

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA - DEMEC
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FELIPE KHAUAN MANFRIN

**BANCADA PARA VISUALIZAÇÃO DE LINHAS DE EMISSÃO EM
ESCOAMENTOS DE AR UTILIZANDO FUMAÇA**

**CURITIBA
2019**

FELIPE KHAUAN MANFRIN

**BANCADA PARA VISUALIZAÇÃO DE LINHAS DE EMISSÃO EM
ESCOAMENTOS DE AR UTILIZANDO FUMAÇA**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Paraná
como requisito parcial à obtenção do título
de bacharel em Engenharia Mecânica.**

Orientador: Prof. Dr. Stephan Hennings Och.

CURITIBA

2019



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No dia 10 de dezembro de 2019, na sala NSK, Prédio do Laboratório e Máquinas Hidráulicas do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, foi instalada pelo Professor Stephan Hennings Och, a Banca Examinadora para o Trabalho de Conclusão de Curso do curso de graduação em Engenharia Mecânica da UFPR. A banca examinadora foi constituída pelo professor doutor **Christian Scapulatempo Strobel**, pelo professor doutor **Diogo Berta Pitz**, ambos pertencentes ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR, e pelo professor doutor **Stephan Hennings Och**, orientador da monografia a quem coube à presidência dos trabalhos. Às 14h30 horas, a banca iniciou seus trabalhos, convidando o estudante **Felipe Khauan Manfrin**, GRR20123880, a fazer a apresentação da monografia intitulada "**Bancada para Visualização de Linhas de Emissão em Escoamento de Ar utilizando Fumaça**". Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Após, a banca reuniu-se para a apreciação do desempenho da estudante, e chegaram às conclusões mostradas doravante.

Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel – DEMEC
Prof. Dr. Diogo Berta Pitz – DEMEC
Prof. Dr. Stephan Hennings Och (Orientador) – DEMEC

Nota: 9,0
Nota: 8,0
Nota: 8,0

Média Final: 8,0


Situação Final: Aprovado

A ata segue assinada por todos os membros da Banca Examinadora, com ciência do aluno.


Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel


Prof. Dr. Diogo Berta Pitz


Prof. Dr. Stephan Hennings Och
Orientador


Felipe Khauan Manfrin
Estudante

Curitiba, 10 de dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares pelo apoio durante todo o curso, aos professores do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, em especial ao meu professor orientador, e a Anabelle, minha noiva, pelo apoio durante o curso e o desenvolver deste trabalho.

RESUMO

Intuitivamente o homem já há muito tempo percebia a diferença de dificuldade em se movimentar objetos que estavam dentro d'água e fora dela. Porém, somente no início do século XX com a apresentação do conceito de camada limite do físico alemão Ludwig Prandtl foi possível ter um modelo que explicasse essas diferenças e como elas ocorriam. Até hoje esse é um conceito dominante na área de aerodinâmica. Dando continuidade à teoria e testando-a de maneira prática, hoje, existem os túneis de vento que são importantes ferramentas para se testar produtos com geometrias variadas e sujeitas a diferentes tipos de escoamentos. Além disso, como forma de enxergar as linhas de emissão desses escoamentos, criou-se a ideia de adicionar fumaça ao túnel de vento. Por isso estudar maneiras de produzir fumaça e induzir escoamentos em túneis de vento continua sendo de grande importância para a engenharia. O objetivo deste trabalho é montar uma bancada para visualização de linhas de emissão em escoamentos de ar utilizando fumaça. Essa tarefa foi realizada utilizando uma metodologia de pesquisa exploratória. Além disso, foram realizados testes com uma máquina de fumaça comercial e calculados os números de Reynolds dos resultados que foram visualmente satisfatórios. Por fim conclui-se que a glicerina é um material bom para geração de fumaça e que é mais vantajoso, em relação à montagem, comprar uma máquina de fumaça comercial e modificá-la para visualizar escoamentos em um túnel de vento.

Palavras-chaves: Túnel de vento, Gerador de Fumaça, Linha de Emissão, Escoamento de Ar.

ABSTRACT

Humankind knew intuitively and for a long time that there were differences between moving objects in and outside the water. However, only in the beginning of the twentieth century, with the disclosure of the concept of boundary layer presented by the German physicist Ludwig Prandtl, that it was possible to explain the reasons of the difficulties related to moving an object in and outside of the water. Up to now the concept of boundary layer is a dominant one which is highly used in the scope of aerodynamics. In order to provide practical continuity to the abovementioned theory there are, nowadays, wind tunnels which can be seen as instruments for testing products with varied geometry and subject to different flow types. In addition, as a way of identifying the streamlines, the idea of adding smoke into these wind tunnels was introduced. In this sense, the studies related to ways of creating smoke and inducing outflow in wind tunnels are of great relevance for engineering. In this regard, the present dissertation aims to assemble a bench in order to observe streamlines in air flows utilizing smoke. This duty was accomplished using an exploratory research methodology. Besides that, tests were conducted with a commercial fog machine in order to calculate Reynold's number of some of the obtained results. Finally, it was possible to conclude that glycerin is a reasonable material for smoke generation and that it is more advantageous to buy a commercial smoke machine than produce one to visualize streaklines in air flows in a wind tunnel.

Keywords: Wind Tunnel, Smoke Generator, Stream Lines, Air Flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - TÚNEL DE VENTO DE ÁREA DE TESTES ABERTA FEITO POR GUSTAV EIFFEL.....	15
FIGURA 2 - TÚNEL DE VENTO DE CIRCUITO FECHADO.....	15
FIGURA 3 - TÚNEL DE FUMAÇA CONSTRUÍDO POR E. J. MAREY.....	19
FIGURA 4 - FOTOGRAFIA OBTIDA POR MEIO DO TÚNEL DE FUMAÇA DE E. J. MAREY.....	19
FIGURA 5 - TÚNEL DE FUMAÇA DA UNIVERSIDADE DE NOTRE DAME CONSTRUÍDO POR F. N. M BROWN EM 1958.....	21
FIGURA 6 - MISTURA DE LEITE, ÁLCOOL E CORANTE.....	23
FIGURA 7 - ÓLEO SINTÉTICO RHODORSIL DILUÍDO.	23
FIGURA 8 - MIÇANGAS DE POLIESTIRENO ADICIONADOS AO FLUXO.....	23
FIGURA 9 - BOLHAS DE HIDROGÊNIO ADICIONADAS AO FLUXO.....	23
FIGURA 10 - ESQUEMA PARA GERAÇÃO DE FUMAÇA UTILIZANDO O COMPOSTO QUÍMICO $TiCl_4$	25
FIGURA 11 - REGIÃO DE INFLUÊNCIA DA CAMADA LIMITE AO LONGO DE UMA PLACA PLANA.	26
FIGURA 12 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE À MEDIDA EM QUE SE APROXIMA DE UMA PLACA PLANA.....	27
FIGURA 13 - IDENTIFICAÇÃO DO PONTO DE SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE EM UM AEROFÓLIO E PERFIL DE VELOCIDADES DENTRO DELA.	28
FIGURA 14 - SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE EM EXPERIMENTO PRÁTICO EM UM AEROFÓLIO.	28
FIGURA 15 - SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE EM ESCOAMENTO LAMINAR SOBRE PAREDE CURVA.	29
FIGURA 16 - COMPARATIVO ENTRE PONTOS DE SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE LAMINAR E TURBULENTO UTILIZANDO $TiCl_4$	29
FIGURA 17 - PERFIL DE VELOCIDADES EM CAMADAS LIMITES LAMINAR E TURBULENTO.	30
FIGURA 18 - ESCOAMENTO LAMINAR SOBRE AEROFÓLIO UTILIZANDO LÍQUIDO COLORIDO ARTIFICIALMENTE.	32
FIGURA 19 - ILUSTRAÇÃO DA EQUAÇÃO DE UMA LINHA DE CORRENTE EM DUAS DIMENSÕES.	33
FIGURA 20 - PRIMEIRO TÚNEL DE FUMAÇA MONTADO.....	37
FIGURA 21 - CONJUNTO PARA GERAÇÃO DE FUMAÇA UTILIZANDO INCENSO E CIGARRO MONTADO.	37
FIGURA 22 - PRIMEIRA E SEGUNDA VENTILADORAS UTILIZADAS PARA INDUZIR O ESCOAMENTO NOS TÚNEIS.....	38
FIGURA 23 - SEGUNDO TÚNEL DE FUMAÇA FEITO DE PAPELÃO E CANUDOS PARA SERVIR DE DIRECIONAMENTO DO FLUXO.	39
FIGURA 24 - SEGUNDO DIRECIONADOR DO FLUXO UTILIZADO.	39
FIGURA 25 - MÁQUINA GERADORA DE FUMAÇA A PARTIR DA MISTURA DE ÁGUA E GLICERINA UTILIZADA.	40
FIGURA 26 - TERCEIRO TÚNEL DE FUMAÇA DE ISOPOR PINTADO DE PRETO E COM OS LEDS MONTADOS.....	41
FIGURA 27 - VENTILADOR DE MESA UTILIZADO PARA INDUZIR OS ESCOAMENTOS.....	41
FIGURA 28 - REDUTOR DE TURBULÊNCIA UTILIZADO.....	41
FIGURA 29 - SEGUNDO REDUTOR DE TURBULÊNCIA UTILIZADO.....	42
FIGURA 30 - TERCEIRO TÚNEL MONTADO COM O VENTILADOR DE MESA E MÁQUINA DE FUMAÇA.....	42
FIGURA 31 - PROBLEMA DO VÓRTICE FORMADO NO CANTO DA JANELA DO TÚNEL DE FUMAÇA.....	43
FIGURA 32 - NOVO CONJUNTO MONTADO COM ASPIRADOR DE PÓ E COTOVELO DE ENCANAMENTO COMO CORPO DE PROVA.	43
FIGURA 33 - PRIMEIRO RESULTADO OBTIDO COM O CONJUNTO.....	45

FIGURA 34 - SEGUNDO RESULTADO OBTIDO COM O CONJUNTO.....	45
FIGURA 35 - COLMEIA DE CANUDOS UTILIZADA PARA DIMINUIR A TURBULÊNCIA DO ESCOAMENTO.	45
FIGURA 36 - NOVO CONJUNTO MONTADO COM VENTILADOR DE MESA, ACUMULADOR DE FUMAÇA, VÁLVULA DE ÁGUA FRIA E MÁQUINA GERADORA DE FUMAÇA.....	46
FIGURA 37 - RESULTADOS DO NOVO CONJUNTO MONTADO COM A VÁLVULA DE ÁGUA.....	46
FIGURA 38 - PROBLEMA DE EXPANSÃO DA FUMAÇA NA VÁLVULA DE ÁGUA.....	47
FIGURA 39 - VÁLVULA DE GÁS E NIPPLE.	47
FIGURA 40 - RESULTADOS DO CONJUNTO COM O NIPPLE.	48
FIGURA 41 - COMPARATIVO ENTRE OS TRÊS ÚLTIMOS CONJUNTOS MONTADOS.	48
FIGURA 42 – FORMAÇÃO DE VÓRTICES ACIMA E ABAIXO DO CILINDRO.....	49
FIGURA 43 – RESULTADO DO CORPO DE PROVA CILÍNDRICO QUADRO A QUADRO.....	50
FIGURA 44 – CILINDRO TESTADO COM ESCALA QUADRADA NO FUNDO DO TÚNEL.	52
FIGURA 45 – COMPARATIVO ENTRE RESULTADO TEÓRICO E PRÁTICO.	53
FIGURA 46 - INTERIOR DA MÁQUINA DE FUMAÇA UTILIZADA.....	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS ESCOAMENTOS EM CILINDROS.....	35
TABELA 2 - VARIAÇÃO PRESSÃO, VELOCIDADE E REYNOLDS.....	51
TABELA 3 – VALORES DE VELOCIDADE APROXIMADOS COM UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE DE FRAMES DAS LINHAS DE EMISSÃO.	52
TABELA 4 - CUSTO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES ADQUIRIDOS.....	54
TABELA 5 - CUSTO APROXIMADO DOS COMPONENTES DA MÁQUINA DE FUMAÇA COMERCIAL.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviação	Nome	Unidade
D	Comprimento característico	m
P	Pressão	Pa
Re	Número de Reynolds	Adimensional
V	Velocidade	m / s

Símbolos Grega

Abreviação	Nome	Unidade
Δ	Variação	-
μ	Viscosidade dinâmica	Pa * s
ν	Viscosidade cinemática do fluido	m / s
ρ	Massa específica	Kg / m ³

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivos Específicos.....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 Túneis de Vento	14
3.2 Tipos de Túneis de Vento	14
3.3 Características de túneis de vento com retorno aberto	16
3.4 Características de túneis de vento com retorno fechado.....	16
4. VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS	17
4.1 Desenvolvimento de túneis de vento na história.....	17
4.2 Visualização do escoamento.....	18
4.3 Desenvolvimento do túnel de fumaça atual.....	20
4.4 Técnicas de visualização de escoamento	21
4.5 Visualização de escoamentos líquidos	22
4.6 Visualização de escoamentos gasosos	23
4.7 Materiais comumente utilizados como combustíveis.....	24
4.8 Técnicas para geração de fumaça em túneis de vento	25
5 Fundamentos de Mecânica dos fluidos.....	26
5.1 Camada Limite	26
5.2 Espessura da Camada-Limite	30
5.3 Tipos de escoamentos.....	30
5.4 Número de Reynolds	31
5.5 Visualização de Escoamentos.....	32
Tabela 1 – Características dos escoamentos em cilindros.	35
6. TESTES PRÁTICOS REALIZADOS NO TRABALHO	36
6.1 Preparação do gerador de fumaça	36

7. REGISTROS DOS RESULTADOS PRINCIPAIS.....	44
7.1 Resultados.....	44
7.2 Número de Reynolds obtido	50
<i>Tabela 2 - Variação pressão, velocidade e Reynolds.....</i>	<i>51</i>
7.3 CUSTOS PRINCIPAIS DO TRABALHO	53
<i>Tabela 4 - Custo dos principais componentes adquiridos.</i>	<i>54</i>
7.4 custos para montagem de um gerador de fumaça.....	54
<i>Tabela 5 - Custo aproximado dos componentes da máquina de fumaça comercial.</i>	<i>56</i>
8. CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

Segundo Bianchini e Gomes (2007, p.1-3) as características de diversas disciplinas e a tranquilidade dos alunos em estar na posição de sujeito passivo recebedor de conteúdos teóricos em sala de aula muitas vezes inviabilizam a demonstração de conceitos físicos em experimentos práticos. Ainda segundo os autores, visualizações desses conceitos são importantes para que o aluno adquira a habilidade de associar elementos vistos em aula com situações práticas, o que pode vir a ser uma capacidade importante em sua carreira como engenheiro. Outros benefícios das aulas práticas são citados por Bianchini e Gomes (2007, p.2) que mostram que aulas com alunos atuando de maneira conjunta com um objetivo em comum podem ser importantes para o compartilhamento de conhecimento. Outro ponto ressaltado pelos autores é com relação aos benefícios trazidos por ferramentas que permitem que os discentes enriqueçam seus conhecimentos por meio de outras analogias, que não sejam somente as essencialmente mentais e teóricas.

Nesse sentido para que os alunos possam associar elementos vistos em salas de aula com a prática, a Universidade Federal do Paraná já possui um túnel de vento. No entanto, nele não é possível visualizar a maneira como os escoamentos ocorrem, pois ele foi desenvolvido apenas para medição de dados quantitativos. Sendo assim, esse trabalho trará informações sobre elementos utilizados comumente como marcadores de escoamento. Serão recolhidos dados sobre marcadores utilizados em fluidos líquidos e gasosos, sendo que será dada maior ênfase para os gasosos, pois é o que futuramente poderá ser utilizado no atual túnel de vento da Universidade.

Não há como se escrever sobre métodos de geração de fumaça em túneis de vento sem começar pelos próprios túneis de vento. Dessa maneira, este trabalho começa tratando sobre os tipos de túneis de vento e como eles foram desenvolvidos durante a história. O primeiro túnel de vento foi desenvolvido por volta de 1870 na Inglaterra e possuía velocidade de escoamento de 18 metros por segundo em uma área de 260 milímetros quadrados. Quase 20 anos depois, 1893, Ludwig Mach utilizou um túnel de vento também de dimensões reduzidas para tentar visualizar escoamentos. Os materiais utilizados por ele para enxergar o escoamento foram: fios de seda, fumaça de cigarro e partículas de ferro. Alguns anos depois, 1899,

outra grande contribuição em termos de registros foi dada pelo francês E. J. Marey. Esse cientista utilizou um túnel diferente dos dois anteriores, com o escoamento ocorrendo na vertical. Além disso, utilizou outros materiais para gerar fumaça e arranjos que melhoraram os retratos. Por já ter um conhecimento acurado em relação a registros fotográficos, Marey foi capaz de obter excelentes resultados. Considerando a qualidade das fotografias, seus registros demoraram quase 40 anos para serem superados. Outra contribuição significativa foi dada pelo americano F. N. Brown em 1935. Esse engenheiro começou estudos em túneis de fumaça de três dimensões e a forma como escolheu para desenvolver e acoplar a fumaça em túneis de vento é similar a utilizada até os dias de hoje.

Os materiais mais utilizados para visualização de escoamentos em líquidos apresentados neste trabalho são: leite, álcool, óleo sintético Rhodorsil, corantes, tetracloreto de carbono, permanganato de potássio, bolas de vidro, pó acrílico e partículas de alumínio. Sendo que sempre se busca incluir um elemento que seja capaz de participar do escoamento sem modificá-lo. Ou seja, tendo uma massa específica similar a do fluxo em que está incluído. Além desses materiais para fluxos líquidos, citam-se as bolhas de hidrogênio que também apresentam excelentes resultados. Com relação aos materiais mais utilizados em escoamentos gasosos, destacam-se: cigarro, óleos de hidrocarbonetos, glicerina, tetracloreto de titânio e parafina.

Com relação aos conceitos físicos envolvidos no escoamento, esse trabalho trará um breve resumo sobre fundamentos de mecânica dos fluidos. Em específico será tratado sobre a camada limite a qual foi introduzida por Ludwig Prandtl em um artigo de 1904 período em que vários cientistas começaram a desenvolver túneis de vento ou introduziram a fumaça para visualizar escoamentos. Também serão apresentadas as diferenças entre os regimes de escoamentos, laminar, de transição e turbulento. Por fim, será apresentada uma maneira de prever em qual desses regimes o escoamento ocorrerá com base nas propriedades físicas dele. Isso é alcançado com o número adimensional criado pelo físico e matemático Sir George Stokes em 1851, mas nomeado em 1908 pelo físico alemão Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld como número de Reynolds em homenagem ao inglês Osborne Reynolds que o usou extensivamente.

Por fim, este trabalho apresentará de forma detalhada as tentativas de geração de fumaça e de um túnel de vento improvisado para visualização dos

escoamentos. Ao total foram realizadas sete montagens diferentes, cada uma delas alterando algum elemento que poderia estar gerando problemas na visualização da fumaça. Para o último conjunto também será apresentado o número de Reynolds correspondente. Também será mostrado qual o elemento utilizado para geração de fumaça e como o equipamento que a gera realiza essa tarefa. Considerando esse funcionamento será determinado se é possível reproduzir esse funcionamento comprando cada um dos componentes e se é financeiramente vantajoso fazer isso.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é montar uma bancada para visualização de linhas de emissão em escoamentos utilizando fumaça e avaliar a viabilidade econômica para realizar isso. Essa tarefa será realizada utilizando uma metodologia de pesquisa exploratória. Com isso espera-se ter base para dimensionar um túnel de vento de bancada apenas para testes e escolher os materiais adequados para a geração de fumaça. Com relação à geração da fumaça, espera-se saber escolher, adequadamente, entre comprar um gerador já pronto, eventualmente o modificando, ou montar um, sabendo-se quais as principais vantagens e desvantagens de cada opção. Além disso, ao final do trabalho espera-se estar com um gerador de fumaça que funcione de maneira satisfatória em túneis de vento para que ele seja usado em aulas práticas de Mecânica dos Fluidos.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Selecionar livros e artigos acadêmicos relacionados ao tema;
2. Pesquisar sites que tratem sobre túneis de fumaça, geradores de fumaça e informações sobre como montá-los;
3. Relacionar as vantagens e desvantagens dos principais materiais utilizados na geração de fumaça;
4. Pesquisar por geradores de fumaça prontos disponíveis no mercado para compra;
5. Testar de maneira prática materiais utilizados por outros trabalhos para geração de fumaça;
6. Calcular o número de Reynolds de escoamentos registrados;
7. Comparar o custo envolvido na compra de um gerador de fumaça pronto e a confecção;
8. Escolher entre montar o gerador de fumaça ou comprá-lo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TÚNEIS DE VENTO

A importância dos túneis de vento na engenharia se deve ao fato de ele possibilitar o estudo de, segundo N. A. Ahmed (2017, p.4-5), três principais características:

1. O fluxo sobre objetos de interesse;
2. As forças agindo nesses objetos;
3. A interação dos objetos com o fluxo.

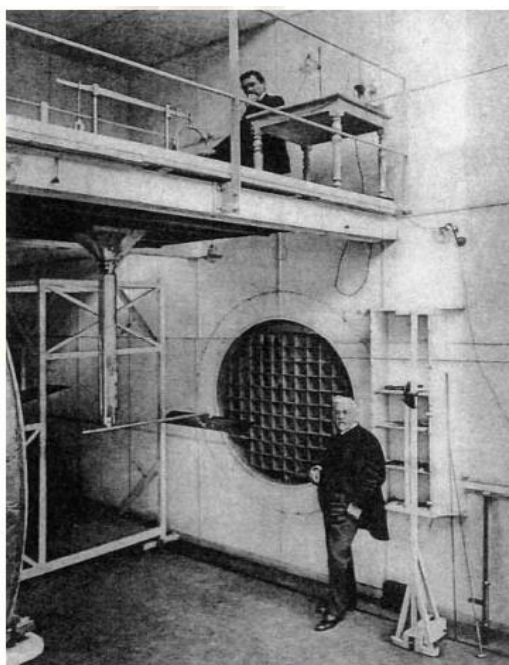
Ainda de acordo com o autor, desde o começo da sua produção, os túneis permitiram a verificação de conceitos da aerodinâmica e o design de aviões. Após alguns anos, esses estudos se espalharam para outras áreas, tais como, indústria automotiva, arquitetura, meio ambiente e educação. Tudo isso tornou os túneis de vento de baixa velocidade de escoamento importantes. As características principais dos túneis, em termos de performance, são velocidade máxima atingível pelo escoamento, uniformidade do fluxo e nível de turbulência. Na aviação esses parâmetros são controlados de maneira rigorosa, o que aumenta os custos. Além disso, testes em motores de aviões e estudos sobre os ruídos gerados são feitos em túneis de vento. Na indústria automobilística um dos parâmetros mais importantes é a força de arrasto.

3.2 TIPOS DE TÚNEIS DE VENTO

Segundo J. B. Barlow, W. H. Rae, Jr, A. Pope (1999, p.25), existem dois tipos principais de túneis de vento: de circuito aberto e de circuito fechado. Nos túneis de circuito aberto o fluido escoando segue um caminho predominantemente reto até o ponto onde estão sendo realizados os testes, após esse ponto, geralmente, existe uma região responsável por concentrar o fluido e outro mecanismo que induz o fluxo para fora do túnel, como, por exemplo, um exaustor. Nesse modelo o mesmo fluxo

de ar não irá retornar para o início do túnel e é dispensado. Além disso, a área de testes pode ser de dois tipos, novamente, aberta e fechada. Nesses casos, aberta significa que é possível ver a área de testes mesmo à distância e de diferentes pontos, como no Tipo Eiffel da Figura 1, enquanto fechado significa que a área de testes é predominantemente fechada. Os túneis de circuito fechado funcionam de maneira similar ao aberto, porém possuem uma estrutura capaz de fazer com o que o mesmo fluido ao sair do túnel retorne ao seu início, gerando uma re-circulação. Um exemplo desse tipo pode ser visto na Figura 2.

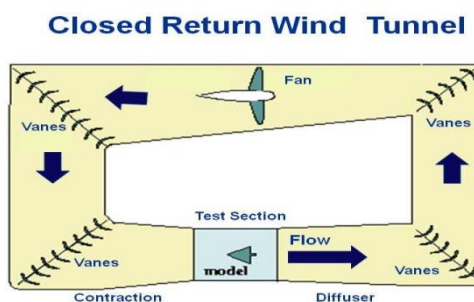
Figura 1 - Túnel de vento de área de testes aberta feito por Gustav Eiffel.



Eiffel and a coworker at the wind tunnel of Champs-de-Mars, [4]

Fonte: Gustave Eiffel and the Wind: A Pioneer in Experimental Aerodynamics (2012, p.7)

Figura 2 - Túnel de vento de circuito fechado.



Fonte: Site ¹NASA.

¹ Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuncret.html>. Acesso em set. 2019.

3.3 CARACTERÍSTICAS DE TÚNEIS DE VENTO COM RETORNO ABERTO

Vantagens:

1. Custo de construção reduzido
2. Mais adequado quando o propósito é utilizar fumaça para visualização de fluxos, pois não há muitos problemas com relação a limpeza, já que a fumaça é retirada para a atmosfera após passar pela área de teste.

Desvantagens:

1. Pode precisar “preparar” o fluxo que está entrando muitas vezes, modificando sua temperatura, por exemplo.
2. Utiliza mais energia para induzir o fluxo.
3. Em túneis de grandes dimensões, os ruídos podem ser excessivos.

3.4 CARACTERÍSTICAS DE TÚNEIS DE VENTO COM RETORNO FECHADO

Vantagens:

1. Qualidade do fluido que circula mais bem controlada, pois independe das condições ambientais de fora do circuito.
2. Menor energia para manter o fluxo.
3. Ruídos menores em comparação com os abertos.

Desvantagens:

1. Custo maior, pois envolve uma estrutura maior.
2. Pode-se sujar o túnel dependendo do tipo de fumaça utilizada.
3. Dependendo das características do fluido e do tempo de circulação, pode ser necessário resfriar o fluido.

4. VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS

Após alguns anos do desenvolvimento dos primeiros túneis de vento, surgiu a ideia de adicionar algo que fosse capaz de permitir a visualização dos escoamentos. O objetivo disso era entender como funcionavam os escoamentos de fluidos da vida real e ter base para dimensionar elementos de engenharia de forma mais precisa. Dessa maneira, o próximo capítulo visa indicar como esse desenvolvimento ocorreu de maneira cronológica e quais os principais resultados obtidos pelos estudiosos da época.

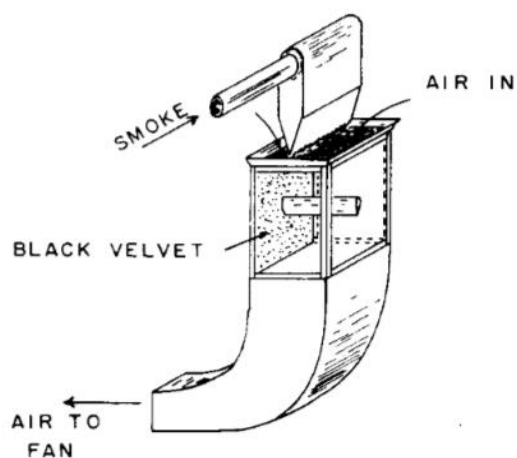
4.1 DESENVOLVIMENTO DE TÚNEIS DE VENTO NA HISTÓRIA

Segundo Thomas J. Mueller (1980, p.1), o desenvolvimento de túneis de fumaça esteve diretamente relacionado aos túneis de vento. Mas, a visualização de fluxos com o uso de fumaça foi utilizada até mesmo antes do surgimento dos primeiros túneis. Isso possivelmente aconteceu de maneira natural pelo homem desde os primeiros momentos em que se deparou com o fogo, porém também foi a visualização do escoamento com fumaça que permitiu aos irmãos franceses Montgolfier (Joseph e Jacques) chegar ao desenvolvimento do primeiro balão bem sucedido. Eles notaram que sacos de papéis flutuavam ao serem colocados acima de partículas não queimadas e cinzas oriundas da queima. Por volta do ano de 1783, eles conseguiram fazer um voo público com o seu invento. Quase cem anos depois disso, aproximadamente no ano de 1871, F. H. Wenham da Grã Bretanha inventou o primeiro túnel de vento. Esse primeiro túnel tinha uma área de seção transversal de 260 milímetros quadrados e ar, direcionado por um ventilador, com velocidades de até 18 metros por segundo. Já o primeiro túnel de grandes dimensões surgiu no ano de 1901 na “Catholic University in Washington D.C” e foi construído por A.F. Zahm. Suas dimensões eram: 15,24 metros de comprimento e seção quadrada de 1,83 metros quadrados e velocidade de escoamento de até 11 metros por segundo.

4.2 VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

De acordo com Thomas J. Mueller (1980, p.32-34) e Christoph Hoffmann (2012), um dos primeiros relatos de visualização de fluxo se deu com o físico e químico Dr. Ludwig Mach de Viena em 1893. O túnel de vento utilizado por ele tinha uma seção transversal de 180 milímetros por 250 milímetros e produzia um escoamento da ordem de 10 metros por segundo. Além disso, ele utilizava uma malha de metal para diminuir a turbulência do fluxo que entrava no túnel. Esse túnel tinha área de testes do tipo fechada e contava com um vidro em um dos lados para permitir a visualização do fluxo e os outros lados eram pretos. O fluxo foi fotografado e observado com o uso de fios de seda, fumaça de cigarro e partículas incandescentes de ferro. Na França, seis anos depois, o cientista E. J. Marey, que já era reconhecido por seu trabalho fotografando objetos em movimento, decidiu fotografar o ar em movimento. Esse cientista construiu um túnel de vento vertical conforme Figura 3. A área de seção escolhida foi de 200 milímetros por 300 milímetros. Tanto a frente como dois dos lados da área de testes foram feitos com vidro, sendo que o fundo foi feito com veludo preto. O ar era tragado por meio de uma pequena ventoinha de sucção após passar por uma gaze de seda responsável por diminuir a turbulência do fluxo, auxiliando nessa tarefa existiam pequenos tubos após a gaze. A fumaça nesse caso era obtida de pedaços de madeira. Os resultados obtidos foram muito bons para a época e podem ser vistos na Figura 4. Segundo Thomas J. Mueller (1980, p.32), após esse período com o advento da primeira guerra mundial houve pouca divulgação sobre os túneis de fumaça. Ainda assim, até por volta de 1940 as fotografias obtidas por outros cientistas não tinham a mesma qualidade das obtidas por Marey em 1899. Nesse período de quase 40 anos a maioria dos túneis eram para observação de escoamentos em duas dimensões e a fumaça gerada a partir de diversos materiais, sendo que os mais populares eram madeira podre e tetracloreto de titânio.

Figura 3 - Túnel de fumaça construído por E. J. Marey.



Fonte: Site Graphicine.²

Figura 4 - Fotografia obtida por meio do túnel de fumaça de E. J. Marey.



Fonte: Site Graphicine.³

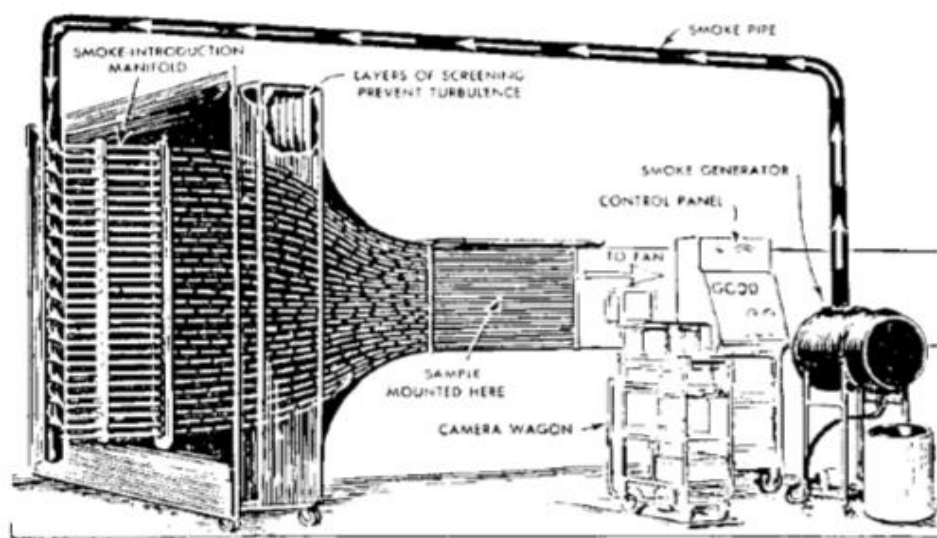
² Disponível em: <https://www.graphicine.com/bodies-against-time-etienne-jules-marey/>. Acesso em set. 2019.

³ Disponível em: <https://www.graphicine.com/bodies-against-time-etienne-jules-marey/>. Acesso em set. 2019.

4.3 DESENVOLVIMENTO DO TÚNEL DE FUMAÇA ATUAL

Por volta de 1935 F. N. Brown começou estudos em túneis de fumaça de três dimensões na Universidade de Notre Dame do Estado de Indiana nos Estados Unidos da América, de acordo com Thomas J. Mueller (1980, p.33). Brown também acreditava que os túneis de fumaça poderiam ser utilizados para resultados quantitativos, além dos já conhecidos qualitativos. Esse estudo foi importante, pois resultou no formato usado por grande parte dos túneis atuais e permitiu as primeiras fotografias da fumaça perpassando objetos em três dimensões. Além disso, consagrou o nome de Brown como um dos mais importantes no desenvolvimento de técnicas de visualização usando fumaça. Ainda de acordo com Thomas J. Mueller (1980, p.33), em 1958 a Universidade de Notre Dame já possuía o túnel de vento visto na Figura 5 o qual é muito similar aos utilizados atualmente. Com isso, percebeu-se que um dos parâmetros mais importantes nos túneis de fumaça é a baixa turbulência na área de testes. E isso é alcançado usando-se mecanismos capazes de reduzir a turbulência do escoamento seguida por uma redução na área do túnel. Outra maneira de realizar isso é, segundo Wen Jei Yang (2001, p.48), diminuindo a distância percorrida pela fumaça do ponto onde ela passa pelo elemento responsável por diminuir a turbulência do escoamento até a área de testes, pois isso diminui a difusão.

Figura 5 - Túnel de fumaça da Universidade de Notre Dame construído por F. N. M Brown em 1958.



Fonte: Thomas J. Mueller (1980, p.33)

4.4 TÉCNICAS DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO

As técnicas de visualização de escoamentos podem ser classificadas de maneira geral em três diferentes categorias, de acordo com Wolfgang Merzkirch (1987, p.2). A primeira delas compreende todas as técnicas em que um material não pertencente ao fluxo nem ao objeto em teste é adicionado ao fluxo, sendo que comumente se utiliza um gás ou um líquido. Essa técnica deve se utilizar de um material leve o bastante para não influenciar no fluxo de modo que sua velocidade também seja igual a do fluxo em termos de direção e magnitude. Considera-se que essa é uma técnica de visualização indireta, porque o que se observa é o movimento das partículas e não o movimento do fluxo propriamente dito. Embora as partículas tenham um comportamento quase idêntico ao do fluido, existem diferenças. Uma maneira de minimizá-las é utilizando um material adicional que tenha uma densidade próxima a do fluxo. Esses métodos dão bons resultados especialmente em fluxos estacionários, mas em fluxos não estacionários os resultados podem ser muito ruins. Ainda de acordo com Wolfgang Merzkirch (1987, p.3), o segundo grupo principal de técnicas para visualização de fluxos envolve a densidade do fluido em análise. Nessa técnica são utilizados métodos ópticos que são sensíveis a mudanças no índice de refração do fluxo em movimento, que quando tem densidade

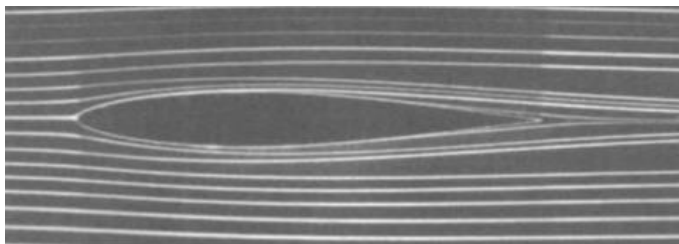
variável, em termos ópticos, é denominado de objeto de fase. Um raio de luz que passa através desse objeto tem sua fase óptica afetada, mas sua intensidade e amplitude permanecem iguais. A terceira categoria é uma espécie de combinação das duas primeiras. O que se adiciona ao escoamento nesse caso é energia, sendo que ela pode ser em termos de calor ou descarga elétrica. Conforme Wolfgang Merzkirch (1987, p.3), o fluido que entra em contato com essa energia fica “marcado” e algumas vezes precisa ser identificado com a técnica adequada de visualização óptica. Quando isso não acontece, o fluido está com uma energia tal que se torna luminoso e pode ser visto diretamente.

4.5 VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS LÍQUIDOS

Os métodos utilizados para visualizar esses escoamentos são diversos e, segundo Wen Jei Yang (2001, p.43), o uso de substâncias em suspensão no escoamento são em muitos casos restritos devido à diferença de densidade e viscosidade existente entre o escoamento e o elemento adicionado. De acordo com esse mesmo autor, os elementos adicionados, em escoamentos de água, mais utilizados para a visualização do escoamento são:

1. Mistura de leite, álcool e corante de maneira que se alcance uma massa específica próxima a da água, gerando resultados como os da Figura 6;
2. Óleo sintético Rhodorsil diluído gerando resultados como os da Figura 7;
3. Corantes fluorescentes;
4. Substâncias como tinta, corante comercial, soluções de tetracloreto de carbono e benzeno e permanganato de potássio;
5. Elementos sólidos, normalmente introduzidos por sondas, tais como, bolas de vidro, pó de acrílico e partículas de alumínio gerando resultados como os da Figura 8;
6. Os gases mais comumente adicionados são bolhas de hidrogênio obtidas por eletrólise gerando resultados como os da Figura 9.

Figura 6 - Mistura de leite, álcool e corante.



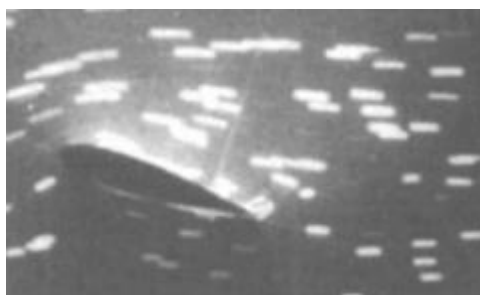
Fonte: Wen Jei Yang (2001, p.44)

Figura 7 - Óleo sintético Rhodorsil diluído.



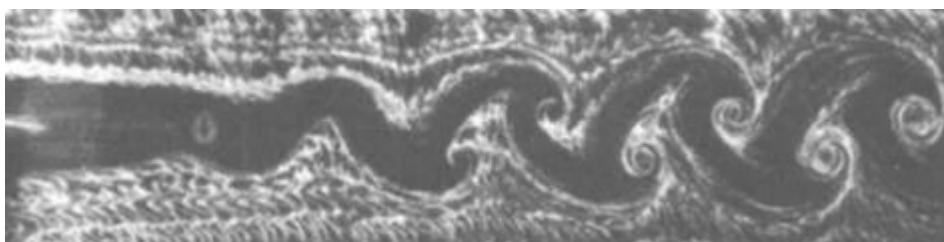
Fonte: Wen Jei Yang (2001, p.44)

Figura 8 - Miçangas de poliestireno adicionados ao fluxo.



Fonte: Wen Jei Yang (2001, p.45)

Figura 9 - Bolhas de hidrogênio adicionadas ao fluxo.



Fonte: Wen Jei Yang (2001, p.45)

4.6 VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS GASOSOS

De acordo com Wen Jei Yang (2001, p.49), a escolha da fumaça, que pode se referir a vários tipos, tais como, névoa, vapores e fumos, deve levar em

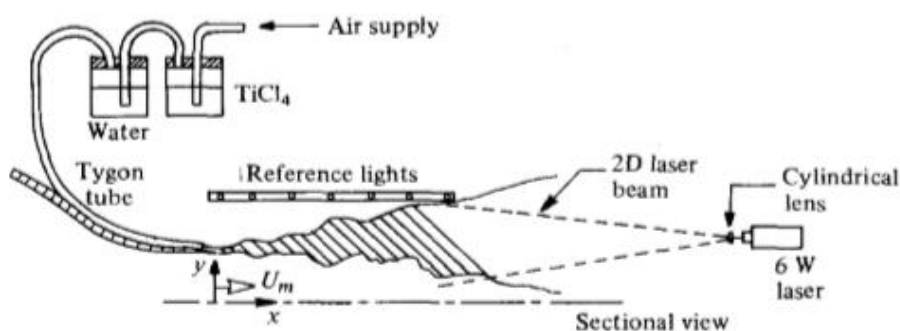
consideração alguns pontos. Ela deve ser facilmente fotografada, a sua passagem pelo túnel de vento e em contato com os objetos em teste deve se dar de tal forma que não haja prejuízo a nenhum deles. Outro ponto que deve ser levado em consideração quando se escolhe a fumaça é que ela deve ser pequena o bastante para não perturbar o escoamento e grande o suficiente para ser capturada em fotografia. Assim como no caso de escoamentos líquidos, existem muitos tipos de materiais utilizados para gerar a fumaça utilizada em túneis de vento. Wen Jei Yang (2001, p.49) cita alguns dos mais usados: tabaco, madeira podre, palha de trigo, o produto de várias reações químicas dos elementos, tais como o tetracloreto de titânio, vapor d'água e vaporização de óleos de hidrocarbonetos. Dentre esses o mesmo autor destaca o querosene como sendo um dos de mais fácil utilização, pois é pouco inflamável, tem bom tamanho de partículas e tem baixa temperatura de vaporização.

4.7 MATERIAIS COMUMENTE UTILIZADOS COMO COMBUSTÍVEIS

Segundo Wolfgang Merzkirch (1987, p.25), a fumaça do cigarro é uma mistura de componentes orgânicos e água e ela é satisfatória quando pequenas quantidades de fumaça são necessárias. O tamanho médio das partículas fica em torno de 0,2 e 0,4 μm , de acordo com Kerker (Kerker et al., 1978). Sendo que se espera que as partículas tenham ao menos 0,15 μm para serem bem fotografadas, conforme Thomas J. Mueller (1980). Segundo Wolfgang Merzkirch (1987, p.25), entre as máquinas prontas para geração de fumaça as mais comuns são as que vaporizam óleos de hidrocarbonetos e dentre eles o mais comum é o querosene pelas características já citadas neste trabalho. Esses geradores consistem de um aquecedor e um mecanismo responsável por misturar o vapor de querosene com o ar. Ainda de acordo com Merzkirch, no caso de sua utilização é importante verificar se a fumaça gerada, antes de chegar ao túnel de vento, está em uma temperatura na qual não prejudique o objeto testado ou outros componentes. Esse é um dos motivos pelos quais, em alguns casos, é necessário resfriar a fumaça antes de utilizá-la. Outro tratamento da fumaça que pode ocorrer é a sua filtragem para retirar partículas grandes que possam estar presentes. De acordo com Wolfgang Merzkirch (1987, p.26) outros materiais comumente utilizados na geração de fumaça são a

mistura de tetracloreto de titânio TiCl_4 com água e a parafina. Pode-se arranjar os equipamentos conforme a Figura 10 quando se opta por utilizar esse último elemento para geração de fumaça. Esse elemento foi procurado para compra em diversos sites online, porém não foi encontrado a não ser por encomenda em sites de empresas de fora de Curitiba. Consultando um grande fornecedor de produtos químicos dessa cidade também foi informado que eles não possuíam o tetracloreto de titânio nem sob encomenda.

Figura 10 - Esquema para geração de fumaça utilizando o composto químico TiCl_4 .



Fonte: A. K. M. F. Hussain e A. R. Clark (2001, p.266)

4.8 TÉCNICAS PARA GERAÇÃO DE FUMAÇA EM TÚNEIS DE VENTO

De acordo com Wolfgang Merzkirch (1987, p.29), para se produzir as linhas de fumaça em túneis de vento, a fumaça deve sair de pequenos pontos. A solução que se utiliza, normalmente, é usar diversos tubos formando o que é chamado de “rake” (rastelo). A fumaça deve estar orientada paralelamente ao fluxo. Nos túneis construídos por F. N. M Brown existia uma característica que é, segundo Merzkirch, essencial para o seu sucesso, a grande diminuição de seção na entrada da fumaça no túnel até o ponto analisado. Isso faz com que a fumaça se estabilize durante a aceleração do fluxo.

Um aparato muito utilizado para se gerar fumaça, segundo Wolfgang Merzkirch (1987, p.29) envolve os chamados “fios de fumaça” (smoke wires). Nessa configuração utiliza-se um tubo metálico fino capaz de suportar temperaturas da

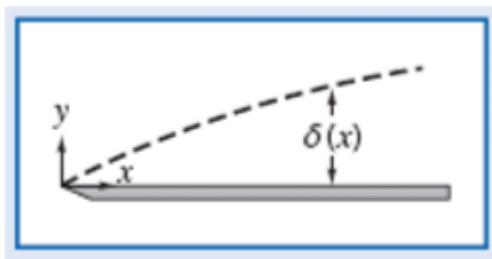
ordem de 100 °C envolto por resistências elétricas que pelo efeito Joule causam o aquecimento e evaporação do fluido que passa internamente ao tubo. A Figura 10 também mostra essa técnica utilizando um tubo de plástico do tipo Tygon que pode resistir a temperaturas dessa mesma ordem. De acordo com Wolfgang Merzkirch (1987, p.29), essa técnica não teve um criador único e foi desenvolvida em períodos próximos por diversos laboratórios na década de 1970 a 1980.

5 FUNDAMENTOS DE MECÂNICA DOS FLUIDOS.

5.1 CAMADA LIMITE

Imaginando-se um escoamento de fluido a uma velocidade qualquer diferente de zero, sabe-se que a medida em que esse escoamento passa por obstáculos, tais como superfícies sólidas e impermeáveis, sua velocidade é reduzida. Na Figura 11 abaixo é possível ver a região de influência formada pelo objeto durante um escoamento de fluido.

Figura 11 - Região de influência da camada limite ao longo de uma placa plana.

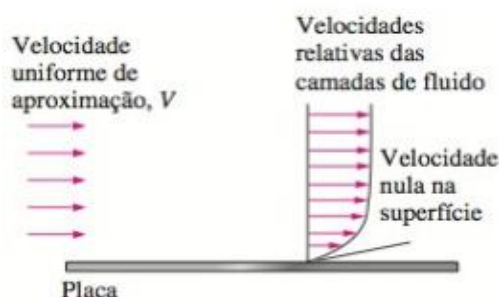


Fonte: (Fox, McDonald, & Pritchard, 2014, p.536)

Essa redução é proporcional à distância em relação à superfície, sendo maior quanto mais próxima do objeto contornado e suficientemente grande no contato direto entre fluxo e superfície para fazer com o que o fluido fique parado nesse ponto. A redução de velocidade ocorre devido ao atrito interno do fluido chamado de viscosidade que é uma propriedade dos fluidos. Esse fenômeno, redução de velocidade à zero na superfície, é conhecido como condição de não-deslizamento. Na Figura 12 é possível ver esse comportamento de maneira qualitativa para o caso

de uma velocidade de fluido inicial diferente de zero e seu comportamento ao escoar sobre uma placa plana. Os vetores ilustrados nessa figura juntos formam o perfil de velocidade desse escoamento. Naturalmente, a medida em que nos afastamos da placa a velocidade é menos influenciada até o ponto onde não existe mais diferença entre a velocidade próxima da superfície e a mais afastada. A região em que existe influência na velocidade pela presença da superfície é chamada de camada limite.

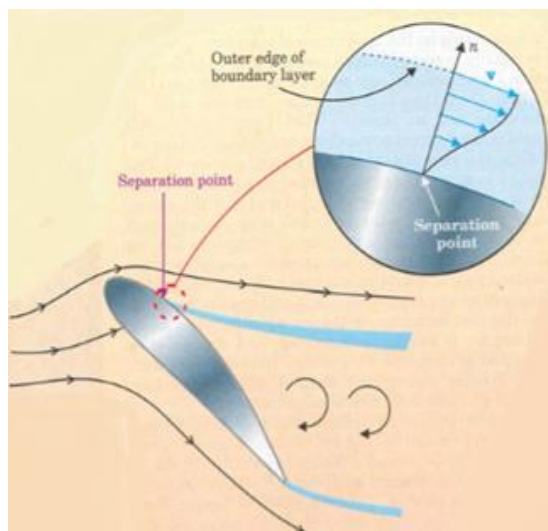
Figura 12 - Variação da velocidade à medida em que se aproxima de uma placa plana.



Fonte: (Çengel & Cimbala, 2007)

Segundo Anderson A. D. Jr. (2005, p.42), embora já se observasse de maneira prática os efeitos causados pela camada limite (arrasto), só no ano de 1904 o físico alemão Ludwig Prandtl (1875-1953) introduziu esse conceito. Prandtl demonstrou que os escoamentos poderiam ser estudados em duas regiões distintas, uma bem próxima do sólido em movimento relativo e outra mais longe. Nesta última região, muito maior, ele notou que os efeitos da viscosidade podem ser desconsiderados. Isso possibilitou que o efeito do fluido sobre a superfície em movimento fosse estudado de maneira teórica. Além disso, ainda segundo Anderson A. D. Jr. (2005, p.43), Prandtl também foi responsável por descobrir a separação que existe do fluido na camada-limite e como, por causa disso, esse fluido se move para a camada “livre de interferência” e a modifica completamente. Esse comportamento pode ser observado de maneira didática no esquema da Figura 13.

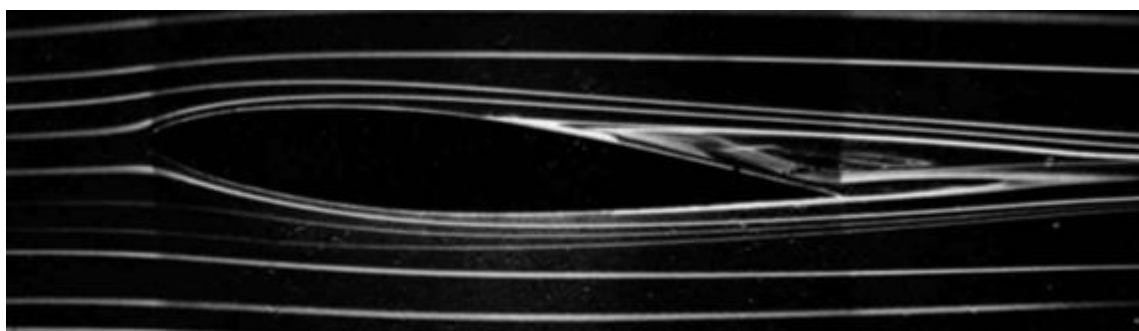
Figura 13 - Identificação do ponto de separação da camada limite em um aerofólio e perfil de velocidades dentro dela.



Fonte: (Jr. Anderson, 2005, p.44)

Uma imagem da separação de camada limite em um escoamento de água com filamentos coloridos artificialmente pode ser vista na Figura 14 apresentada abaixo:

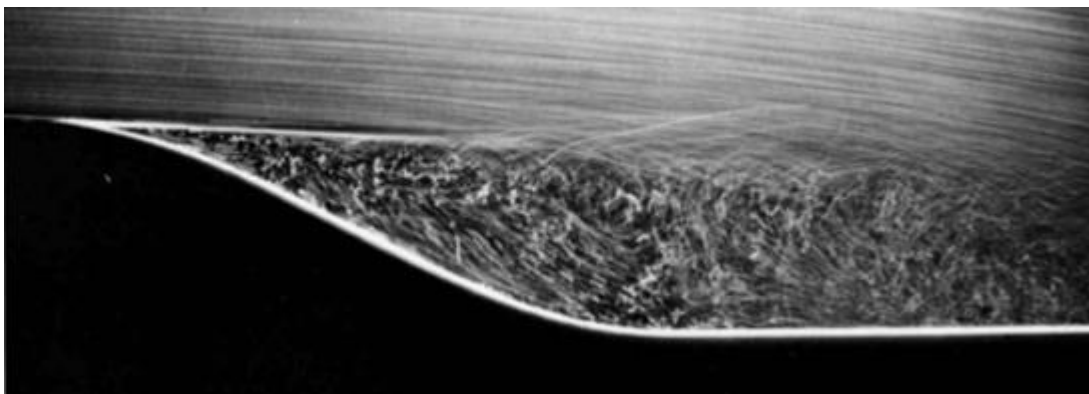
Figura 14 - Separação da camada limite em experimento prático em um aerofólio.



Fonte: (Dyke, 1988, p.25)

Na Figura 15 é possível ver a separação da camada limite em um escoamento do tipo laminar sobre uma parede curva e com número de Reynolds de 20.000. Segundo Dyke (1988, p.27), devido às condições do experimento a camada limite é vista próxima à superfície na coloração preta até o momento em que ocorre sua separação e, posteriormente, a formação de bolhas marcadas pela cor branca.

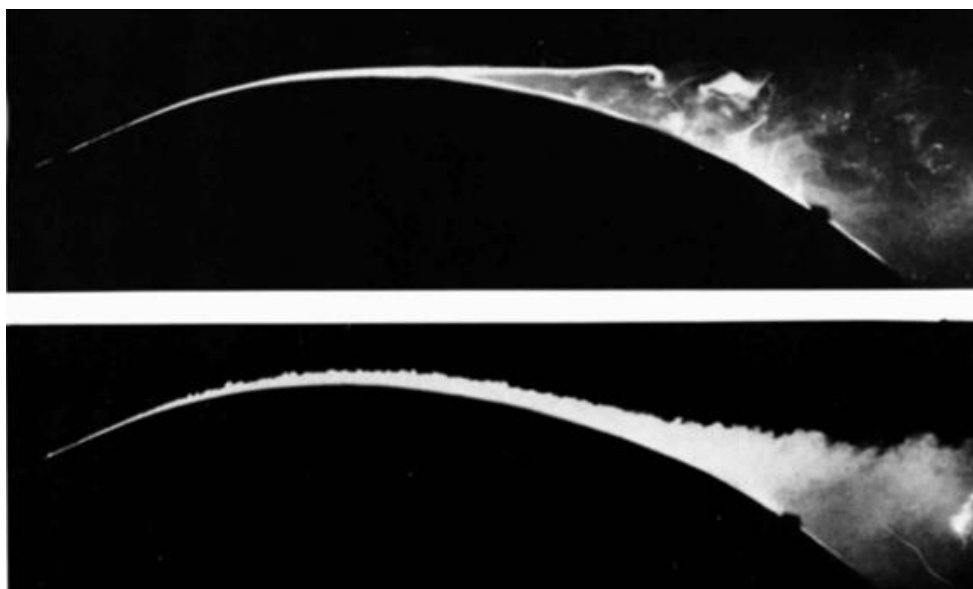
Figura 15 - Separação da camada limite em escoamento laminar sobre parede curva.



Fonte: (Dyke, 1988, p.27)

De acordo com Dyke (1988, p.91), na Figura 16 é possível ver um comparativo entre dois escoamentos reais em um túnel de vento com partículas de tetracloreto de titânio. Na primeira imagem ocorre um escoamento laminar e na segunda um turbulento. Percebe-se a diferença entre os pontos de separação da Camada Limite, no primeiro caso ela se separa antes.

Figura 16 - Comparativo entre pontos de separação da camada limite laminar e turbulenta utilizando $TiCl_4$.



Fonte: (Dyke, 1988, p.91)

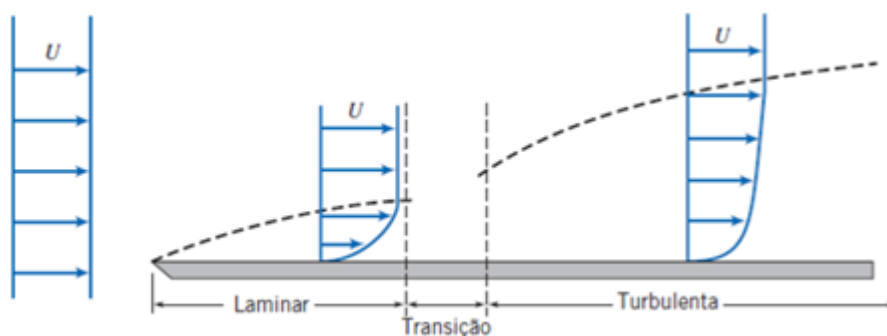
5.2 ESPESSURA DA CAMADA-LIMITE

Segundo Fox, Mcdonald e Pritchard (2014, p.523-525), o escoamento só é influenciado em uma dada região chamada de camada-limite. Por esse motivo, para se saber qual a espessura da região de influência, é possível fazer uma análise da velocidade do escoamento em diferentes alturas em relação à superfície e adota-se como espessura da camada-limite a altura na qual a velocidade de aproximação 'u' é igual a 0,99 da velocidade não afetada 'U', $u = 0,99U$.

5.3 TIPOS DE ESCOAMENTOS

Conforme Fox, Mcdonald e Pritchard (2014, p.66), existem dois tipos de escoamentos, eles são denominados laminar e turbulento. Como os próprios nomes sugerem, o primeiro ocorre de maneira mais ordenada de maneira semelhante a lâminas, enquanto o segundo ocorre sem um padrão fixo. Existe uma terceira categoria de escoamento chamada de em transição que une características ora de escoamentos laminares e ora de escoamentos turbulentos. Na prática a maioria dos escoamentos ocorre de maneira turbulenta e os laminares são mais comuns para fluidos com viscosidade elevada e que escoam em tubos ou passagens estreitas. A Figura 17 exemplifica esses tipos de escoamentos.

Figura 17 - Perfil de velocidades em camadas limites laminar e turbulenta.



Fonte: (Fox, Mcdonald, & Pritchard, 2014, p.523)

Com o objetivo de se prever o tipo de escoamento, o engenheiro britânico Osborn Reynolds (1842-1912), nos anos de 1880, realizou experimentos e concluiu que o tipo de escoamento em tubos poderia ser previsto com base em valores de propriedades como, por exemplo, viscosidade. A equação que relacionava todos esses parâmetros foi igualada a um número adimensional conhecido como número de Reynolds (Re) e serve de base até os dias de hoje para se calcular o regime de escoamento dos fluidos.

5.4 NÚMERO DE REYNOLDS

Após diversos testes, Reynolds percebeu que o regime de escoamento depende primordialmente da relação entre as Forças de Inércia e as Forças Viscosas do fluido e relacionou esses dois parâmetros:

$$Re = \frac{\text{Forças de Inercia}}{\text{Forças Viscosas}} = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu}$$

Sendo:

V = Velocidade (m/s).

D = Comprimento característico da geometria (m).

μ = Viscosidade dinâmica (N.s/m²)

$\nu = \mu/\rho$; Viscosidade cinemática do fluido (m²/s).

Números de Reynolds grandes demonstram forças inerciais elevadas em relação às viscosas o que significa que as forças viscosas, que promovem atrito, não são capazes de evitar flutuações aleatórias e rápidas do fluido. Ocorrendo o contrário, com forças inerciais pequenas em relação a viscosas, estas são capazes de conter esse movimento. No primeiro caso, o escoamento é mais próximo do turbulento e no segundo laminar. O ponto crítico no qual ocorre a transição de um tipo de escoamento para outro é chamado de número de Reynolds crítico (Re_{cr}). Esse valor crítico difere também para diferentes tipos de geometria. De maneira geral, para tubos circulares os números são aproximadamente:

$Re \lesssim 2300$ - Escoamento laminar.

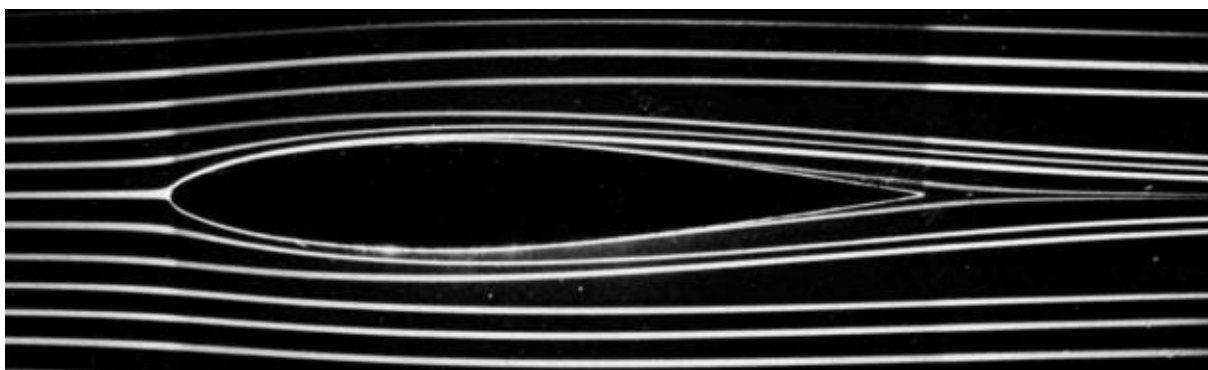
$2300 \lesssim Re \lesssim 4000$ - Escoamento de transição.

$Re \gtrsim 4000$ - Escoamento turbulento.

Outros fatores importantes que afetam a transição de camada-limite: gradiente de pressão, rugosidade superficial, transferência de calor, forças de campo e as perturbações da corrente livre. Segundo Fox, McDonald e Pritchard (2014, p.523), na Figura 17 também é possível ver o perfil de velocidades no escoamento laminar, de transição e turbulento.

Quando não se trata de tubulações, os números de Reynolds que governam o comportamento dos escoamentos também mudam. Geralmente, para escoamentos incompressíveis e com baixos gradientes de pressão e transferência de calor os números de Reynolds podem chegar próximos à 500.000 e ainda identificarem escoamentos laminares. Na Figura 18, segundo Dyke (1988, p.19), é possível ver um escoamento real do tipo laminar, número de Reynolds de 7.000, em um aerofólio.

Figura 18 - Escoamento laminar sobre aerofólio utilizando líquido colorido artificialmente.



Fonte: (Dyke, 1988, p.19)

5.5 VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS

A observação de escoamentos pode trazer várias informações qualitativas fundamentais e saber diferenciar os padrões visualizados é importante para caracterizar corretamente cada um dos fenômenos estudados. Nesse sentido a

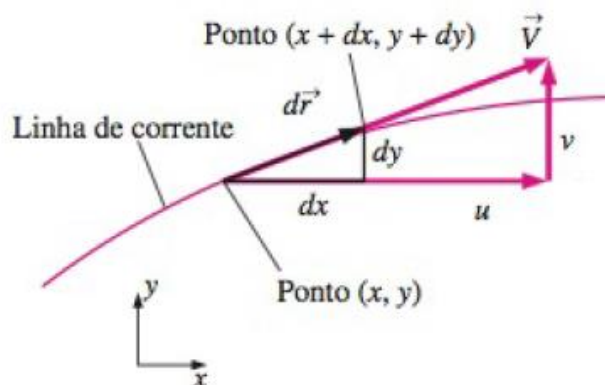
próxima seção trará informações sobre as principais linhas de escoamentos, as chamadas linhas de corrente, linhas de trajetória e linhas de emissão.

5.5.1 Linhas de Corrente

De acordo com Çengel, Y. A. e Cimbala, J. M. (2007, p.110-111), as linhas de corrente mostram a direção instantânea do movimento analisado ao longo do campo de escoamento. Matematicamente essas linhas seguem a equação abaixo, sendo que “ dr ” é o comprimento do vetor “ \vec{dr} ” indicado na Figura 19 e “ V ” é a velocidade escalar.

$$\frac{dr}{V} = \frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w}$$

Figura 19 - Ilustração da equação de uma linha de corrente em duas dimensões.



Fonte: (Çengel & Cimbala, 2007)

5.5.2 Linhas de Trajetória

Ainda de acordo com Çengel, Y. A. e Cimbala, J. M. (2007, p.112), as Linhas de Trajetória são formadas unindo-se os pontos percorridos por uma única partícula do escoamento. Com base nos pontos por onde essa partícula passou, sabe-se qual a sua respectiva linha de trajetória.

5.5.3 Linhas de Emissão

Os resultados pretendidos neste trabalho trazem as Linhas de Emissão utilizando fumaça. Segundo Çengel, Y. A. e Cimbala, J. M. (2007, p.113), as Linhas de Emissão mostram diversas partículas escoando ao mesmo tempo que, por definição, perfazem uma linha de emissão. De acordo com Fox, McDonald e Pritchard (2014, p.55), as linhas de emissão são observados quando se é adicionado algum elemento capaz de permitir a visualização de um dado escoamento e analisa-se seu comportamento ao passar por uma certa região específica.








5.6 Escoamento sob Cilindro Circular

Conforme Çengel, Y. A. e Cimbala, J. M. (2007, p.510), o número de Reynolds crítico em relação à camada limite de cilindros circulares é de aproximadamente 200.000. Nesse sentido, números menores ou iguais a esse descrevem camadas limites laminares e maiores turbulentos. A Tabela 1 descreve as características visuais dos escoamentos em torno de cilindros circulares de acordo com o número de Reynolds. Essa tabela foi retirada do livro de K. Gersten e H. Schlichting (2000, p.22), mas foi adaptada pelo autor deste trabalho.

$Re \lesssim 200.000$ - Escoamento laminar.

$Re \gtrsim 200.000$ - Escoamento turbulento.

Tabela 1 – Características dos escoamentos em cilindros.

Número de Reynolds	Regime de Escoamento	Formato do Escoamento	Característica do Escoamento
Próximos de zero	Creeping Flow		Regime Permanente, Sem Esteira
$3-4 < Re < 30-40$	Vortex pairs in wake		Regime Permanente, Separação Simétrica
$30-40 < Re < 80-90$	Onset of Karman Vortex Street		Laminar, Esteira Instável
$80-90 < Re < 150-300$	Pure Karman Vortex Street		Esteiras de Vortex de Kármán
$150-300 < Re < 100.000-130.000$	Subcritical Regime		Laminar, Instabilidade nas Esteiras
$100.000-130.000 < Re < 35 \cdot 10^6$	Critical Regime		Separação Laminar, Recolamento Turbulento, Separação Turbulenta, Esteira Turbulenta
$35 \cdot 10^6 < Re$	Supercritical Regime		Separação Turbulenta

Fonte: K. Gersten e H. Schlichting (2000, p.22 - Modificado)

6. TESTES PRÁTICOS REALIZADOS NO TRABALHO

De posse do conteúdo teórico envolvendo túneis de vento e de fumaça, foi possível iniciar o desenvolvimento da geração de fumaça para visualizar as linhas de emissão. Essa seção demonstrará quais os materiais testados para a geração de fumaça, os túneis de vento de bancada utilizados para realizar os testes de escoamento e as dificuldades de cada montagem.

6.1 PREPARAÇÃO DO GERADOR DE FUMAÇA

Inicialmente foram concebidas duas caixas para servir de túnel para o escoamento da fumaça. A primeira delas mostrada na Figura 20 teve como problemas o fato de possuir poucos canudos para direcionar a fumaça, perda de carga devido às aberturas do túnel e a própria fumaça utilizada que não era gerada de maneira suficiente. A Figura 21 mostra o dispositivo utilizado para a produção de fumaça. Na Figura 21 é mostrada a garrafa que por ser feita de metal possibilitou queimar incenso e cigarro no seu interior sem danos. Nela foi aumentado um furo pré-existente por onde foi introduzido uma pequena mangueira conectada a um compressor de ar de aquário que também aparece montado ao lado da garrafa. Além desses materiais, também foram utilizados dois ventiladores axiais de computador para direcionar o escoamento para dentro do canudo e ao final do túnel induzindo a saída da fumaça. Ambas ventoinhas podem ser vistas na Figuras 22, a primeira delas foi utilizada inicialmente, contudo não era forte o suficiente e foi logo substituída pela segunda que embora mais forte, também não foi capaz de induzir o escoamento de maneira adequada.

Figura 20 - Primeiro túnel de fumaça montado.



Fonte: (Autor, 2019)

Figura 21 - Conjunto para geração de fumaça utilizando incenso e cigarro montado.



Fonte: (Autor, 2019)

Figura 22 - Primeira e segunda ventoinhas utilizadas para induzir o escoamento nos túneis.



Fonte: (Autor, 2019)

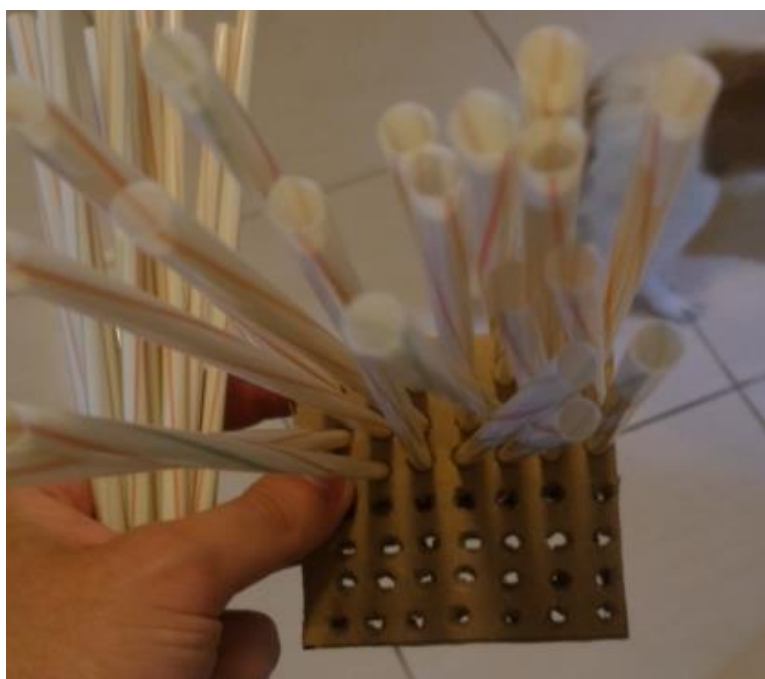
Com o objetivo de confirmar o problema da não geração de fumaça em quantidade adequada, foi concebida uma nova caixa para servir de túnel de fumaça. Esse segundo túnel pode ser visto na Figura 23. Nesse caso foram utilizados mais canudos para servir de direcionamento da fumaça e o isolamento da caixa como um todo foi melhorado. A Figura 24 mostra o conjunto (papelão e canudos) utilizado para direcionar o fluxo com os canudos, mas além dele também foram utilizados canudos apenas unidos por um elástico como pode ser visto na Figura 23 à direita. No furo superior direito que aparece na Figura 23 à esquerda foi introduzida a mangueira que estava conectada à garrafa de café onde estava sendo gerada a fumaça. Com esse último conjunto os resultados continuaram não sendo satisfatórios, tendo sido notado que a fumaça realmente não era gerada em quantidade suficiente para a visualização adequada. Os materiais utilizados nesse caso para geração de fumaça foram incenso e cigarro.

Figura 23 – Segundo túnel de fumaça feito de papelão e canudos para servir de direcionamento do fluxo.



Fonte: (Autor, 2019)

Figura 24 - Segundo direcionador do fluxo utilizado.



Fonte: (Autor, 2019)

Após confirmar o problema da baixa quantidade de fumaça gerada, decidiu-se utilizar um gerador pronto e específico para essa tarefa. Não foi necessário efetuar a compra dele, pois ele foi emprestado para a realização dos testes. Esse gerador pode ser visto na Figura 25. E consiste basicamente de:

1. Reservatório de fluido para aquecimento e geração de fumaça;
2. Bomba para puxar esse fluido;
3. Válvula para controlar o fluxo;
4. Câmara de aquecimento.

O fabricante do líquido de fumaça não mostra na embalagem muitas informações sobre o líquido, mas em pesquisas online é possível constatar que se trata de uma mistura de dois componentes principais: água e glicerina.

Figura 25 - Máquina geradora de fumaça a partir da mistura de água e glicerina utilizada.



Fonte: (Autor, 2019)

Devido à demora de alguns dias para se ter acesso a máquina de fumaça, foi possível gerar um novo túnel que fosse capaz de eliminar os problemas de perda de carga e tivesse um acabamento melhor. Com isso chegou-se ao túnel da Figura 26 que é constituído de isopor colado com cola própria para esse material e tem área de seção de 80 milímetros quadrados. Nele já está instalada a fita LED e feita a pintura em coloração preta para melhorar a visualização da fumaça. Assim que a máquina de fumaça ficou disponível foram efetuados novos testes, porém a fumaça não saía do túnel o que nos levou a substituir as ventoinhas utilizadas, Figura 22, pelo ventilador de mesa da Figura 27. Com esse novo conjunto de materiais foram feitos novos testes utilizando os direcionadores mostradas nas Figuras 28 e 29. Todos esses novos materiais unidos e prontos para utilização podem ser vistos na Figura 30. A janela de visualização do fluxo foi coberta com fita transparente que se mostrou inadequada, pois gerava reflexos que dificultavam a visualização da fumaça. Além disso, por ela cobrir a janela pela parte de fora do túnel foram gerados vórtices de fumaça que ficavam parados durante muito tempo até saírem do túnel. Essa condição pode ser vista na Figura 31. O primeiro vídeo referenciado nas bibliografias ao final deste trabalho mostra de maneira prática como esse conjunto se comportou.

Figura 26 – Terceiro túnel de fumaça de isopor pintado de preto e com os LEDS montados.



Fonte: (Autor, 2019)

Figura 27 - Ventilador de mesa utilizado para induzir os escoamentos.



Fonte: (Autor, 2019)

Figura 28 – Redutor de turbulência utilizado.



Fonte: (Autor, 2019)

Figura 29 - Segundo redutor de turbulência utilizado.



Fonte: (Autor, 2019)

Figura 30 - Terceiro túnel montado com o ventilador de mesa e máquina de fumaça.



Fonte: (Autor, 2019)

Figura 31 – Problema do vórtice formado no canto da janela do túnel de fumaça.



Fonte: (Autor, 2019)

Devido ao problema na janela, buscou-se um material transparente para tampá-la por dentro. Nesse caso foi adquirido um pedaço de vidro pelo valor de R\$ 5,00. Para confirmar se o ventilador utilizado seria capaz ou não de induzir um escoamento, ele foi substituído por um aspirador de pó convencional. Dessa maneira chegou-se ao esquema da Figura 32. Com esse conjunto os resultados já passaram a ser mais próximos dos esperados, já foi possível, por exemplo, enxergar esteiras atrás dos modelos testados, conforme pode ser visto nas Figuras 33 e 34. No entanto, notou-se que o ventilador funcionava de maneira satisfatória, porém não estava havendo escoamento suficiente de ar pelo direcionador de fumaça. Por isso, foi feita a substituição dos redutores de turbulência das Figura 28 e 29 por outro em formato de colmeia que permite maior entrada de ar. Os vídeos dois e três referenciados ao final desse trabalho mostram os resultados alcançados em velocidade normal e em câmera lenta.

Figura 32 - Novo conjunto montado com aspirador de pó e cotovelo de encanamento como corpo de prova.



Fonte: (Autor, 2019)

7. REGISTROS DOS RESULTADOS PRINCIPAIS

Com esse arranjo preparado, deu-se início aos registros dos resultados obtidos. Essa seção apresentará os resultados oriundos dessa última montagem com o aspirador de pó e de outras feitas com algumas alterações, ao final nas bibliografias também estão os endereços para visualização de alguns vídeos obtidos em cada etapa. Além disso, essa seção apresentará o cálculo do número de Reynolds para a disposição que apresentou os melhores resultados práticos em um objeto cilíndrico. Por fim serão apresentados os custos principais envolvidos na montagem desse trabalho, uma tabela com os custos aproximados dos componentes de um gerador de fumaça comercial e um comparativo entre esses últimos valores e os valores para se adquirir a máquina já pronta.

7.1 RESULTADOS

As Figuras 33 e 34 mostram os resultados do conjunto da Figura 32. Embora os resultados já tenham melhorado, ainda foi preciso intensificar a redução de turbulência da fumaça. Para isso notou-se que outros túneis de fumaça como, por exemplo, o produzido pelo centro de pesquisa da Nasa Glenn (NASA GLENN RESEARCH CENTER - "LITTLE SMOKIE" WIND TUNNEL PROJECT) possuem uma colmeia na entrada do fluxo que possibilita não apenas a entrada de fumaça, mas também uma quantidade maior de ar o que estava sendo inviabilizado pelos redutores de turbulência das Figuras 28 e 29. Nesse sentido, decidiu-se realizar a confecção de uma colmeia com canudos de refrigerante de comprimento aproximado de 10 cm e unidos com cola quente, esse conjunto pode ser visto na Figura 35. Além disso, a máquina de fumaça gera uma grande quantidade inicial de fumaça no início da liberação, sendo que para se enxergar os efeitos desejados foi necessário esperar que boa parte dela se dissipasse. Para superar esse problema foi pensando em utilizar um acumulador de fumaça que ficaria em uma posição intermediária em relação à máquina de fumaça e o túnel de vento. Esse acumulador foi confeccionado com uma garrafa de água tradicional de cinco litros a qual recebeu um furo. Nesse furo foi conectada a válvula de água, com ele foi possível superar o problema da geração grande de fumaça inicial e movimentar a saída de fumaça

para verificar seu comportamento ao escoar em diferentes alturas. O novo modelo posicionado pode ser visto na Figura 36. Os resultados obtidos mais uma vez foram melhores dos que já vinham sendo conseguidos e podem ser observados na Figura 37. Os vídeos quatro e cinco referenciados ao final deste trabalho apresentam os resultados alcançados. Sendo que o primeiro deles é em velocidade normal e o segundo em câmera lenta.

Figura 33 - Primeiro resultado obtido com o conjunto.



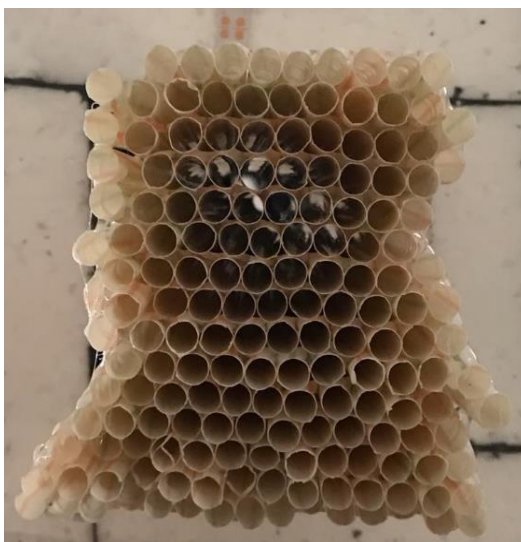
Fonte: (Autor, 2019)

Figura 34 - Segundo resultado obtido com o conjunto.



Fonte: (Autor, 2019)

Figura 35 - Colmeia de canudos utilizada para diminuir a turbulência do escoamento.



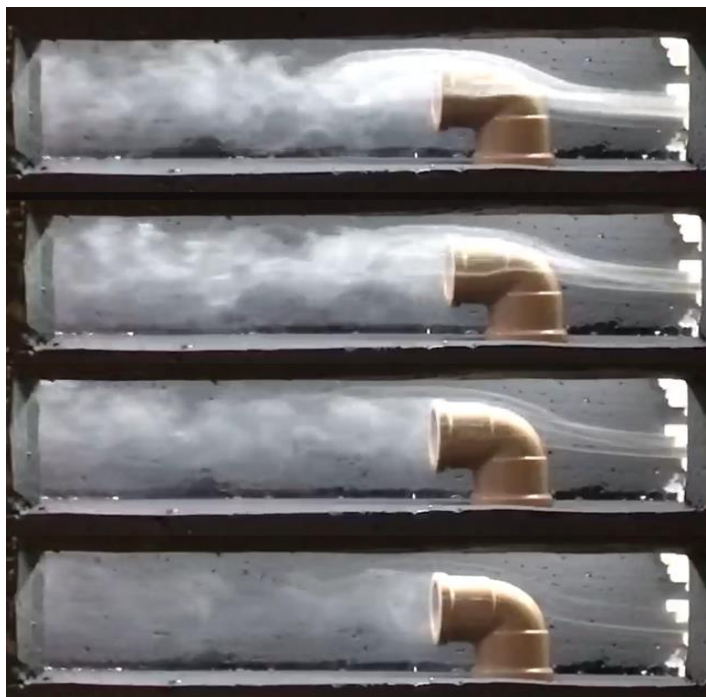
Fonte: (Autor, 2019)

Figura 36 - Novo conjunto montado com ventilador de mesa, acumulador de fumaça, válvula de água fria e máquina geradora de fumaça.



Fonte: (Autor, 2019)

Figura 37 - Resultados do novo conjunto montado com a válvula de água.

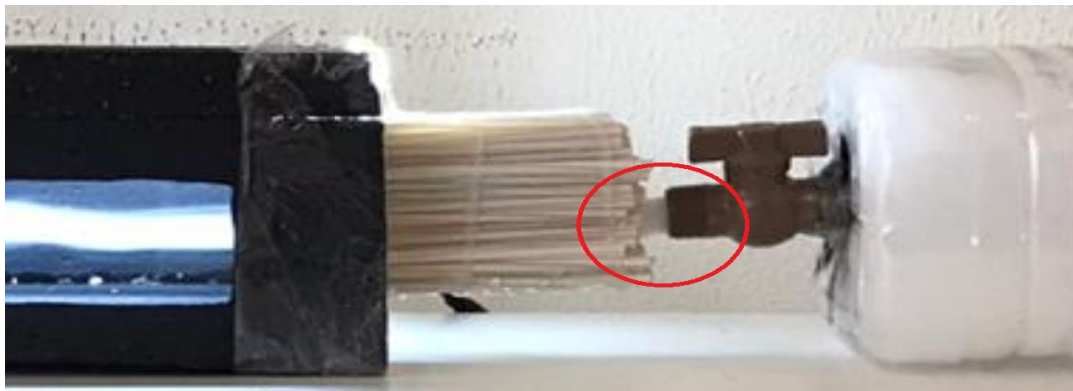


Fonte: (Autor, 2019)

Durante a realização dos testes foi notado que embora a válvula de água permita a regulação de passagem da fumaça, ela não faz com que a fumaça saia em um tamanho pequeno o bastante. Essa válvula diminui a seção no seu interior, contudo no final dela a fumaça já se expandiu novamente e sai com o diâmetro do final da válvula, conforme Figura 38. Por esse motivo decidimos testar outra válvula específica para gases. Essa válvula pode ser vista na Figura 39, no entanto com ela não foi possível realizar os testes, pois a pressão no interior do acumulador de

fumaça não era grande o suficiente para que a fumaça atravessasse a válvula e saísse do acumulador de fumaça. Por isso, utilizamos apenas um dos nipples para fazer a regulação. Nesse caso o diâmetro de passagem para a fumaça já seria bem menor do que o que havíamos testado anteriormente.

Figura 38 - Problema de expansão da fumaça na válvula de água.



Fonte: (Autor, 2019)

Figura 39 - Válvula de gás e nipple.

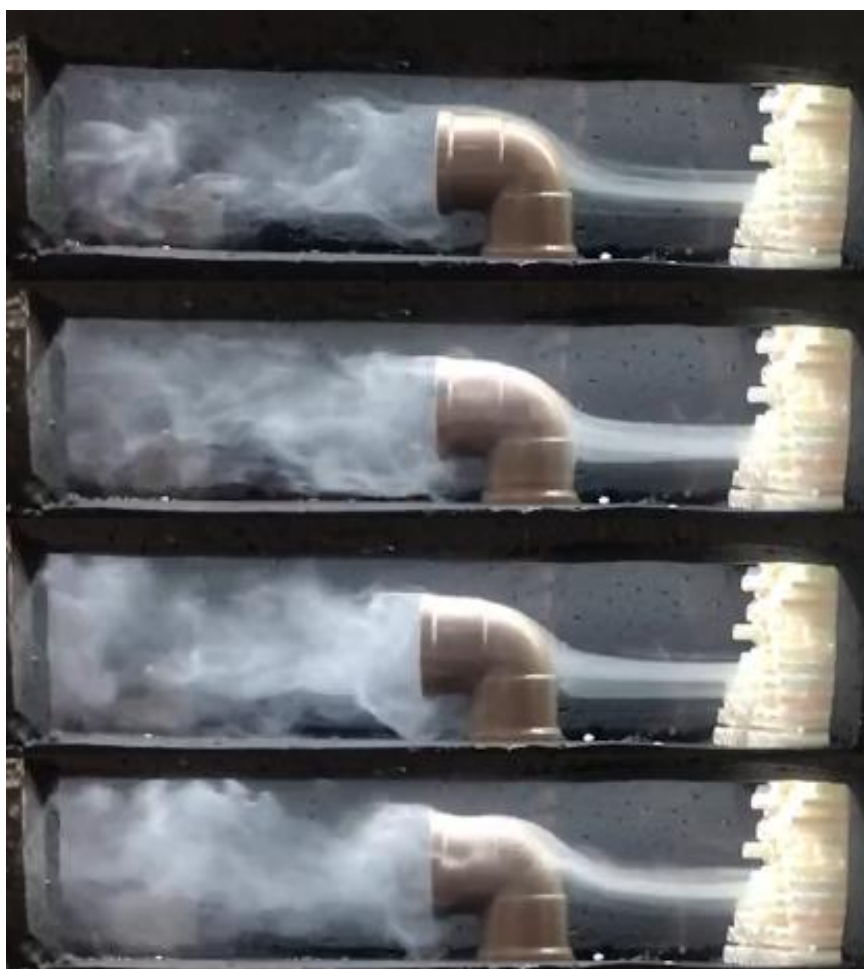


Fonte: (Autor, 2019)

A montagem desse conjunto seguiu o mesmo esquema da Figura 36 com a única diferença sendo a substituição da válvula de água fria pelo nipple. Com esse conjunto foi possível chegar nos resultados vistos na Figura 40. Os vídeos desses testes podem ser vistos, mais uma vez, em câmera normal e lenta nos endereços indicados nas referências bibliográficas. Como pode ser observado na Figura 41 os resultados já superaram muito os primeiros observados sendo que a principal diferença entre os testes foi o diâmetro de saída da fumaça que foi diminuindo de

teste para teste e do primeiro para o segundo além dessa diminuição, também foi adicionado o reservatório de fumaça.

Figura 40 - Resultados do conjunto com o nipple.



Fonte: (Autor, 2019)

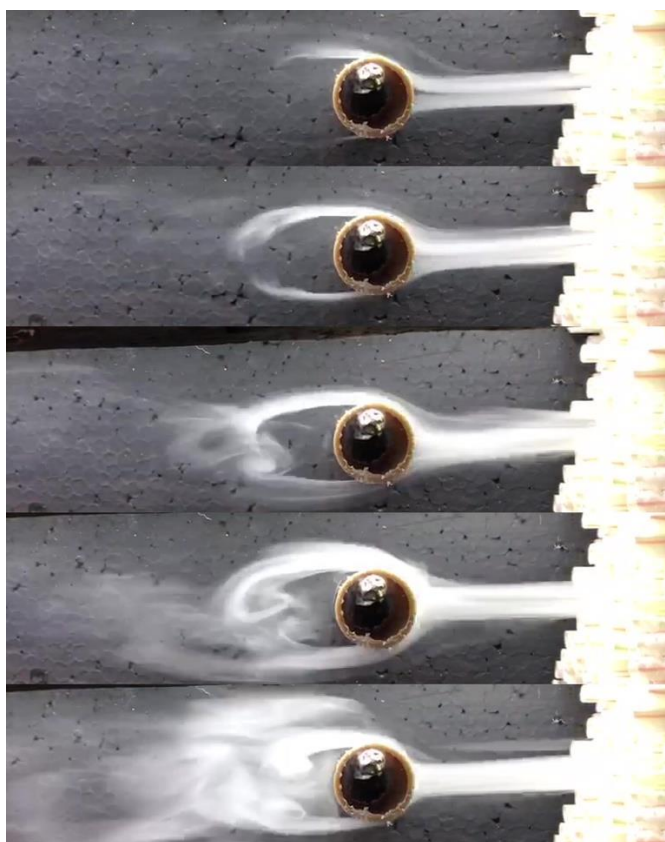
Figura 41 - Comparativo entre os três últimos conjuntos montados.



Fonte: (Autor, 2019)

Considerando que os resultados já estavam mais próximos dos observados em túneis de vento utilizando fumaça mostrados nas bibliografias, foi possível utilizar um corpo de prova cilíndrico sem as diferenças de seção do cotovelo utilizado anteriormente. Esse componente corresponde a um pedaço de encanamento para água fria de aproximadamente seis centímetros de comprimento e dois de diâmetro. Isso possibilitou a observação da formação de dois vórtices um acima do cilindro e outro abaixo como os mostrados na Figura 42. A Figura 43 mostra os resultados desse novo corpo de prova e ao final deste trabalho, nas bibliografias, estão links para a visualização desses registros em vídeo, mais uma vez em velocidade normal e câmera lenta.

Figura 42 – Formação de Vórtices acima e abaixo do cilindro.



Fonte: (Autor, 2019)

Figura 43 – Resultado do corpo de prova cilíndrico quadro a quadro.



Fonte: (Autor, 2019)

7.2 NÚMERO DE REYNOLDS OBTIDO

Com essa última montagem também tentou-se obter o número de Reynolds do escoamento. Para isso utilizamos a equação de Reynolds mostrada na página 31 com as propriedades do ar considerando uma temperatura de 20 °C e pressão de 1 atm. Segundo a tabela descrita por White, F. M. (2011, p.828), a viscosidade dinâmica do ar é $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ e massa específica de $1,2 \text{ kg/m}^3$. O comprimento característico de um cilindro circular é, segundo Çengel, Y. A. e Cimbala, J. M. (2007, p.510), igual ao seu diâmetro, neste caso a medida do diâmetro do cilindro testado forneceu 2 centímetros. A velocidade do escoamento foi estimada com o uso de um Tubo Pitot. De acordo com White, F. M. (2011, p.417), com o valor da diferença de pressão e desconsiderando variações de altura podemos utilizar a equação relacionada abaixo para determinar a velocidade. Infelizmente com o Tubo Pitot utilizado não foi possível fazer um registro conclusivo do valor da diferença de pressão gerada no escoamento, pois a velocidade no túnel era muito baixa. Utilizando valores aproximados de zero a 1 Pa, correspondente ao mínimo mostrado do Pitot utilizado, e as equações abaixo, monta-se a Tabela 2.

$$V = \left[2 * \frac{\Delta P}{\rho} \right]^{1/2}$$

$$Re = \frac{\text{Forças de Inercia}}{\text{Forças Viscosas}} = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$$

Tabela 2 - Variação pressão, velocidade e Reynolds.

Pressão [Pa]	Velocidade [m/s]	Reynolds
0,15	0,50	666,67
0,3	0,71	942,81
0,45	0,87	1154,70
0,6	1,00	1333,33
0,75	1,12	1490,71
0,9	1,22	1632,99

Fonte: (Autor, 2019)

Com o objetivo de testar outra maneira de calcular a velocidade do escoamento observado, foi utilizado um vídeo em câmera lenta e colocada uma escala ao fundo do túnel. Dessa maneira, foram retirados, com a utilização do software gratuito “Free Video To JPG Converter”, 6.404 frames do vídeo gravado, que tem 4 minutos e 16 segundos, e analisados os que permitiram melhores visualizações para o deslocamento da fumaça. A Figura 44 mostra um exemplo da escala utilizada montada no túnel, cada um dos quadrados marcados tem lado de 5 milímetros. A Tabela 3 mostra os valores observados e ao final a média das velocidades encontradas e a média dos Números de Reynolds. Com ela é possível constatar que a máquina de fumaça varia a velocidade do escoamento momentaneamente chegando a valores aproximados de 1,63 metros por segundo e mínimos de 1 metro por segundo.

Figura 44 – Cilindro testado com escala quadrada no fundo do túnel.



Fonte: (Autor, 2019)

Tabela 3 – Valores de velocidade aproximados com utilização da análise de frames das linhas de emissão.

Análise do frame	Tempo [s]	Quadrados Andados	Velocidade [m/s]	Re
131-132-133	0,04	12	1,50	2001,25
918-919	0,04	8	1,00	1334,17
1632-1633	0,04	8	1,00	1334,17
2523-2524	0,04	13	1,63	2168,02
3566-3567	0,04	8	1,00	1334,17
4434-4435	0,04	8	1,00	1334,17
Média	-	9,5	1,19	1584,32

Fonte: (Autor, 2019)

Considerando os valores aproximados de Reynolds, define-se de acordo com o valor estabelecido por Çengel, Y. A. e Cimbala, J. M. (2007, p.510) que o regime de escoamento visualizado é do tipo laminar na parte da frente do cilindro, pois está abaixo de 200.000. Além disso, de acordo com a Tabela 1, 2 e 3, o escoamento apresenta um regime de escoamento mais próximo do tipo sub-crítico com as características: laminar e instabilidades nas esteiras. A Figura 45 mostra um comparativo entre os resultados determinados com a Tabela 1, 2 e 3 e os encontrados de maneira prática neste trabalho.

Figura 45 – Comparativo entre resultado teórico e prático.



Fonte: (Autor, 2019)

7.3 CUSTOS PRINCIPAIS DO TRABALHO

A Tabela 4 mostra os principais gastos envolvidos na preparação deste trabalho. Na próxima seção serão apresentados os custos envolvidos para se adquirir uma máquina de fumaça comercial e um comparativo com os valores para se comprar os equipamentos que a compõem.

Tabela 4 - Custo dos principais componentes adquiridos.

Nome do componente	Custo [R\$]
Canudos	5,00
Ventoinha 1	10,00
Ventoinha 2	10,00
Papelão	5,00
Cola branca	6,00
Isopor	13,00
Cola para isopor (2x)	10,60
Tinta para isopor	8,00
Fita LED	28,00
Líquido para máquina de fumaça	15,00
Cigarro	5,00
Incenso	5,00
Bomba de ar para aquário	20,00
Bastão de cola quente	15,00
Fonte de alimentação 12V	7,00
Pedaco vidro	5,00
Válvula de gás	25,00
Total	192,60

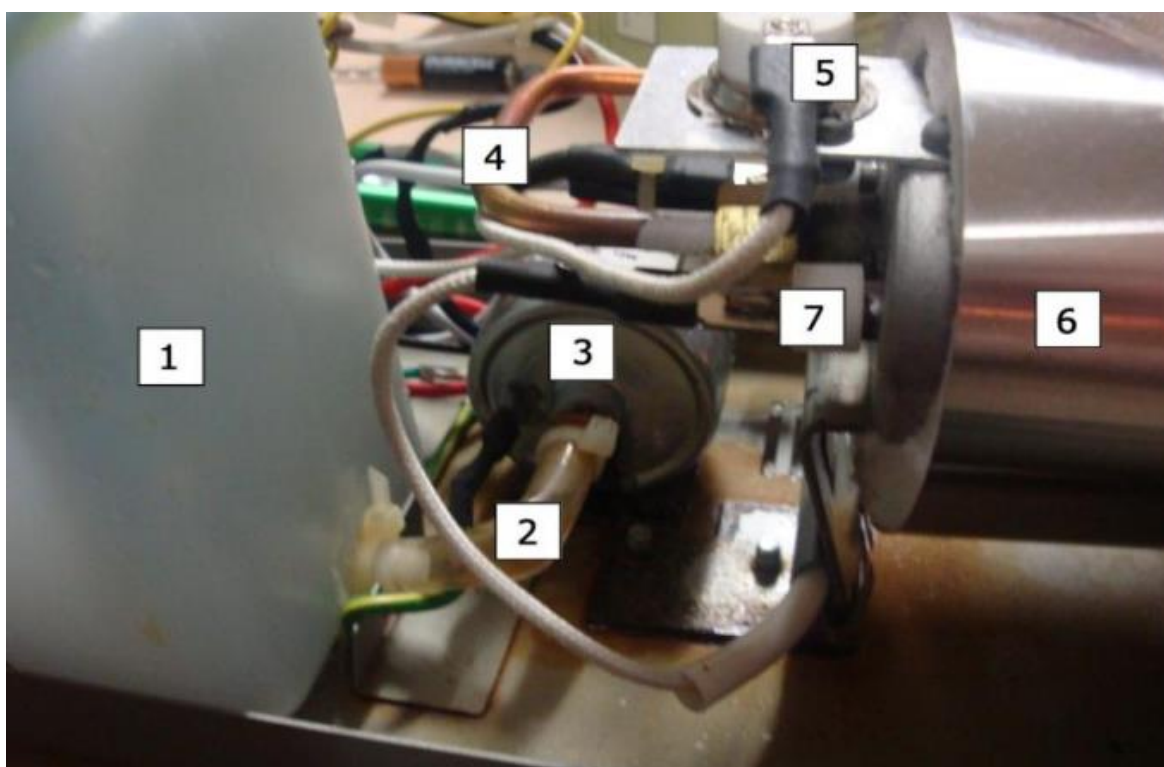
Fonte: (Autor, 2019)

7.4 CUSTOS PARA MONTAGEM DE UM GERADOR DE FUMAÇA

Considerando que a máquina de fumaça comercial apresenta bons resultados, desde que corretamente aplicada, será feito um comparativo entre comprar uma máquina nova já fabricada ou montá-la. A ideia de montá-la apresenta como vantagens a possibilidade de regular a saída de fumaça em uma quantidade adequada a qualquer túnel de vento bem como a possibilidade de acoplar instrumentos capazes de direcionar a fumaça mais facilmente. A Figura 46 mostra

uma foto do interior de uma máquina de fumaça comercial similar a utilizada neste trabalho. Nela é possível ver alguns dos seus principais componentes, sendo eles: reservatório de líquido, mangueiras, bomba, tubo metálico para vaporização, válvula de retenção para bomba, sensor de temperatura, trocador de calor, fonte elétrica para o trocador de calor e chapa ou caixa metálica para abrigar todos os componentes. Alguns desses componentes aparecem correlacionados na Tabela 5. Uma máquina de fumaça similar a utilizada neste trabalho pode ser comprada por valores próximos de R\$ 160,00, já considerando o valor do frete, em sites de compras online como “Mercado Livre” e servirá de comparativo para a escolha entre compra e confecção. A Tabela 5 mostra uma estimativa para os valores de cada componente comprados individualmente, para gerá-la foram considerados valores de sites de vendas online.

Figura 46 - Interior da máquina de fumaça utilizada.



Fonte: Fórum Virtual DJ ⁴.

⁴ Disponível em:
http://www.virtualdj.com/forums/181087/Portuguese_Forum/como_fazer_limpeza_de_maquina_de_fuma_a_.html. Acesso em nov. 2019.

Tabela 5 - Custo aproximado dos componentes da máquina de fumaça comercial.

Nome do componente	Custo [R\$]
Reservatório de líquido [1]	5,00
Bomba e Mangueira [3, 2]	60,00
Tubo para aquecimento [4]	20,00
Sensor de temperatura [5]	15,00
Trocador de calor [6]	10,00
Fonte elétrica [7]	10,00
Válvula de retenção	25,00
Carcaça ou Chapa para apoio	10,00
Total	155,00

Fonte: (Autor, 2019)

A diferença de valores entre comprar cada um dos componentes e comprar a máquina pronta é muito pequena, sendo que durante a montagem podem surgir custos não previstos e eventuais falhas de componentes. Portanto, considera-se que é mais vantajoso efetuar a compra da máquina comercial e adaptá-la para conseguir melhores resultados ou eventualmente modificar diretamente o seu funcionamento para condições desejadas.

8. CONCLUSÃO

Com relação aos objetivos específicos deste trabalho, foram relacionados diversos livros que tratam sobre o tema de túneis de vento e geração de fumaça para ele e visualização de escoamentos em outros meios. O artigo de Thomas J. Mueller de 1980 é um dos que tem conteúdo mais extenso sobre o desenvolvimento dos túneis de vento que utilizam fumaça para visualização de escoamento e como isso ocorreu ao longo da história. Já outros, como, por exemplo, o de Wolfgang “Flow Visualization” possuem um conteúdo mais abrangente que inclui materiais e técnicas utilizadas para escoamentos variados de líquidos e gases. O site americano da NASA possui uma seção dedicada a túneis de vento e possui, também, um projeto de túnel de fumaça que foi utilizado para se ter uma noção de qual o comprimento médio dos canudos utilizados para reduzir a turbulência da fumaça e como eram feitas as colmeias para isso. Outro objetivo do trabalho era relacionar as vantagens e desvantagens dos principais componentes utilizados para geração de fumaça. Nesse sentido, foram utilizadas as próprias bibliografias pesquisadas para saber quais eram. Além disso, testou-se de maneira prática alguns desses materiais, como o incenso e o cigarro. No entanto, embora indicados como bons geradores de fumaça, na forma como foram utilizados neste trabalho, eles não apresentaram bons resultados. Outro objetivo era pesquisar sobre os valores de geradores de fumaça comercial. Foi relacionado o valor médio para isso e quais os custos caso se optasse por comprar seus componentes individualmente. Nesse caso constatou-se que é mais vantajoso optar pela compra do gerador pronto e efetuar modificações, caso seja necessário. Por fim, o último objetivo era calcular o número de Reynolds, o que não pode ser feito de maneira conclusiva, mas com o auxílio de um Tubo de Pitot e de análise de imagens para adquirir a velocidade do escoamento fez-se uma aproximação.

Ao final deste trabalho foi possível perceber as diversas dificuldades encontradas quando se deseja realizar um experimento prático. Como exemplo, citam-se os problemas como a falta de vazão de fluido devido à baixa velocidade do ventilador que induz o escoamento, os materiais que não geraram fumaça na quantidade inicialmente imaginada, a própria montagem manual dos componentes e a dificuldade em diminuir a turbulência da fumaça. Foi possível, também, perceber

que a cada novo teste prático os resultados melhoram e os problemas vão sendo superados aos poucos. Esse caso pode ser visto na evolução do trabalho como um todo, pois apenas a partir da quarta montagem foi possível verificar um escoamento de fumaça. E, mesmo nesse momento existiam problemas de visualização que impossibilitavam a análise. Somente na sétima montagem foi possível observar a fumaça escoando de maneira muito mais linear e formando esteiras atrás do objeto testado de maneira nítida.

Dentre os materiais analisados para geração de fumaça, a mistura de glicerina com água foi a mais vantajosa do ponto de vista de resultados, pois apresentou uma grande quantidade de fumaça na coloração branca e em temperatura não muito elevada a ponto de danificar os outros materiais do experimento. O incenso e o tabaco são materiais que aparecem na literatura como bons geradores de fumaça para túneis de vento, porém usados da maneira como foram neste trabalho, não forneceram bons resultados. Neles a maior dificuldade foi mantê-los queimando dentro do recipiente escolhido, o que foi superado com o uso de uma bomba de ar, mas, ainda assim, a quantidade de fumaça gerada foi pequena. O tetracloreto de titânio, outro material que consta na literatura como bom gerador de fumaça, resultados com esse material podem ser vistos na Figura 16, é tido como bom gerador de fumaça. No entanto, não se conseguiu contato com nenhum fornecedor desse composto e ao que parece ele tem um custo elevado. Sendo assim, pela combinação resultados, custo e facilidade em adquirir, a glicerina se confirma como boa opção de material gerador de fumaça para túnel de fumaça.

Com relação a possibilidade de confeccionar uma máquina de fumaça ou comprá-la pronta, conclui-se que é mais vantajoso optar pela última opção. A pequena diferença de valores entre uma máquina nova e adquirir cada um dos componentes que a compõem para posterior montagem é o principal motivo que leva a essa escolha. Soma-se a isso a dificuldade na própria montagem de uma máquina desse tipo e eventuais custos inesperados. No entanto, caso se opte por realizar modificações para acoplar a máquina de fumaça diretamente em um túnel de vento de maiores dimensões, a opção de confecção pode ser mais vantajosa, pois possibilita um melhor aproveitamento de espaços. Outra vantagem, caso se opte pela confecção, é a possibilidade de redução da vazão de fumaça que ocorre nas máquinas de fumaças comerciais. Nelas ao se apertar o botão para início da geração de fumaça, surge uma grande quantidade de fumaça que após cerca de 15

segundos já tem uma redução significativa. Essa emissão ocorre de maneira brusca e sem um reservatório para acumulá-la prejudica muito a visualização. Caso se crie um mecanismo para gerar a fumaça de maneira mais gradual, os resultados podem ficar ainda melhores, porém isso também pode ser feito apenas modificando o acumulador de fumaça.

REFERÊNCIAS

Ahmed, N. A. **Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications**. Rijeka, Croatia: InTech, 2013.

Barlow, J. B.; Jr. Rae, W. H.; Pope, A.. **Low-Speed Wind Tunnel Testing**. Third Edition. United States of America: Wiley-Interscience, 1999.

BIANCHINI, D.; GOMES, F. de S. C. **A simulação como ferramenta didática no ensino de engenharia**. XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia COBENGE, 2007.

Çengel, Y. A., Cimbala, J. M.. **Mecânica dos Fluidos Fundamentos e Aplicações**. São Paulo, Brasil: AMGH Editora Ltda, 2007.

Fox, W. R. et al. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8 Edição. GEN: 2014.

Hunt, D.; Galica, C.. **“LITTLE SMOKIE” WIND TUNNEL PROJECT**. Disponível em: <https://wright.nasa.gov/smokie/SmokeyWindTunnelFinal3.pdf>

Jr. Anderson, J. D.. **Ludwig Prandtl's Boundary Layer**. Physics Today, 2005. 7f.
 Dyke, M. V.. **An Album of Fluid Motion**. Fourth Edition. United States of America: The Parabolic Press, 1988.

MANFRIN, Felipe. **Primeiro teste do novo túnel de fumaça**. 2019. (28s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-vSmKvxck2A>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

MANFRIN, Felipe. **Segundo teste no túnel de fumaça - velocidade normal**. 2019. (10s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=53e5YgTQi1Y>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

MANFRIN, Felipe. **Segundo teste no túnel de fumaça - câmera lenta**. 2019. (55s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=v94jTsDr1TY>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

MANFRIN, Felipe. **Terceira montagem túnel de fumaça - velocidade normal**. 2019. (12s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-IOlr5HYeoU>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

MANFRIN, Felipe. **Terceira montagem túnel de fumaça - câmera lenta**. 2019. (1m28s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ZZcjky3clc>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

MANFRIN, Felipe. **Quarto teste do novo túnel de fumaça - velocidade normal**. 2019. (15s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=8NTAy854IJ4>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

MANFRIN, Felipe. **Quarto teste do novo túnel de fumaça - câmera lenta**. 2019. (1m03s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=9c38E_2Cg5g>. Acesso em: 18 nov. 2019.

MANFRIN, Felipe. **Quinto teste do novo túnel de fumaça (alteração corpo de prova) - velocidade normal**. 2019. (13s). Disponível em: <<https://youtu.be/HSELdoP3q6Q>>. Acesso em: 02 dez. 2019.

MANFRIN, Felipe. **Quinto teste do novo túnel de fumaça (mudança de corpo de prova) - câmera lenta**. 2019. (1m34s). Disponível em: <<https://youtu.be/i3XblfDTeQ8>>. Acesso em: 02 dez. 2019.

Mueller, T. J.. **On the Historical Development of Apparatus and Techniques for Smoke Visualization of Subsonic and Supersonic Flows**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1980. 14f.

H. Schlichting, K. Gersten. **Boundary-Layer Theory**. Eight Edition. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2000.

Yang, W. J.. **Handbook of Flow Visualization**. Second Edition. United States of America: Taylor & Francis, 2001.

White, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. Sexta Edição. Brasil: AMGH Editora Ltda., 2011.

Wolfgang, M.. **Flow Visualization**. Second Edition. United States of America: Academic Press, INC., 1987.