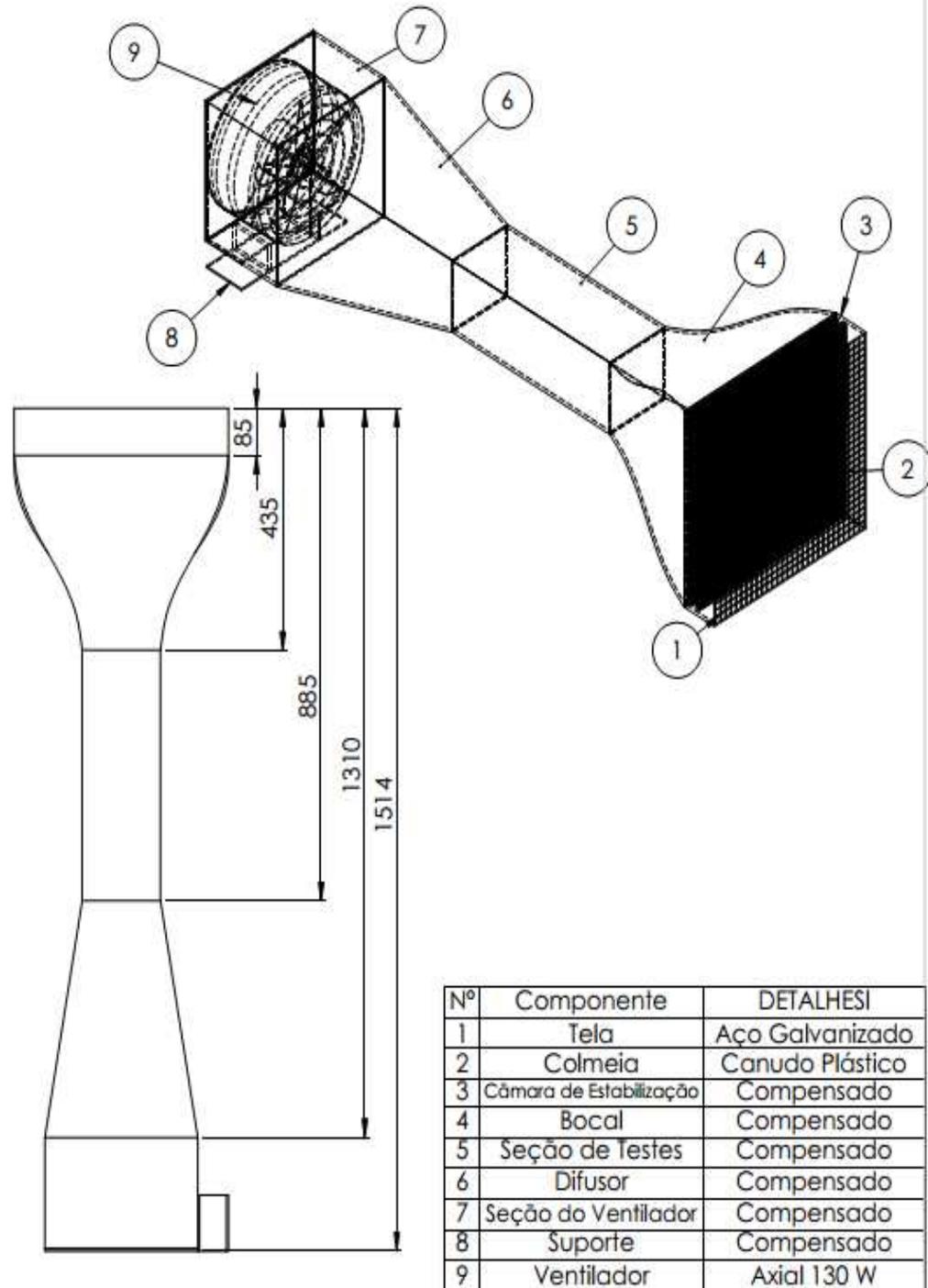
Observação: para rugosidade superficial do projeto adotou para a madeira o maior valor tabelado no projeto.

CÂMARA DE ESTABILIZAÇÃO		
ENTRADA	VALOR	UNIDADE
Forma Geométrica	Quadrada	
Altura	0,424	m
Largura	0,424	m
Comprimento	0,085	m
Área Entrada	0,180	m ²
Perímetro	1,69704	m
Carga Cinética	7,66	m
Velocidade	1,25	m/s
Diâmetro Hidráulico	0,424	m
Reynolds	3,629E+04	
Fator de Atrito	0,005882	
Coeficiente de Perda	0,001178452	
Perda de Pressão	0,009032075	m

DIFUSOR					
ENTRADA	VALOR	UNID.	SAÍDA	VALOR	UNID.
Forma Geométrica	Quadrada		Forma Geométrica	Quadrada	
Altura	0,15	m	Ângulo	10	graus
Largura	0,15	m	Largura	0,3	m
Comprimento	0,425	m	Comprimento	0,425	m
Área	0,0225	m ²	Área	0,09	m ²
Diâmetro Hidráulico	0,15	m	Diâmetro Hidráulico	0,3	m
Carga Cinética	490,5	m	Carga Cinética	30,65625	m
Velocidade	10	m/s	Velocidade	2,5	m/s
Reynolds	1,03E+05		Ke	0,4544615	
Fator de Atrito	0,0063956		Razão	4	
Coeficiente de Perda (atrito)	0,004316108		Coeficiente de Perda (exp)	0,255634594	
Coeficiente de Perda Difusor			0,259950702		
Perda de Pressão			7,969113716		

Seção Ventilador		
ENTRADA	VALOR	UNIDADE
Largura	10	m
Comprimento	0,2	m
Carga Cinética	30,65625	m
Velocidade	2,5	m/s
Reynolds	1710893,855	
Fator de Atrito	0,005851	
Coeficiente de Perda	0,00011702	
Perda de Pressão	0,003587394	m

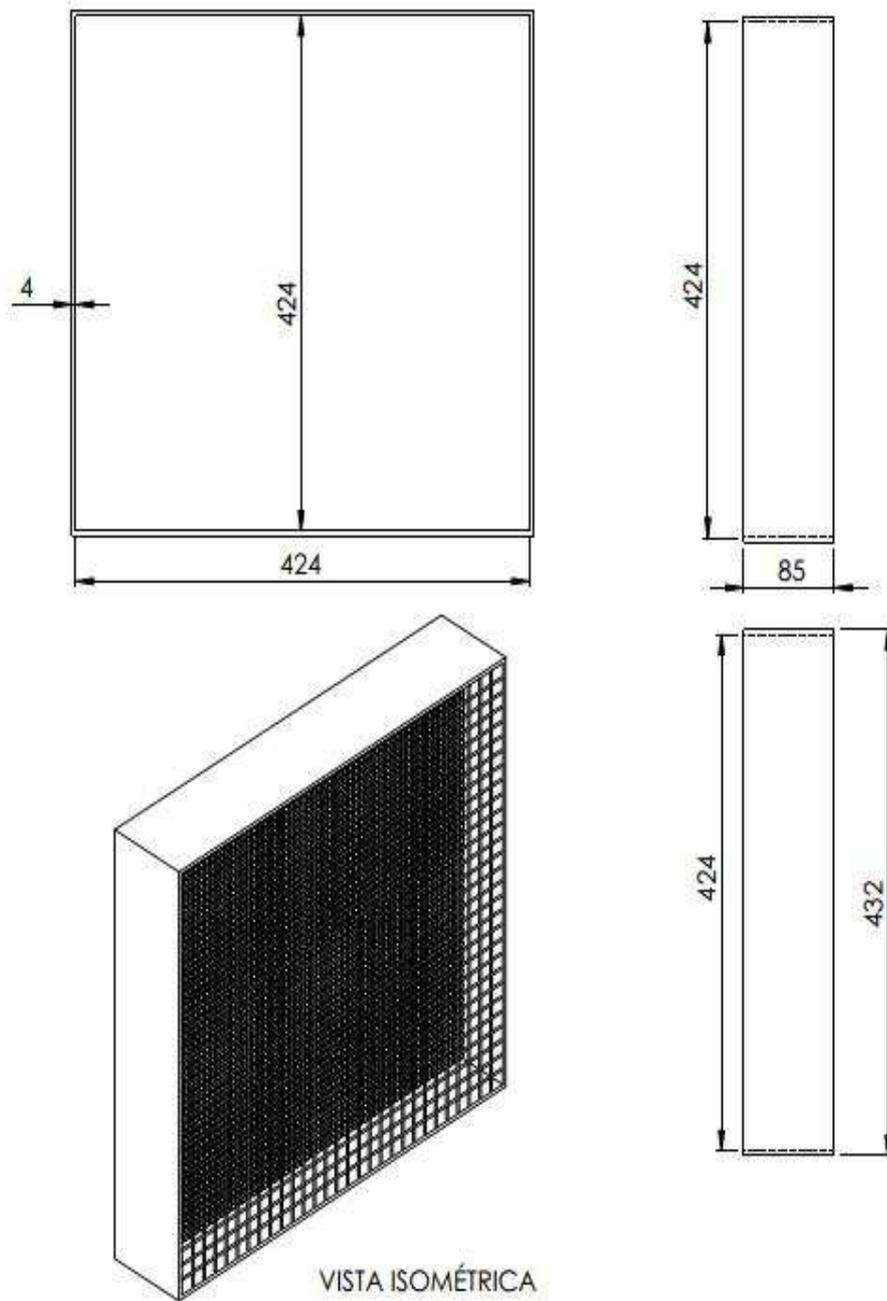
APÊNDICE C – Planta arranjo geral mini túnel de vento



Nº	Componente	DETALHES
1	Tela	Aço Galvanizado
2	Colmeia	Canudo Plástico
3	Câmara de Estabilização	Compensado
4	Bocal	Compensado
5	Seção de Testes	Compensado
6	Difusor	Compensado
7	Seção do Ventilador	Compensado
8	Suporte	Compensado
9	Ventilador	Axial 130 W

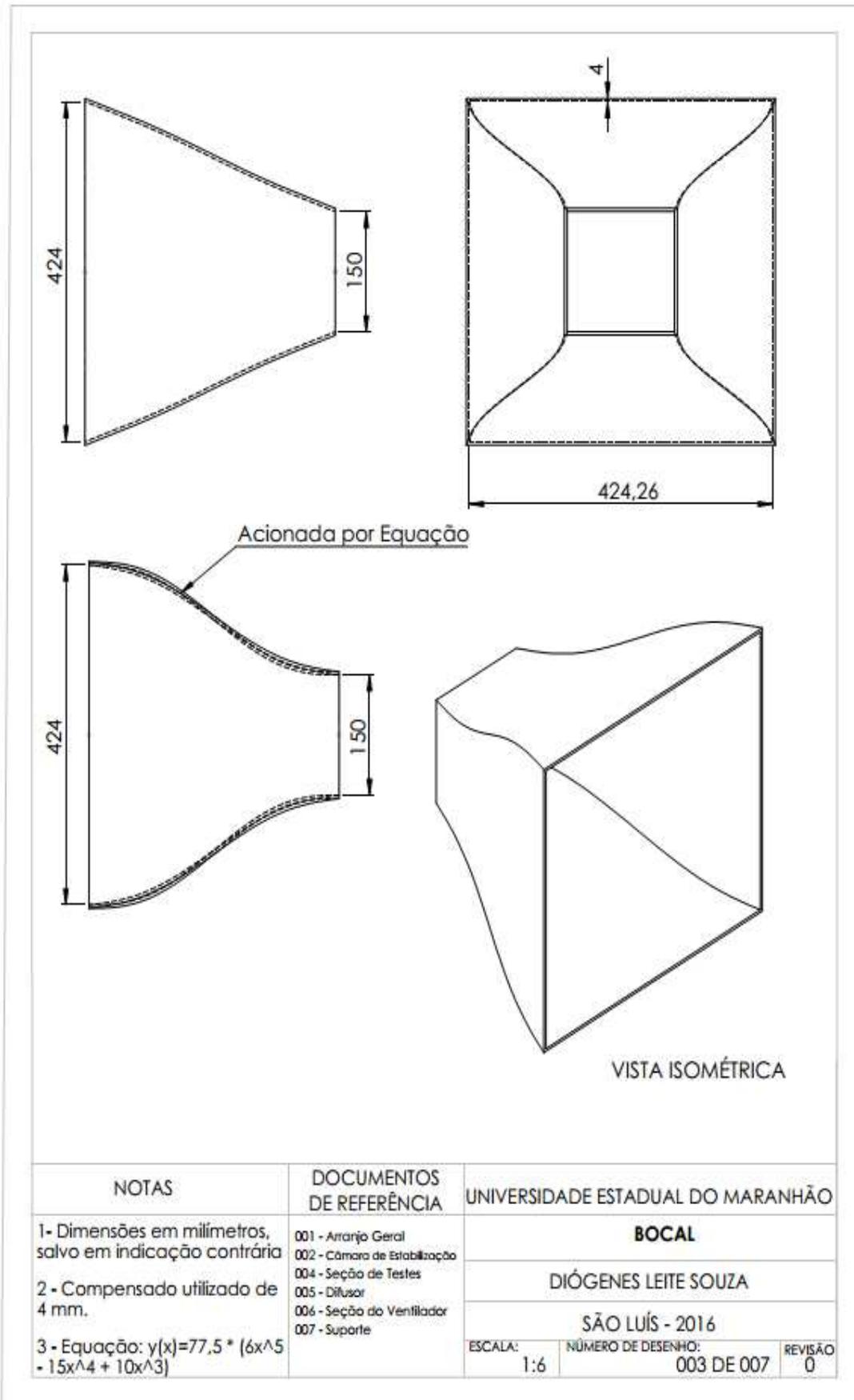
NOTAS	DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
1- Dimensões em milímetros, salvo em indicação contrária	002 - Câmara de Estabilização 003 - Bocal 004 - Seção de Testes 005 - Difusor 006 - Seção do Ventilador 007 - Suporte	ARRANJO GERAL - MINI TÚNEL DE VENTO DIÓGENES LEITE SOUZA SÃO LUÍS - 2016
		ESCALA: 1:10 NÚMERO DE DESENHO: 001 DE 007 REVISÃO 0

APÊNDICE D – Planta câmara de estabilização

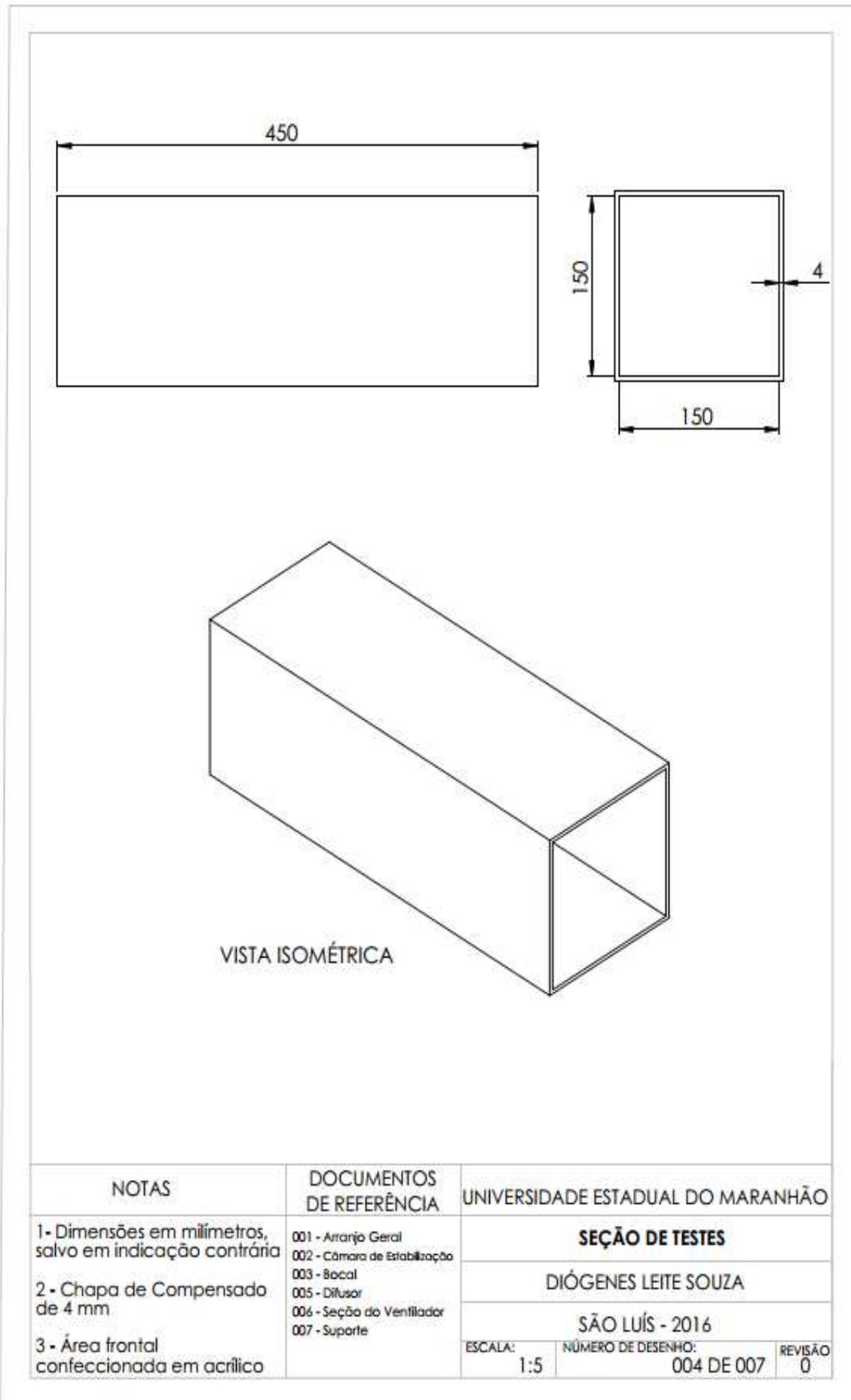


NOTAS	DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
1- Dimensões em milímetros, salvo em indicação contrária 2 - Chapa de compensado de 4 mm.	001 - Arranjo Geral 003 - Bocaal 004 - Seção de Testes 005 - Difusor 006 - Seção do Ventilador 007 - Suporte	CÂMARA DE ESTABILIZAÇÃO
		DIÓGENES LEITE SOUZA
		SÃO LUÍS - 2016
		ESCALA: 1:5 NÚMERO DE DESENHO: 002 DE 007 REVISÃO 0

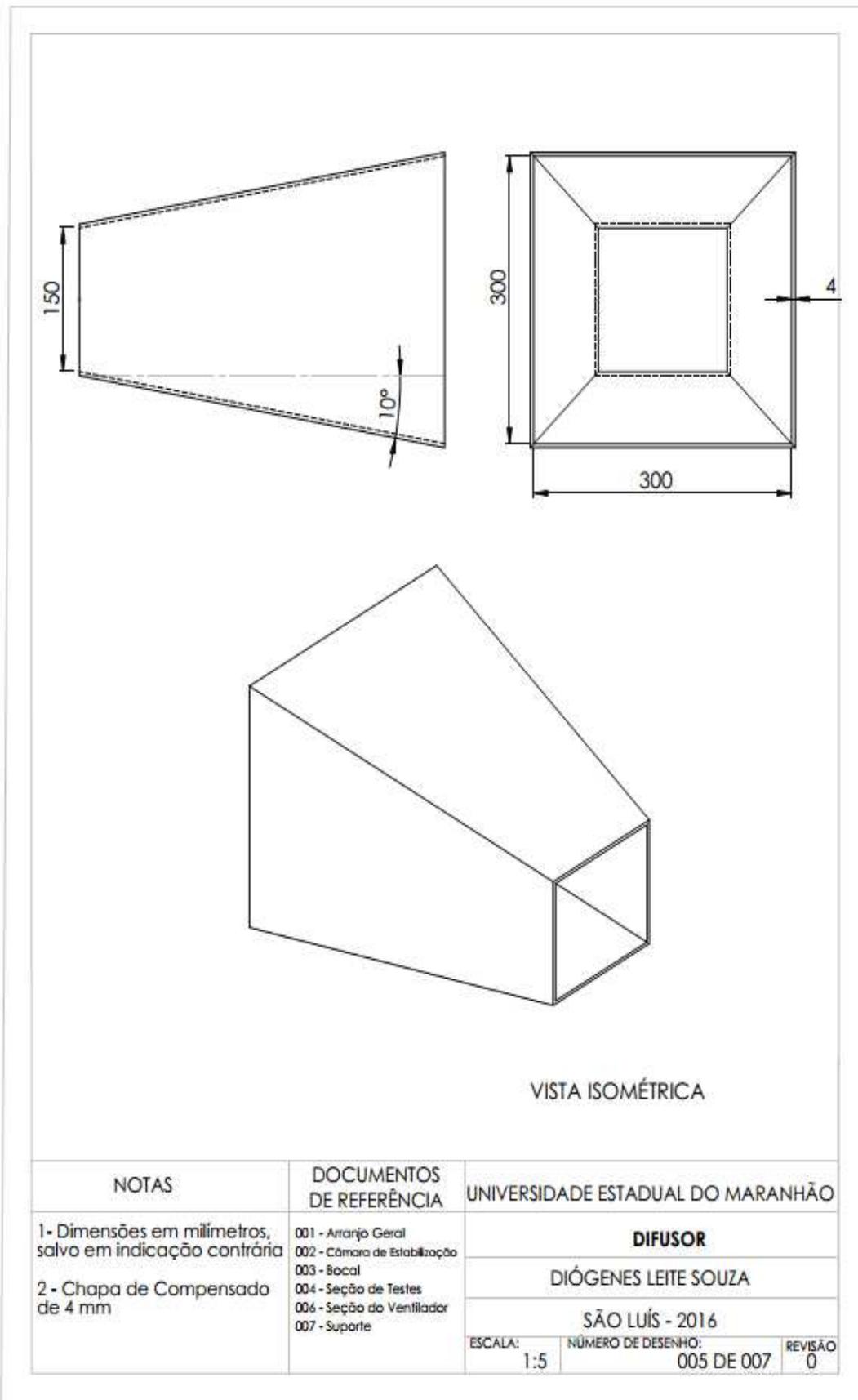
APÊNDICE E – Planta do bocal



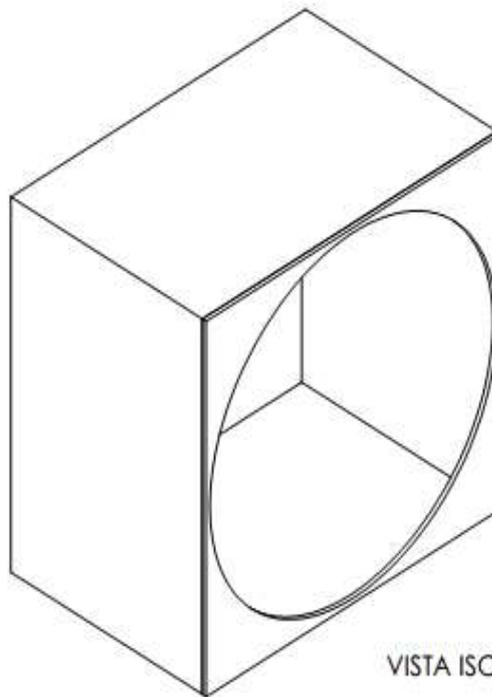
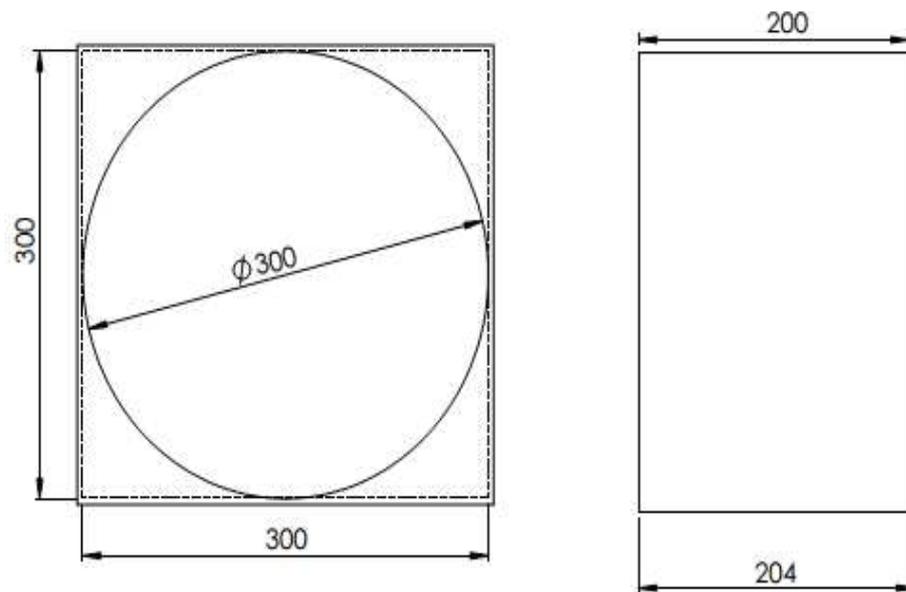
APÊNDICE F – Planta da seção de testes



APÊNDICE G – Planta do difusor



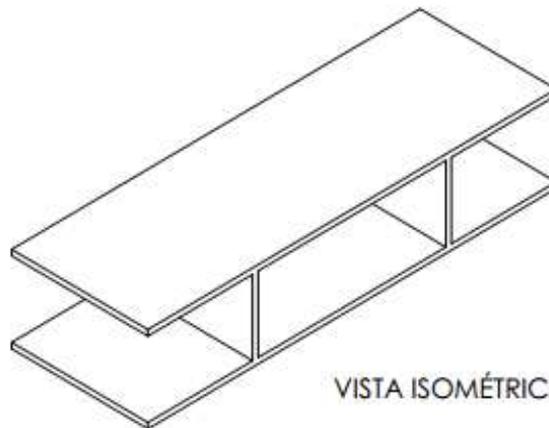
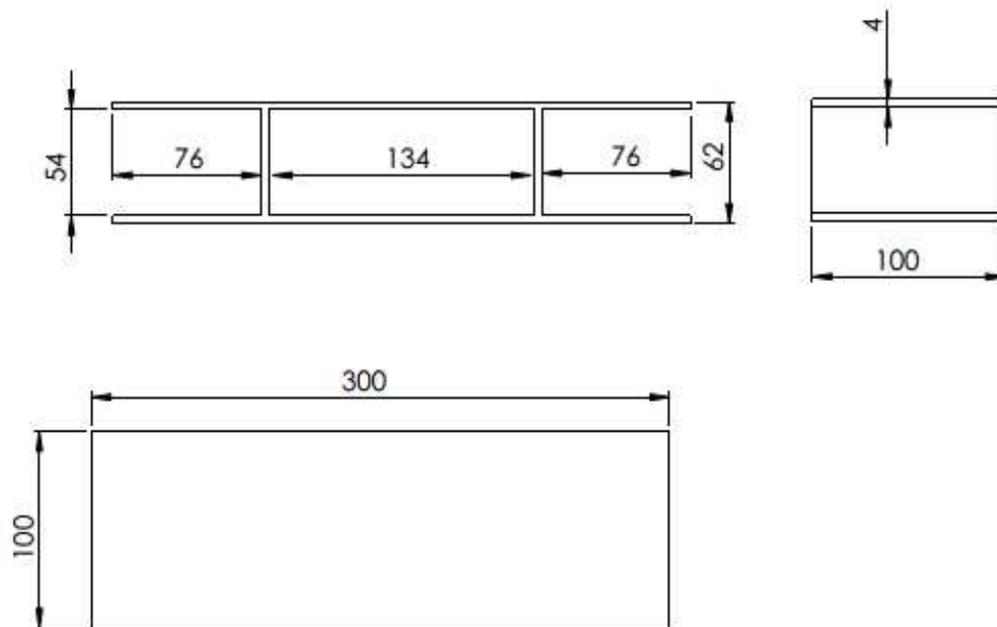
APÊNDICE H – Planta da seção do ventilador



VISTA ISOMÉTRICA

NOTAS	DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
1- Dimensões em milímetros, salvo em indicação contrária	001 - Arranjo Geral 002 - Câmara de Estabilização 003 - Boca 004 - Seção de Testes 005 - Difusor 007 - Suporte	SEÇÃO DO VENTILADOR
2 - Chapa de Compensado de 4 mm		DIÓGENES LEITE SOUZA
		SÃO LUÍS - 2016
		ESCALA: 1:4 NÚMERO DE DESENHO: 006 DE 007 REVISÃO 0

APÊNDICE I – Planta o suporte



VISTA ISOMÉTRICA

NOTAS	DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
1 - Dimensões em milímetros, salvo em indicação contrária 2 - Chapa de Compensado de 4 mm	001 - Arranjo Geral 002 - Câmara de Estabilização 003 - Bocaal 004 - Seção de Testes 005 - Difusor 006 - Seção do Ventilador	SUPORTE
		DIÓGENES LEITE SOUZA
		SÃO LUÍS - 2016
		ESCALA: 1:3 NÚMERO DE DESENHO: 007 DE 007 REVISÃO 0