

MARINA ANNICHINO BATAGIN

**ANÁLISE DE TÉCNICAS DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO EM TÚNEIS DE
VENTO UTILIZANDO O MÉTODO SMOKE WIRE**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

MARINA ANNICHINO BATAGIN

Orientador

Prof. Dr. Odenir de almeida

**ANÁLISE DE TÉCNICAS DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO EM TÚNEIS DE
VENTO UTILIZANDO O MÉTODO SMOKE WIRE**

Projeto de Conclusão de Curso
apresentado ao Colegiado do Curso de
Graduação em Engenharia Aeronáutica da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos para a obtenção do título de
**BACHAREL em ENGENHARIA
AERONÁUTICA**

UBERLÂNDIA - MG

2017

ANÁLISE DE TÉCNICAS DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO EM TÚNEIS DE VENTO UTILIZANDO O MÉTODO SMOKE WIRE

Projeto de Conclusão de Curso
APROVADO pelo Colegiado do Curso
de Graduação em Engenharia Aeronáutica
da Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Odenir de Almeida – Orientador
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Msc. Giuliano Gardolinski Venson
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. João Marcelo Vedovoto
Universidade Federal de Uberlândia

UBERLÂNDIA, 20 de Dezembro de 2017

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Arlindo e Roberta, e ao meu irmão, Gabriel, que são a minha base, que sempre me apoiaram em minhas decisões e estiveram ao meu lado me dando forças até nos momentos mais difíceis.

Agradeço também aos meus avós, Maria Laura e Gilberto, à minha avó Isabel e a Claudia, que considero parte da minha família, que sempre torceram e rezaram por mim, para que eu alcançasse meus objetivos.

Aos meus amigos, especialmente a 4ª turma de Engenharia Aeronáutica, que me proporcionou muitas amizades as quais vou levar para o resto da vida e aos professores da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Ao Governo Federal Brasileiro, que me deu a oportunidade de realizar um intercâmbio nos Estados Unidos onde pude realizar a pesquisa aplicada do método Smoke Wire presente neste trabalho.

Finalmente, agradeço ao meu professor e orientador Odenir, que me deu todo o suporte e auxílio, desde o grupo PETMEC (Programa de Educação Tutorial da FEMEC) até hoje, para tornar esse trabalho possível.

BATAGIN, M.B. **Análise de Técnicas de Visualização de Escoamento em Túneis de Vento Utilizando o Método Smoke Wire**, 2017. 54p. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

RESUMO

O estudo do escoamento do ar através de túneis de vento é algo fundamental para se projetar diversas estruturas, pois com ele é possível analisar o desempenho aerodinâmico de diversos objetos como carros, aviões e edificações.

Neste trabalho foi abordado o método de estudo em túnel de vento denominado Smoke Wire, que tem duas principais vantagens em relação aos outros métodos: a primeira é que ele é realizado em túneis de vento de baixa velocidade, sendo assim possível se construir em pequenos túneis e com baixo investimento financeiro, a segunda vantagem é que trata-se de um método simples, não necessitando de muitos materiais para a implementação.

O Método Smoke Wire trata-se de um método de visualização no qual é aplicada uma diferença de potencial a um fio condutor, tendo sido aplicado a esse fio um fluido de fumaça. Com a diferença de potencial o fio é aquecido, transfere então calor para o fluido que, devido a temperatura elevada, gera fumaça.

Nesse projeto serão realizadas análises para se determinar os melhores formatos de fios condutores, os melhores fluidos e melhores velocidades do vento no túnel para se obter uma fumaça de escoamento homogênea e laminar.

Após terem sido definidos os melhores materiais, foram testados 4 diferentes protótipos para análise de escoamento ao redor deles. Os protótipos tem o formato de um cilindro circular, um aerofólio, uma placa plana na posição vertical e uma placa plana na direção horizontal com um cilindro circular em cima.

As análises foram feitas em relação a visualização do escoamento para um dado Número de Reynolds, e os resultados comparados com informações encontradas na literatura.

PALAVRAS CHAVE: *Túnel de vento, fio, fumaça, escoamento, fluido, Smoke Wire, visualização de escoamento.*

BATAGIN, M.B. **Analysis of Flow Visualization Technics in Wind Tunnel Using the Smoke Wire Method**, 2017. 54p. Graduation Project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

ABSTRACT

The wind tunnel flow visualization study is fundamental to design several structures, because with it is possible to analyze the aerodynamic performance of objects as cars, airplanes e buildings.

This project approached the method of study in wind tunnels called Smoke Wire and it has two advantages over the other methods: the first advantage is because it runs in low speed wind tunnels, so it is possible to be built in small tunnels and with a small financial investment, the second is that it is a simply method, doesn't require a lot of materials to run.

The Smoke Wire Method is a visualization method where a difference of potential is applied to a conduct wire that has a smoke fluid applied on. The difference of potential warms the wire, this one transfers heat to the fluid that, due to high temperature, creates smoke.

In this project analyzed the best designs of conduct wires, the best smoke fluids and the best speed of the wind tunnel to have a homogeneous and laminar smoke flow.

Once decided the best materials, 4 prototypes were tested to analyse the flow around them. The prototypes had the shape of a circular cylinder, an airfoil, a plate in vertical and a plate in horizontal with a circular cylinder on it.

The analyses runned relates the flow visualization for an specific Reynolds Number, comparing the result with the information taked from the literature.

KEY WORDS: *Wind tunnel, wire, smoke, flow, fluid, Smoke Wire, flow visualization*

Lista de Abreviações e Símbolos

PCC	Projeto de Conclusão de Curso
DDP	Diferença de Potencial
AOA	Ângulo de Ataque
Δh	Coluna de água
f	Frequência
ρ	Massa específica do fluido
U	Velocidade do escoamento
d	Dimensão característica do objeto de estudo
μ	Viscosidade do fluido
ν	Viscosidade Cinemática do Fluido
S_t	Número de Strouhal
Re	Número de Reynolds

Lista de Figuras

Figura 1 - Circuito aberto.....	13
Figura 2 - Circuito Fechado	14
Figura 3 - Veículo em túnel de vento para teste aerodinâmico.....	15
Figura 4 - Protótipo de avião em túnel de vento da NASA	15
Figura 5 - Método de observação do escoamento através de fitas.....	16
Figura 6- Método de visualização de escoamento através de tinta.....	16
Figura 7 - Exemplo de túnel utilizando fumaça para estudo de escoamento em aerofólio	17
Figura 8 - Escoamentos de diversos fluidos descritos por Nor et al.(2006)	21
Figura 9 - Visualização de escoamento sobre um aerofólio utilizando método de fitas.)	22
Figura 10 - Visualização de escoamento ao redor de uma asa delta utilizando método de fitas. .	22
Figura 11 –Vórtice descrito por Langston (1980).....	23
Figura 12 - Vórtice descrito por Sharma e Butler (1987)	23
Figura 13 - Vórtice descrito por Goldstein e Spores (1988).....	24
Figura 14 - Lateral do túnel de vento.....	26
Figura 15 - Traseira do túnel de vento	26
Figura 16 - Fio na posição horizontal	27
Figura 17 - Fio na posição vertical	28
Figura 18 - Fio simples (single).....	29
Figura 19 - Dois fios enrolados (coiled)	29
Figura 20 - Escoamento com o fio na posição vertical	32
Figura 21 - Protótipo no formato cilíndrico circular com diâmetro de 0,5cm	34
Figura 22 - Protótipo no formato de um aerofólio com espessura de 0,7 cm (vista lateral).....	34
Figura 23 - Protótipo no formato de um aerofólio (vista frontal).....	34
Figura 24 - Protótipo de uma placa plana na direção vertical com altura de 2,5 cm.....	35
Figura 25 - Protótipo de placa horizontal com circular, de diâmetro de 3 cm, em cima	35
Figura 26 - Vista frontal de esquematização de posicionamento dos equipamentos.....	36
Figura 27 - Vista superior de esquematização de posicionamento dos equipamentos	36
Figura 28 - Gráfico de Voltagem do Motor Vs. Velocidade para Túnel de Vento de Baixa Velocidade	38

Figura 29 - Escoamento ao redor do protótipo cilíndrico	42
Figura 30 – Perfil NACA 3412, segundo Mathias (2006)	43
Figura 31 - Exemplos de escoamento para diferentes AOA, resultados dos experimentos de Hikaro (1988).....	44
Figura 32 - Escoamento ao redor do aerofólio com $AOA = 0^\circ$	44
Figura 33 - Escoamento ao redor do aerofólio com $AOA = 20^\circ$	45
Figura 34 - Escoamento através de placa vertical.....	47
Figura 35 - Esquema do escoamento ao redor de placas com cilindros circulares em cima com base no trabalho de Sumner et al. (2004), como mostrado em Einian et al. (2010).	48
Figura 36 - Escoamento através de placa com cilindro em cima.....	49

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Etapas do PCC	18
Tabela 2 - Tipos de fios utilizados nos testes	28
Tabela 3 - Primeiro teste de Fluidos de Fumaça para o 28 BNC simples.	30
Tabela 4 - Segundo teste de Fluidos de Fumaça para o 28 BNC simples.	31
Tabela 5 - Velocidades relacionadas as Voltagens.	37
Tabela 6 - Características ao redor de um cilindro circular de acordo com o Número de Reynolds, segundo Gersten (1983).....	41
Tabela 7 - Regime de escoamento e coeficiente de pressão, segundo Cengel e Cimbala (2013)	46

Sumário

1.	Introdução	13
1.1.	Motivação do Presente Trabalho	17
2.	Revisão Bibliográfica.....	19
2.1.	O Início da História dos Túneis de Vento	19
2.2.	Técnicas de Visualização	20
3.	Metodologia	25
3.1.	Aparato Experimental.....	25
3.2.	Procedimento Experimental	26
4.	Resultados	33
4.1.	Apresentação os Corpos de Prova	33
4.2.	Posicionamento dos Corpos	35
4.3.	Determinação da Velocidade do Túnel	36
4.4.	Determinação dos Números de Reynolds.....	40
4.5.	Visualização do escoamento ao Redor do Cilindro Circular.....	41
4.6.	Visualização do escoamento ao redor do Aerofólio.....	43
4.7.	Visualização do escoamento ao redor da placa na posição vertical	45
4.8.	Visualização do escoamento ao redor da placa horizontal com cilindro circular em cima.....	47
5.	Conclusão.....	50
	Referências Bibliográficas	52

1. Introdução

Existem inúmeras maneiras de se estudar e solucionar problemas quando se trata de assuntos relacionados a aerodinâmica e hidrodinâmica de objetos. Dentre tais estudos estão os voos experimentais, as análises em túneis de água, em túneis de ventos, sendo que esses últimos podem ser subsônicos, supersônicos, hipersônicos. Existem também outras maneiras, não descritas aqui. Considerando-se todos os tipos de estudos existentes, nenhum pode ser considerado o melhor, pois todos têm suas vantagens e desvantagens e devem ser escolhidos de acordo com cada necessidade de estudo. Nesse trabalho em específico discutiremos a respeito dos túneis de vento.

De maneira geral, os túneis de vento podem ser classificados em dois tipos: a) túneis de circuito aberto; b) túneis de vento de circuito fechado. Como exemplificado na Figura 1, no caso do circuito aberto, o vento passa pelo bocal de entrada, passa por uma contração, pela seção de ensaio, pelo difusor, fan e finalmente pelo exaustor de ar. No caso de circuito fechado o ar não sai pelo exaustor, ou sai muito pouco, e recircula no túnel, como pode ser observado na Figura 2.

Os túneis de circuito aberto são mais utilizados por universidades por terem um custo menos elevado, pois necessitam de menos material para serem construídos. Estes túneis também são ideais para a aplicação de métodos de fumaça, que serão explicados abaixo e será o método abordado experimentalmente nesse trabalho. O circuito aberto é o ideal para a aplicação de métodos de fumaça pois não há problemas de escoamento e a visualização desse escoamento é mais clara, pois o ar não recircula. Por outro lado, comparado com o túnel de circuito fechado, ele possui algumas desvantagens pois o de circuito aberto produz muito mais ruído, é mais difícil de se controlar a velocidade do fluido e necessita de mais energia para funcionar (tratando-se de testes longos).

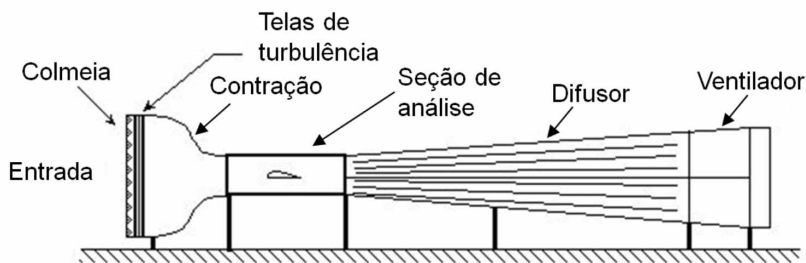


Figura 1 - Circuito aberto (Disponível em : http://m-selig.ae.illinois.edu/uiuc_lsai/tunnel.gif . Acessado em: 03 de dezembro de 2017).

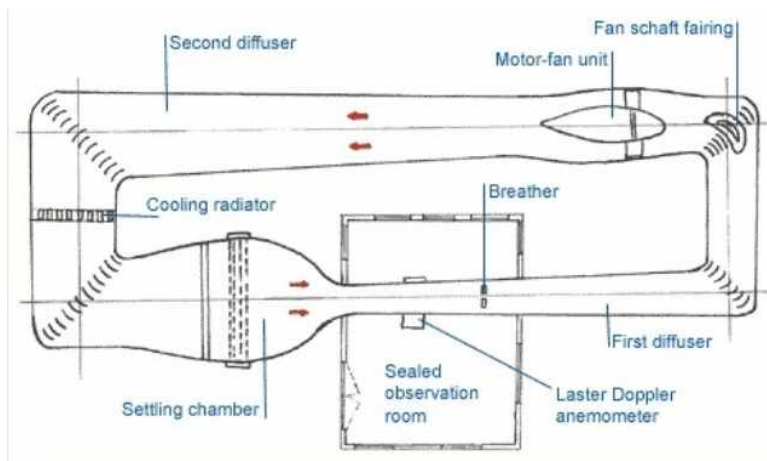


Figura 2 - Circuito Fechado (Disponível em : http://www.nobresdogrid.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=511:os-tuneis-de-vento-e-a-fl&catid=82:coluna-tecnologia-sobre-rodas&Itemid=150. Acessado em: 21 de dezembro de 2017)

Hoje em dia o estudo em túneis de vento vem se tornando cada vez mais recorrente, sendo encontrados em diversas universidades e empresas no Brasil e no mundo para a determinação de parâmetros nos projetos de aviões, automóveis, veículos marinhos, edifícios, cápsulas espaciais, pontes, antenas e outras estruturas de construções civis, além de em alguns países serem utilizados para o estudo dos serviços armados.

Além dos estudos mencionados acima, os túneis de vento são bases de estudos meteorológicos e para paraquedistas. No caso dos meteorológicos são simulados desastres naturais como furacões, para análise de como as estruturas aerodinâmicas no local suportariam a ação dos ventos, podendo assim serem realizadas estratégias para proteger populações. No caso dos paraquedistas, os túneis verticais são utilizados para treinamentos e preparações, tanto para atividades de lazer como treinamentos militares.

O estudo em túneis de vento consiste basicamente em analisar os efeitos de um escoamento de ar sobre o objeto em análise. O objeto em análise pode ser o próprio objeto que se deseja estudar, em tamanho real como mostrado na Figura 3, mas na maioria dos casos trata-se do objeto em escala reduzida, como observado na Figura 4. Os objetos em escala reduzida são os mais utilizados por serem mais fáceis de se adequar ao tamanho dos túneis de vento, mais baratos para se projetar, além de serem mais fáceis de manejar.



Figura 3 - Veículo em túnel de vento para teste aerodinâmico (Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Túnel_de_vento. Acessado em: 12 de outubro de 2017)



Figura 4 - Protótipo de avião em túnel de vento da NASA (Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Túnel_de_vento. Acessado em: 12 de outubro de 2017)

Os estudos experimentais nos túneis de vento são realizados através de dois métodos, os métodos de quantificação e métodos de qualificação. O método de quantificação é o método no qual se utilizam sensores e medidores, através dos quais obtém-se a velocidade, a pressão, viscosidade, temperatura, entre outros parâmetros do escoamento.

Já o método de qualificação é o método no qual o estudo é realizado através da visualização do escoamento, este pode ser classificado em laminar ou turbulento. De acordo com o regime de operação existem diversos métodos de qualificação, como por exemplo o método de utilização de fumaça que será abordado nesse trabalho, e vários outros em que se utiliza vapor, fitas (Figura 5), tinta (Figura 6), etc.

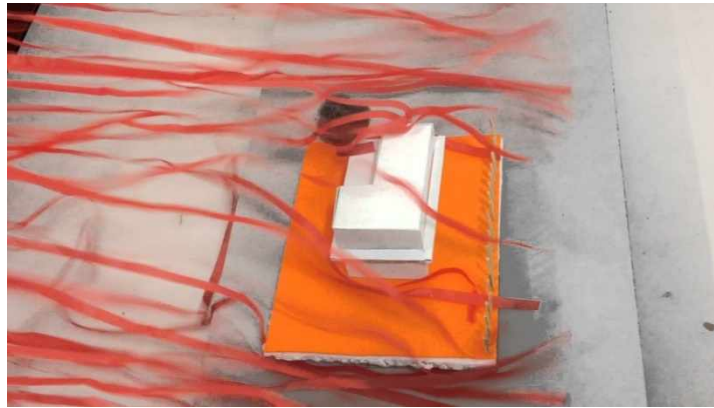


Figura 5 - Método de observação do escoamento através de fitas (Disponível em: https://www.google.com.br/search?tbs=simg%3Am00&tbnid=EbWwQB_rhoI5nM%3A&docid=LMue5VDkLrrNcM&client=safari&tbm=isch&ved=0ahUKEwjDzY7mrcHXAhXBhpAKHdngA-MQhxwICA&biw=1240&bih=654&dpr=2#imgsrc=EbWwQB_rhoI5nM: Acesso em 15 de Novembro, 2017)

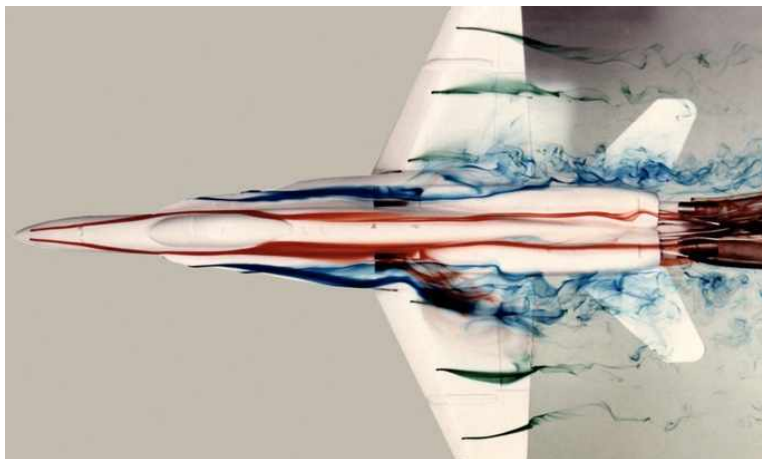


Figura 6- Método de visualização de escoamento através de tinta (Disponível em: <https://secretofflight.wordpress.com/basic-principle-2/> . Acesso em: 15 de novembro de 2017)

Vale ressaltar que o uso de técnicas de qualificação requerem, de maneira geral, túneis de vento de baixa velocidade. Isso deve-se ao fato de se tratarem de métodos de visualização, no qual a velocidade baixa faz com que seja possível se observar esse escoamento ao redor do objeto de estudo, diferente dos túneis de alta velocidade, onde essa visualização não é perceptível por ser muito rápida, requerendo equipamentos de captura em alta velocidade. Além de que, com a baixa velocidade o escoamento torna-se menos turbulento, sendo assim possível analisar melhor os vórtices de escoamento.

1.1. Motivação do Presente Trabalho

Neste trabalho escolheu-se abordar o método de qualificação (ou visualização), através do estudo de túneis de vento de baixa velocidade, utilizando o método de fumaça, exemplificado na Figura 7, onde observa-se através da fumaça o escoamento ao redor de um aerofólio. O método de fumaça foi escolhido por se tratar de um dos métodos de estudo mais rápidos, acurados e econômicos. Além disso, esse método gera uma grande quantidade de dados, possibilitando-se obter um estudo mais detalhado sobre o fenômeno estudado.



Figura 7 - Exemplo de túnel utilizando fumaça para estudo de escoamento em aerofólio (Disponível em: https://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi1t62ts8HXAhUBOZAKHdWXAdQQjRwIBw&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3DlGpEjfkMYp0&psig=AOvVaw0ZmeGVI_l3O8Lo6oj3g-5&ust=1510863476386200. Acessado em: 15 de novembro de 2017)

Dentre os métodos de visualização através da utilização de fumaça, esse trabalho irá abordar especificamente a Técnica *Smoke Wire*, por ser um método simples e barato de ser aplicado e que gera um estudo muito interessante de visualização. O método consiste em aplicar um fluido a um fio condutor e após tal aplicação, esquentase o fio condutor através da aplicação de diferença de potencial de energia. Com a aplicação da diferença de potencial, o fio esquentase e consequentemente aquece o fluido, que por sua vez produz fumaça, a qual é advectada pelo escoamento principal.

O objetivo deste Projeto de Conclusão de Curso (PCC) é obter conhecimento das diversas técnicas de visualização de fumaça de escoamento aplicáveis em túneis de vento e, a partir disso, aprofundar os conhecimentos sobre a técnica *Smoke Wire*. Além disso, descreve-se aqui um

procedimento experimental para escolha de diferentes abordagens e arranjos de fios e fluidos para serem utilizados futuramente no Laboratório de Aerodinâmica do Curso de Engenharia Aeronáutica da UFU.

Este PCC pode ser dividido em 2 etapas, a primeira na pesquisa dos tipos de técnicas de escoamentos utilizando a técnica *Smoke Wire* e a segunda no estudo da técnica *Smoke Wire*, que é subdividido em 4 fases. Em cada fase foram analisadas as melhores condições de geração de fumaça de acordo com cada particularidade. As etapas estão descritas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Etapas do PCC

Casos Reproduzidos	
Etapas 1	Analisar os tipo de escoamento utilizando a Técnica Smoke Wire, suas aplicações e benefícios.
Etapas 2	Estudo da Técnica Smoke Wike, subdivido em outras 4 etapas: • Escolha do dimensionamento e formato do fio a ser utilizado; • Escolha do melhor fluido gerador de fumaça; • Análise numérica para estudo de variáveis no Sistema Internacional de Unidades; • Análise de escoamentos objetos de diferentes formatos.

Essas etapas foram escolhidas para analisar as vantagens e viabilidades de cada técnica existente e para analisar os perfis de escoamento de acordo com os perfis aerodinâmicos dos objetos em estudo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. O Início da História dos Túneis de Vento

De acordo com Gorecki, 1988, acredita-se que o primeiro túnel de vento existente tenha sido criado na Inglaterra em 1871, com sistema de geração de vento à vapor por Frank H. Wenham, para a “Aeronautical Society of Great Britain”. Desde esta época até os dias atuais, muitos aspectos evoluíram, o que influenciou diretamente na qualidade do escoamento e das medidas, preocupação sempre presente nos estudos e desenvolvimentos de produtos e técnicas (JUNIOR, 2009).

Os túneis de vento surgiram a partir do século XIX com intuito de realizar estudos aeronáuticos. Nessa época descobriu-se que era possível realizar testes em relação as forças aerodinâmicas mesmo com o objeto em estudo parado, apenas o vento em movimento, foi um grande avanço para a área aeronáutica (Túnel de Vento, WIKIPEDIA, acessado em: 12 de outubro de 2017).

A construção e utilização dos túneis de vento se intensificou com a Segunda Guerra Mundial e Guerra Fria, onde foram construídos túneis de grandes dimensões para ensaio de aeronaves militares, projeto de mísseis e aviões supersônicos. Depois da Segunda Guerra Mundial, engenheiros ligados a competições automobilísticas começaram a usar túneis de vento, em busca de uma vantagem em relação aos concorrentes, medindo a eficiência dos dispositivos aerodinâmicos de seus carros. Mais tarde essa tecnologia passou a ser empregada em carros de passageiros e de carga. Só que de alguns anos para cá os gigantescos túneis de vento de milhões de dólares têm sido cada vez menos usados. Simulações em computadores começam a substituir os túneis de vento para avaliar a aerodinâmica de carros e aviões (SANTOS, 2009). Entretanto, mesmo com as ferramentas computacionais, a utilização dos túneis é essencial para a validação de parâmetros aerodinâmicos, no caso ainda dos túneis de vento que utilizam a metodologia de fumaça, é essencial para a observação visual do escoamento.

Hoje em dia os túneis de vento evoluíram muito quando comparados com o início. Consegue-se gerar um vento com velocidade controlada, sem oscilações, com temperatura e pressão estáveis, o que permite um estudo cada vez mais preciso das propriedades do escoamento.

2.2. Técnicas de Visualização

Segundo Pope (1966) e Barlow *et al.* (1999), os principais fatores para se garantir a qualidade do escoamento são a uniformidade espacial na seção de testes, a velocidade média, a pressão e a temperatura, a ausência de rotação e de velocidades transversais, uniformidade temporal e a ausências de oscilações periódicas ou de pulsações e de flutuações aleatórias, da velocidade e pressão.

Muitas são as análises já realizadas a respeito do escoamento em túneis de vento e todo ano surgem novas técnicas e antigas são aprimoradas. Segundo Freymunth (1993), a visualização de escoamentos vem de muitos anos atrás, antes da invenção dos túneis de vento, quando por exemplo, Leonardo Da Vinci, já no século XV, esboçou diversos escoamentos ao redor de objetos, e por isso é considerado o “pai da visualização de escoamentos”. Galileu Galilei, ao redor de 1509, fez provavelmente a primeira referência sobre a importância dos vórtices na descrição do movimento dos fluidos, quando descreveu a formação de bolhas e redemoinhos de um jato livre de água caindo dentro de um poço, a partir da observação visual desse fenômeno (GAD-EL-HAK, M., 1998).

Tratando-se da qualificação de escoamentos, sobre a Técnica *Smoke Wire*, tem-se na literatura algumas publicações que auxiliam na implementação da técnica e na análise da visualização dos escoamentos.

Segundo Batill e Muller (1980), a implementação da Técnica *Smoke Wire* é válida em situações onde o Número de Reynolds, baseado no diâmetro do fio, não excede 20 ou a velocidade do vento fica entre 6 e 18 ft/s (1,8 e 5,48 m/s).

A publicação de Nor *et al.* (2006), expõe através de dados e fotos os resultados dos testes de diversos fluidos realizados com diferentes fios condutores aplicando a técnica *Smoke Wire*, que auxiliou na escolha inicial dos materiais para realização experimental do presente trabalho. Abaixo, na Figura 8, segue a tabela que expõe os fluidos testados e os resultados observados e visuais de alguns dos testes realizados por eles.

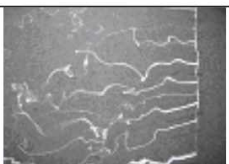
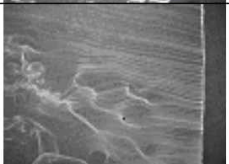
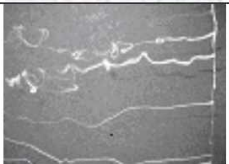
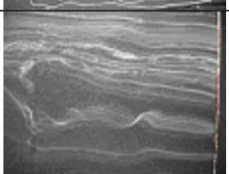
Liquid	Results	Image
Water	No smoke is generated using all type of wires. Higher heat capacity and higher latent heat of vaporization cause water needs more heat to surpass boiling point for generating smoke.	-
Palm oil	No smoke is generated by using two- and three-coiled Nichrome wires. Short duration smoke is generated by using 2 cm-node single Nichrome wire at voltage, $V = 28.8$ V.	
Diesel	Light smoke is generated by using three-coiled Nichrome wire. Clear and uniform smoke is generated by using two-coiled Nichrome wire but in short duration. The odor of diesel is spread in the lab.	
Gasoline	Clear and uniform smoke is generated by using three-coiled Nichrome wire at voltage, $V = 12.3$ V. The odor of gasoline is spread in the lab.	
Corn oil	No smoke is generated by using two- and three-coiled Nichrome wires. Light smoke is generated by using 2 cm-node single Nichrome wire at voltage, $V = 25.1$ V but for short duration.	
Safex	Clear and uniform smoke is generated by using two- and three-coiled Nichrome wires at voltage, $V = 11.8$ V. No odor is generated due to the smoke.	

Figura 8 - Escoamentos de diversos fluidos descritos por Nor et al.(2006)

Segundo Barlow *et al.* (1999), para análise de visualização de escoamento pode-se considerar duas categorias, a primeira é a visualização de escoamento sobre a superfície do objeto em estudo e a segunda é a visualização de escoamento fora do objeto, do campo em si, ao redor do objeto. O escoamento sobre a superfície inclui a utilização de fitas, óleos, tintas, etc. Já o método de visualização ao redor do objeto, inclui a utilização de bolhas de hélio, fitas e fumaça, que é o mais utilizado e tem a vantagem de poder ser iniciada e finalizada em uma fração de segundos. A Figura 9 mostra o escoamento sobre a superfície do objeto e a Figura 10 o escoamento ao redor do mesmo, ambos utilizando o método de cordas.

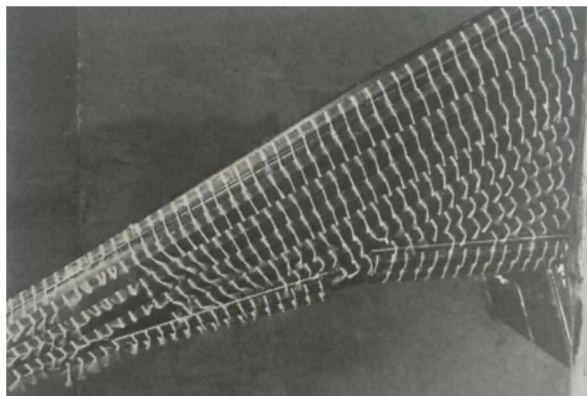


Figura 9 - Visualização de escoamento sobre um aerofólio utilizando método de fitas. Disponível em: Low Speed Wind Tunnel Testing, 3 edição)

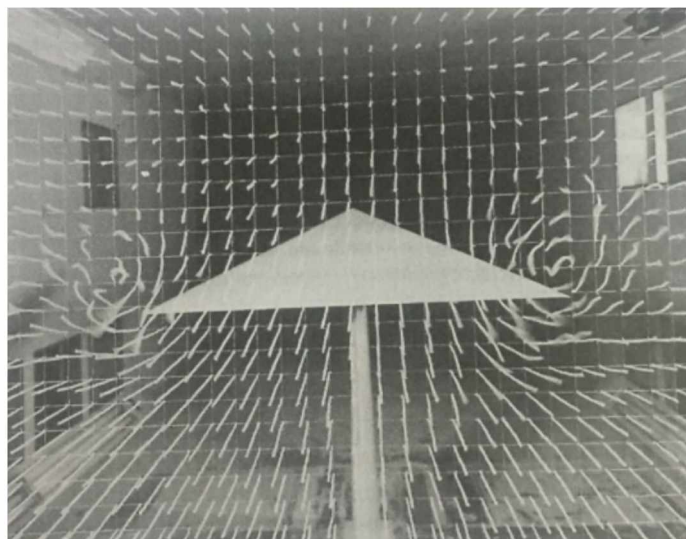


Figura 10 - Visualização de escoamento ao redor de uma asa delta utilizando método de fitas. Disponível em: Low Speed Wind Tunnel Testing, 3 edição)

O estudo realizado por Wang e Olso et al. (1995), utilizando o método Smoke Wire para analisar o escoamento em pás de turbina nos auxilia na análise de visualização de escoamento. Neste estudo foram utilizados três outros estudos de auxílio. A Figura 11 (Langston (1980)) mostra uma imagem geral da evolução e desenvolvimento de duas partes de um vórtice ao redor da pá, um vórtice menor, mais próximo, colado a pá (counter vortex) e um maior, mais descolado (passage vortex). O segundo padrão de fluxo dado por Sharma e Butler (1987), mostrado na Figura 12, demonstra que o counter vortex envolve-se em torno do vórtice maior (passage vortex) em vez de aderir ao lado de sucção, ao redor da pá. O terceiro modelo, mostrado na Figura 13, é apresentado por Goldstein e Spores (1988). Com base nos resultados de transferência de massa,

eles propuseram que a parte de sucção do vórtice permaneça acima do vórtice maior, da passagem e escoe com ele. A localização da divisão do vórtice ao redor da pá é a principal diferença entre os três modelos. A maioria dos mapas de pressão ou velocidade na literatura não dão uma imagem clara de como essa perna se desenvolve. Seu tamanho pequeno combinado com um alongamento forte na direção do fluxo torna difícil de detectar. Moore e Smith (1984) detectaram etileno ao redor do núcleo do vórtice de passagem à saída de uma cascata quando o etileno foi injetado no lado de sucção do lado de ataque. A parte de sucção aparece quase completamente misturada com o vórtice de passagem, pelo menos no plano de saída. Um fenômeno semelhante também foi observado por Sieverding e Van den Bosche (1983) com sua visualização de fumo colorido. Eles descobriram que a parte do lado da sucção envolve o vórtice da passagem. O padrão de fluxo sugerido por Jilek (1986) é semelhante à da Figura 13.

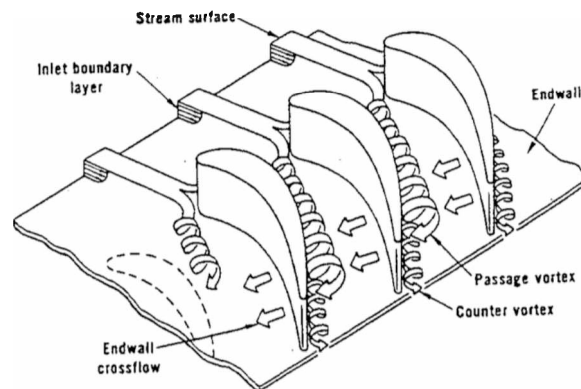


Figura 11 –Vórtice descrito por Langston (1980)

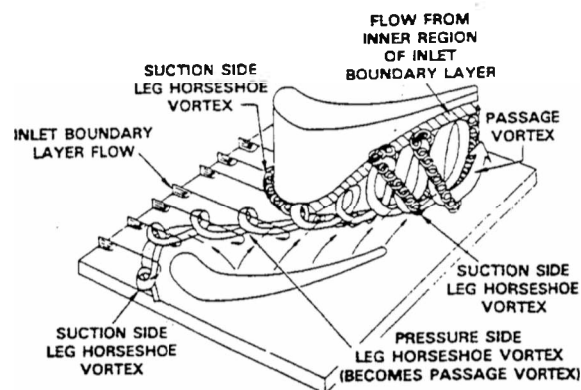


Figura 12 - Vórtice descrito por Sharma e Butler (1987)

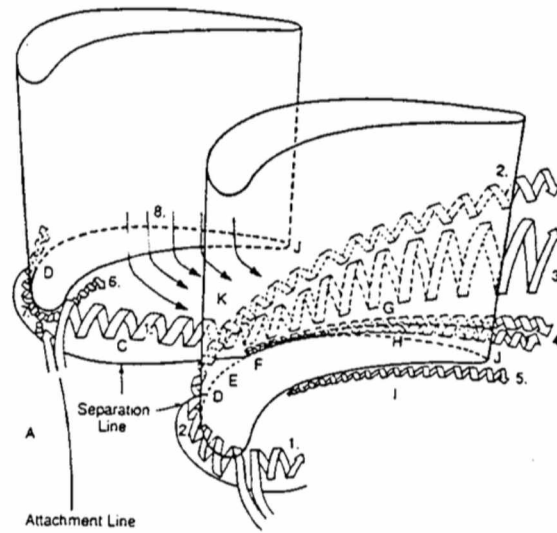


Figura 13 - Vórtice descrito por Goldstein e Spores (1988)

O estudo realizado por Aboelezz (2015) realizou uma comparação das imagens obtidas na através da implementação do Método Smoke Wire em torno de uma esfera e análises do mesmo escoamento realizadas através de simulações computacionais. O mais interessante desse estudo foi que, em ambos os casos, essa comparação resultou na percepção da diferença do escoamento com a adição de campos de fluxos diferentes. Portanto, a utilização do Método Smoke Wire obteve os mesmos resultados quando realizada a análise computacional.

3. Metodologia

O método de geração de fumaça através de um Fio (Smoke Wire Flow) consiste na aplicação de um fluido de fumaça em um fio esticado, no qual a fumaça é gerada com a aplicação de diferença de potencial (DDP) nesse fio. Sendo esse fio condutor, a diferença de potencial aplicada ao fio aquece-o, aquecendo também o fluido que está sobre ele através de transferência de calor, gerando fumaça. Para que ocorra o escoamento dessa fumaça, o fio é posicionado em um túnel vento, onde o vento de baixa velocidade permite o escoamento.

As etapas para a realização e análise do método neste PPC consistiram em determinar o melhor tamanho e formato do fio, o melhor fluido de fumaça, a voltagem e a melhor velocidade do vento que resultaram em um escoamento mais estável, por um período de tempo considerado razoável, para a visualização de escoamento em diferentes estruturas de teste.

A escolha do tipo do fio, da voltagem aplicada e velocidade do vento tiveram como base e auxílio as publicações de Batill e Mueller (1980) e Dol, Nor *et al.*(2006).

3.1. Aparato Experimental

Para a realização experimental foram utilizados os seguintes aparatos:

- 1 Túnel de Vento (Figuras 14 e 15) com as dimensões de 21,59 cm x 21,59 cm x 97,79 cm que está localizado na Universidade de Maryland, em College Park, USA.
- 1 Ventilador de alumínio com controle de velocidade manual através de botão giratório (Figura 15).
- 1 Luminária (Figura 16)
- 1 Roldana (Figura 16)
- 3 Pesos (Figura 16)
- Fio de Níquel-Cromo (Figura 16)
- 2 Blocos de madeira (Figura 16)
- 2 Fios elétricos (Figura 17)
- 1 Fonte de Energia DC (ajustável)
- 2 Prendedores de Fio elétrico

- 1 Barbante
- 4 Parafusos
- 1 Câmera Fotográfica Profissional



Figura 14 - Lateral do túnel de vento



Figura 15 - Traseira do túnel de vento

3.2. Procedimento Experimental

Após a montagem do túnel de vento com o ventilador posicionado (Figura 15), a primeira etapa do experimento foi preparar o material para a realização dos testes com o fio na posição horizontal e vertical. A escolha do fio de material Níquel-Cromo baseou-se em pesquisas previamente realizadas por Batill e Mueller (1980) para este tipo de estudo.

Para o fio na posição horizontal (Figura 16), foram utilizados blocos de madeira para apoio e posicionamento do fio na saída do túnel de vento. Os blocos de madeira foram fixados à mesa através da inserção de pesos sobre os blocos, para que não se deslocassem durante os testes. Em um dos blocos, um dos prendedores de fios foi fixado através de parafusos e o outro ficou apenas apoiado no outro bloco, solto. Em cada prendedor foram colocados os fios elétricos

que foram ligados a fonte de energia e o fio de níquel-cromo ligando os dois prendedores. Para que o fio de níquel-cromo permanecesse sempre esticado, foi colocado um barbante no prendedor solto, este ficou apoiado em uma roldana e na ponta do barbante, foi adicionado mais um peso.

Para o fio na posição vertical (Figura 17), um dos prendedores foi fixado através de parafusos em um bloco de madeira, fixado à parte superior do túnel de vento através de um peso e o outro ficou solto. Assim como na posição horizontal, ao prendedor solto foi adicionado um barbante, onde foi preso a sua ponta um peso para esticar o fio de níquel-cromo. Em ambos os prendedores foram adicionados os fios elétricos e ligados a fonte de energia.

Para se obter a melhor visualização da fumaça foi utilizado uma lâmpada próxima do fio e a luz do laboratório desligada. As figuras abaixo mostram a posição do túnel de vento e a lâmpada em relação ao fio, tal como os fios nas posições horizontal e vertical.

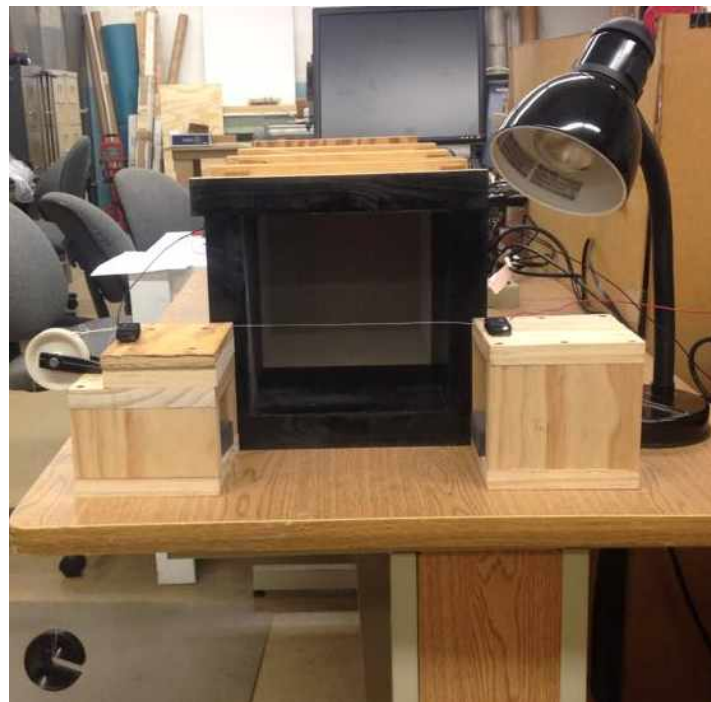


Figura 16 - Fio na posição horizontal



Figura 17 - Fio na posição vertical

Para iniciar os testes foram preparados os fios de níquel-cromo de seis diferentes diâmetros, com dois formatos diferentes: o formato de fio simples (single) e o formato enrolado (coiled), que consiste em dois fios de mesmo diâmetro enrolados. A Tabela 2 mostra os tipos de fios testados de acordo com o diâmetro e as Figuras 18 e 19 mostram os dois formatos utilizados. A siglas AWG e BNC são nomenclaturas utilizadas nos EUA para diferenciar os fios de acordo com os diâmetros.

Tabela 2 - Tipos de fios de Níquel-Cromo utilizados nos testes

Fio	Diâmetro (cm)
40 AWG	0,0078
36 AWG	0,0127
32 BNC	0,0203
30 AWG	0,0254
28 BNC	0.032
24 BNC	0.051



Figura 18 - Fio simples (single)



Figura 19 - Dois fios enrolados (coined)

Tendo sido preparados os materiais, a escolha do melhor fluido de fumaça foi realizada em dois passos. No primeiro, foram testados treze diferentes tipos de fluidos, sendo eliminados oito deles devido ao pequeno volume de fumaça gerado e/ou ao fluido ter sido queimado (nota-se que o fluido havia sido queimado devido a geração de fumaça escura e formação de pontos escuros no fio). O segundo passo foi a realização de testes com os cinco restantes e a escolha do melhor baseado na quantidade de formação de fumaça, tempo e estabilidade do fluido.

A tensão foi aplicada ao fio com o auxílio de uma bateria com ajuste de tensão manual, então testou-se os diferentes tipos de óleos nos diversos tamanhos de fios, em todos os casos a tensão variou entre 6V e 9V. O aparelho utilizado para gerar o vento foi um ventilador de baixa velocidade controlado, de aproximadamente 4,5V.

O primeiro teste realizado para determinar o melhor fluido de fumaça foi realizado com os 13 diferentes fluidos, listados na Tabela 3, testados nos seis fios de diferentes diâmetros (Tabela 2), com o formato single, na posição horizontal.

Tendo sido feitos os testes dos fluidos nos fios de diferentes diâmetros, os melhores resultados levando em consideração o tempo de escoamento e qualidade da fumaça foram obtidos utilizando-se o fio 28 BNC (0,034 cm), de tamanho médio, portanto as relações que seguem são a respeito desse fio.

Abaixo, encontra-se na Tabela 3 o primeiro teste no fio 28 BNC simples, onde estão especificados os 13 tipos de fluidos testados, a voltagem aplicada para aquecer o fio em cada

situação, o tempo de duração do escoamento e os resultados observados. Ressaltando que as voltagens apresentadas na tabela foram as melhores relacionadas a cada tipo de fluido.

Tabela 3 - Primeiro teste de Fluidos de Fumaça para o 28 BNC simples.

Fluidos	Voltagem (V)	Tempo (s)	Resultados
Óleo Mineral Leve	8	11	Grande quantidade de fumaça de boa qualidade.
Fluido de Transmissão	8	6	Grande quantidade de fumaça de boa qualidade, porém fio queimado.
Querosene	8	2.3	Pequena quantidade de fumaça, muito rápido.
Óleo de Lâmpada	8	2.2	Pequena quantidade de fumaça, muito rápido.
Fluido de Trem	7	9	Grande quantidade de fumaça de boa qualidade.
Óleo Mineral Pesado	7	10.2	Grande quantidade de fumaça de boa qualidade.
10W-30	7	10	Grande quantidade de fumaça de boa qualidade, porém fio queimado.
Propilenoglicol	7	3.63	Grande quantidade de fumaça, porém muito rápido.
Super Zero	8	8	Grande quantidade de fumaça de boa qualidade.
Óleo de Mamona	8	30	Pequena quantidade de fumaça, muito rápido.
Glicerina	8	7	Grande quantidade de fumaça de boa qualidade.
Azeite de Oliva	7	20	Grande quantidade de fumaça de boa qualidade, porém fio queimado.
"Smoke fluid"	8	13	Grande quantidade de fumaça de boa qualidade.

Com os resultados do primeiro teste, os cinco melhores fluidos, levando em consideração os fluidos que não queimaram e geraram uma grande quantidade e qualidade de fumaça, foram selecionados para o segundo teste. O segundo teste determinou definitivamente o melhor fluido que será utilizado para a fase de testes de protótipos, levando em consideração a qualidade da fumaça, estabilidade e tempo de escoamento. Na Tabela 4, pode-se observar os resultados desse segundo teste.

Tabela 4 - Segundo teste de Fluidos de Fumaça para o 28 BNC simples.

Fluidos	Voltagem (V)	Tempo (s)	Resultados
Óleo Mineral Leve	8	11.41	Fumaça muito boa com escoamento estável.
Fluido de Trem	7	10.35	Fumaça boa, porém com estabilidade por pouco tempo.
Óleo Mineral Pesado	7	11.86	Muito bom, similar com o Óleo Mineral Leve.
Glicerina	8	8	Boa fumaça, porém rápido.
"Smoke Fluid"	8	15.3	Boa fumaça, porém fumaça um pouco separada devido a formação de gotículas no fio.

Analizando diversos fatores como o tempo, modo como a fumaça escoar, estabilidade e visibilidade, o Óleo Mineral Leve foi considerado o melhor óleo para a realização do experimento.

Utilizando o fio 28 BNC enrolado (coiled) os resultados e tempo de fumaça são basicamente os mesmos quando comparados com o fio simples (single). Baseado nesse fato, o fio simples foi escolhido como melhor opção por ser mais simples para testar, usar metade do material e gastar menos tempo para se preparar o experimento.

Já testando o 28 BNC em duas posições diferentes, horizontal e vertical, a posição vertical foi considerada a melhor pois o escoamento é mais visível e estável.

Portando, ajustando o ventilador em 4,5V (aproximadamente 0,7 m/s), a voltagem da fonte de energia em 9V, com o fio single de 28 BNC em posição vertical, com a utilização do Óleo Mineral Leve, tem-se o seguinte escoamento observado na Figura 20.

Para a realização fotográfica do escoamento presente na Figura 20, a luz do laboratório foi desligada, a luminária presente nas Figuras 16 e 17 ligada e a foto retirada com uma câmera fotográfica profissional sem flash.

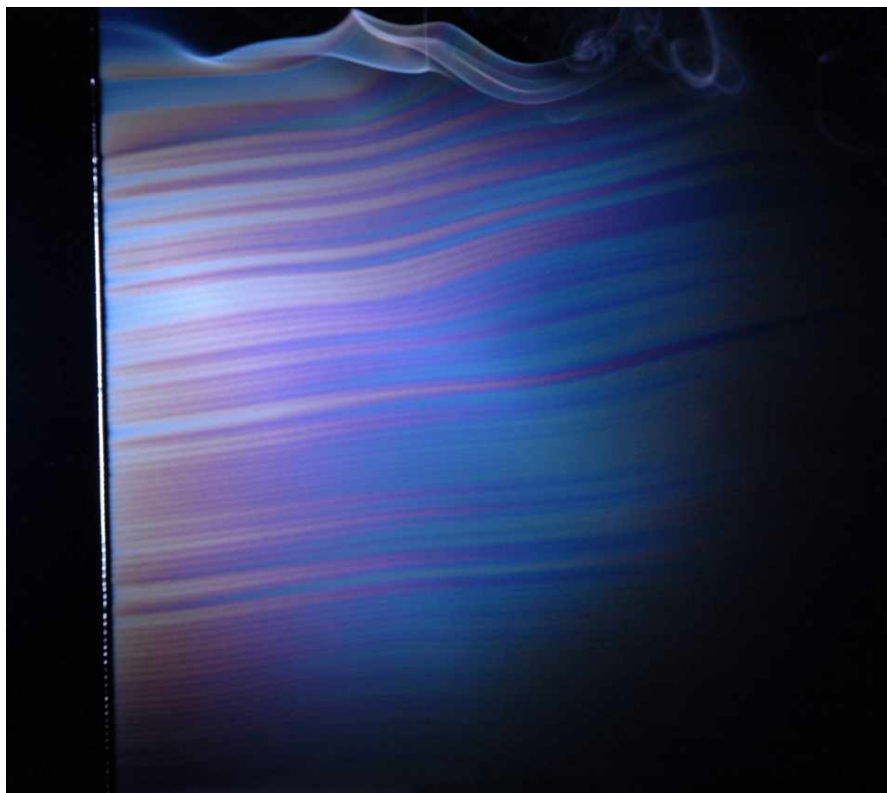


Figura 20 - Escoamento com o fio na posição vertical

Na Figura 20 pode-se observar que a parte superior apresenta um escoamento de fumaça não uniforme, acredita-se que isso tenha acontecido devido ao fato do escoamento estar muito próximo a parede superior do túnel de vento, gerando assim um efeito de parede na parte superior do escoamento.

4. Resultados

Para a obtenção dos resultados que serão apresentados a seguir utilizou-se a técnica de escoamento denominada *Smoke Wire*, na qual foi implementada em um túnel de vento de comprimento de 97,79 cm. A tensão aplicada ao fio de níquel- cromo de diâmetro de 0,032 cm foi de 9V e o ventilador do túnel foi programado em uma potência de 4,5 V (aproximadamente 0,7 m/s). O fluido utilizado para a geração de fumaça foi o Óleo Mineral Leve. A configuração de montagem do fio foi a vertical, formato simples (single), posicionado na saída do túnel de vento.

4.1. Apresentação dos Corpos de Prova

Para o estudo desse PCC utilizou-se quatro corpos de provas diferentes para realizar a análise do escoamento, relacionando com o Número de Reynolds.

Todos os corpos são fixados em um suporte de base quadrada de 8 cm x 8 cm e altura de 20 cm. Essa base servirá de apoio para posicionar o corpo na mesa de testes (Figuras 26 e 27).

Os corpos de prova são:

- Um cilindro, observado na Figura 21, de diâmetro de 0,5 cm e comprimento de 22 cm.
- Um aerofólio, observado nas Figuras 22 e 23, de espessura de 0,7 cm e comprimento de 22 cm.
- Uma placa plana na direção vertical, observado na Figura 24, de dimensões 2,5 cm x 0,25 cm x 22 cm.
- Uma placa horizontal, de 22 cm x 10 cm, com um cilindro em cima, no centro da placa, de 3 cm de diâmetro e 6 cm de altura, observado na Figura 25.



Figura 21 - Protótipo no formato cilíndrico circular com diâmetro de 0,5cm



Figura 22 - Protótipo no formato de um aerofólio com espessura de 0,7 cm (vista lateral)



Figura 23 - Protótipo no formato de um aerofólio (vista frontal)



Figura 24 - Protótipo de uma placa plana na direção vertical com altura de 2,5 cm



Figura 25 - Protótipo de placa horizontal com cilindro circular, de diâmetro de 3 cm, em cima

4.2. Posicionamento dos Corpos

Todos os protótipos tiveram a base apoiada em um banco de testes, posicionado na lateral da saída do túnel de vento, não ficando a base no bocal de saída do túnel de vento, posicionando apenas os corpos de teste na saída do túnel. Os corpos ficaram em frente ao fio de Níquel-Cromo, como mostrado nos esquemas abaixo (Figuras 26 e 27). Tal posicionamento permite que a fumaça proveniente do fio escoe ao redor do corpo de prova e que a base não interfira nos resultados obtidos.

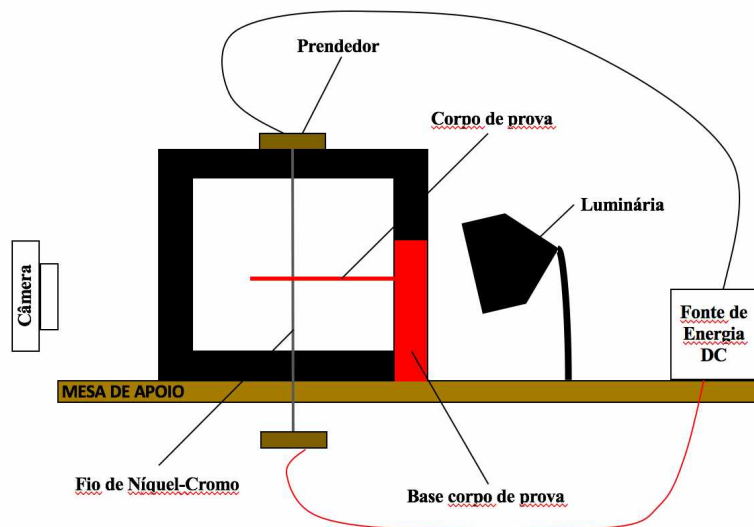


Figura 26 - Vista frontal de esquematização de posicionamento dos equipamentos

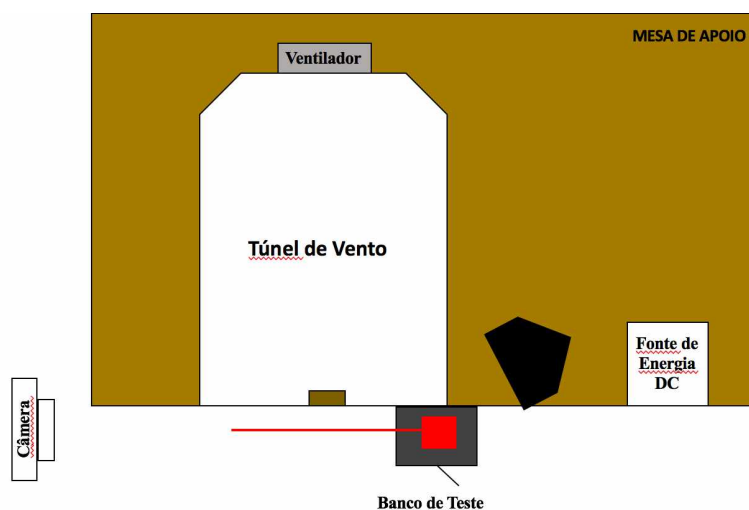


Figura 27 - Vista superior de esquematização de posicionamento dos equipamentos

4.3. Determinação da Velocidade do Túnel

Um dos desafios desses experimentos foi determinar a velocidade do vento em m/s, visto que só estava disponível a informação em Volts. Para determinar essa velocidade, foram usados dois métodos baseados no Número de Strouhal do escoamento.

Primeiro, posicionando o micro-manômetro com óleo na saída do túnel de vento, no mesmo local onde estava posicionado o fio, foram obtidos os Δh para voltagens de 4V a 9V.

Com essa informação foram obtidas as velocidades relacionadas, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Velocidades relacionadas às Voltagens.

Vtagem (V)	$\Delta h_{\text{óleo}}$ (ft)	U (ft/sec)	U (m/s)
4	0,001	1,9	0,58
5	0,002	2,6	0,79
6	0,003	3,2	0,98
7	0,005	4,2	1,28
8	0,007	4,9	1,49
9	0,008	5,3	1,62

Os cálculos que relacionam o Δh com a velocidade obtida na Tabela 5 são,

$$U = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

Sendo,

$$\Delta P = \rho g \Delta h \quad (2)$$

Logo,

$$U = \sqrt{2g\Delta h} \quad (3)$$

$$U^2 = 2g\Delta h \quad (4)$$

Sendo $2g = K$ (constante)

$$U^2 = K\Delta h \quad (5)$$

Se, $U^2 \approx \Delta h$.

$$\frac{\Delta h_2}{\Delta h_1} = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \quad (6)$$

Onde,

U = velocidade [ft/sec]

Δh = coluna de água [ft]

Sabendo que, da literatura, para medição com micro-manômetro com água,

$$50 \text{ ft/sec} \equiv q = 3 \text{ lbf/ft}^2 \quad (7)$$

$$12 \text{ in}_{H_2O} \equiv 62,4 \text{ lbf/ft}^2 \quad (8)$$

Consequentemente,

$$3\text{lb}/\text{ft}^2 \equiv 0,0480\text{ft}_{H_2O} = 0,577\text{ in}_{H_2O} \quad (9)$$

Sabendo que a relação do óleo, utilizado nesse teste, com a água é de 0,8.

Consequentemente,

$$3\text{lb}/\text{ft}^2 \equiv 0,72\text{ in}_{oil} \quad (10)$$

Então, usando (7) e (10) em (6),

$$\frac{\Delta h_2}{0,72} = \left(\frac{U_2}{50}\right)^2 \Rightarrow U_2 = \left(\frac{\Delta h_2}{0,72}\right)^{1/2} * 50 \quad (11)$$

Esses cálculos resultam no seguinte gráfico da Figura 28.

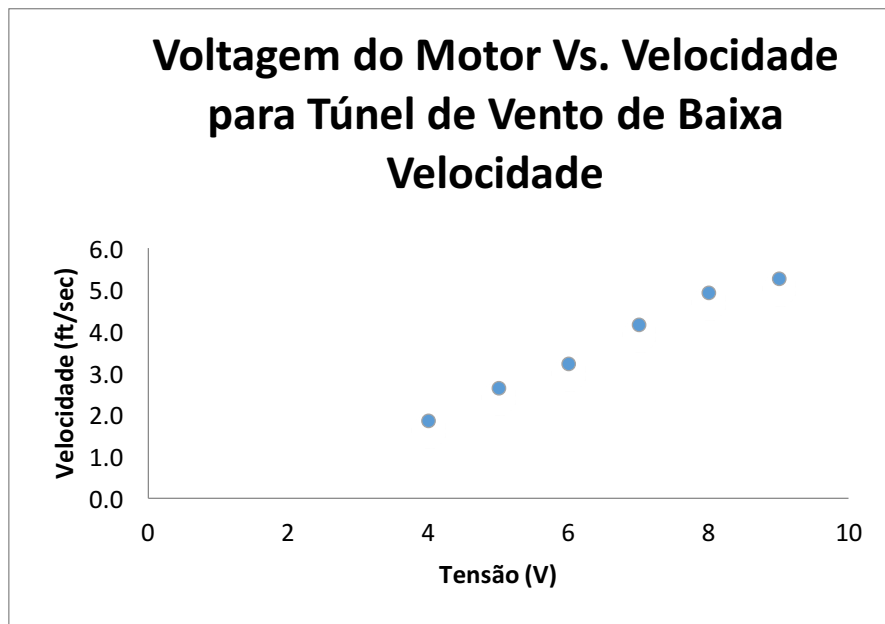


Figura 28 - Gráfico de Voltagem do Motor Vs. Velocidade para Túnel de Vento de Baixa Velocidade

A velocidade utilizada para testar os protótipos foi de 4,5V, analisando o gráfico, representa aproximadamente 2,3ft/sec, isto é, 0,7 m/s.

Após a obtenção desses resultados, usando um analisador de frequências foi obtida a frequência de 1700 rpm para este escoamento.

A equação do Número de Strouhal é dada por,

$$S_t = \frac{f * D}{U} \quad (12)$$

Onde, nesses condições,

$D = \text{Diâmetro do cilindro circular} = 0,1875 \text{ in} = 0,015625 \text{ ft} = 0,0047625 \text{ m}$

$U = 2,3 \text{ ft/sec} = 0,7 \text{ m/s}$

$f = \text{frequência} = 1700 \text{ rpm} = 28,33 \text{ Hz}$

Então,

$$S_t = \frac{(28,33) * (0,015625)}{2,3} = 0,19 \quad (13)$$

Devido à baixa velocidade, o Δh é pequeno e difícil de ler, então a precisão do micro-manômetro no teste não é boa. Então, para garantir que os dados obtidos estão corretos foi realizado um segundo teste.

Segundo, pegando uma foto dos vórtices de fumaça ao redor do cilindro circular e uma foto, de mesma dimensão, de uma régua, medindo a distância dos vórtices na régua (imagem) é de 2,5 cm, que corresponde a 2,3 cm da atual distância x (medida na régua física).

Tendo as duas medidas praticamente a mesma distância, considerou-se,

- 2,5 cm do monitor $\equiv$ 2,3 cm distância atual $\equiv$ 0,906 in distância atual = x .
- $x = 0,91 \text{ in} = 0,075 \text{ ft}$.

$$U = \frac{x}{t} = \frac{x}{T} = \frac{x}{1/f} = x * f \quad (14)$$

Considerando que $U = 2,3 \text{ ft/sec}$ está correto,

$$\begin{aligned} 2,3 \text{ ft/sec} &= 0,075 \text{ in} * f \\ f &= 30 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (15)$$

Aplicando a equação do Número de Strouhal (12) para o cilindro circular,

$$S_t = \frac{f * D}{U} = \frac{f * D}{x * f} = \frac{D}{x} = \frac{0,015625 \text{ ft}}{0,075 \text{ ft}} = 0,20 \quad (16)$$

Comparando a frequência e o Número de Strouhal resultante do segundo método (30 Hz / 0,20) com a do primeiro (28,33 Hz / 0,19) obtemos um resultado muito similar, que confirma que a velocidade é de aproximadamente 0,7 m/s.

4.4. Determinação dos Números de Reynolds

O Número de Reynolds é usado para o cálculo do regime de escoamento de um fluido que pode ser Turbulento, Laminar ou de Transição. Esse parâmetro é dado pela seguinte equação,

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu} = \frac{U d}{\nu} \quad (12)$$

Onde, nesse caso, para $T = 20^\circ \text{C}$,

ρ = Massa específica do fluido = $1,205 \text{ kg/m}^3$

U = Velocidade do escoamento = $0,7 \text{ m/s}$

d = Dimensão característica do objeto, varia em cada caso

μ = Viscosidade do fluido

ν = Viscosidade Cinemática do Fluido = $15,11 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Portanto,

$$Re = \frac{U d}{\nu} = \frac{0,7 d}{15,11 \times 10^{-6}} = 46326,9 d \quad (13)$$

Como mencionado anteriormente, segundo Batill e Muller (1980), a implementação do Método Smoke Wire é baseado em situações onde o Número de Reynolds, baseado no diâmetro do fio não excede 20 ou a velocidade do vento fica entre 6 e 18 ft/s (1,8 e 5,48 m/s). Sendo assim, o experimento está dentro dos parâmetros pois, apesar de não atender a exigência da velocidade do vento, a desse experimento é de $0,7 \text{ m/s}$, atende a exigência do Número de Reynolds menor que 20.

Exemplificando, para o diâmetro de fio de $0,034 \text{ cm} = 0,00034 \text{ m}$, $Re = 46326,9 (0,00034) = 15,7$.

Em cada um dos casos que seguem, o Número de Reynolds foi calculado de acordo com o dimensionamento específico dos protótipos especificados.

4.5. Visualização do escoamento ao Redor do Cilindro Circular

Segundo Vieira (1997), o escoamento ao redor de cilindros circulares, posicionados transversalmente em relação ao escoamento não perturbado, são extensivamente estudados tanto por métodos experimentais quanto por meios teóricos. Visualizações experimentais da esteira turbulenta de cilindros de base circular foram intensamente realizadas desde o início do século XX, como mostra a publicação de Prandtl & Tiejens (1957). Gersten (1983), classifica o escoamento ao redor de cilindros circulares em 7 regimes distintos em função o Número de Reynolds, conforme transcrito na Tabela 6.

Tabela 6 - Características ao redor de um cilindro circular de acordo com o Número de Reynolds, segundo GERSTEN (1983)

Re	Regime	Características	Strouhal	Escoamento
$Re \rightarrow 0$	Escoamento em Re muito baixo	Regime permanente, ausência de esteira, simetria longitudinal	-	
$3-4 < Re < 30-40$	Vórtice duplo	Regime permanente, separação e bolha de recirculação.	-	
30 $< Re < 40$	Estágio incipiente da esteira de vórtices de Von Kármán	Esteira laminar e instável e presença de recirculação.	$Sr < 0,14$	
80 $< Re < 90$	Esteira de vórtices de Von Kármán plenamente desenvolvida	Esteira de vórtices de Von Kármán	$0,14 < Sr < 0,21$	
150 $< Re < 300$	Regime sub-crítico	Esteira de vórtices instável e escoamento laminar nas proximidades da esteira	$Sr = 0,21$	
$1,0 \times 10^5$ $< Re < 1,3 \times 10^5$	Regime crítico e pós-crítico	Separação laminar, recolamento turbulento, separação turbulenta final, esteira turbulenta	sem periodicidade dominante	
$3,5 \times 10^6 < Re$	Regime super-crítico	Transição para a camada limite turbulenta, separação turbulenta	$0,25 < Sr < 0,30$	

Para o experimento realizado no presente trabalho, o cilindro circular utilizado apresenta um diâmetro de 0,5 cm, portanto, o número de Reynolds correspondente a esse experimento é, $Re = 46326,9 (0,005) = 231$.

Com o número de Reynolds de 231, segundo a Tabela 6, o escoamento possui a esteira de Von Karmán (ou esteira de vórtices) plenamente desenvolvida, como pode-se observar o escoamento na imagem correspondente (Tabela 6).

Segundo Zdravkovich (1997), tratando-se de regime de escoamento ao redor de cilindros circulares, considera-se:

- Regime Laminar: $Re < 200$
- Regime de Transição: $200 < Re < 20 \times 10^3$
- Regime Turbulento: $Re > 20 \times 10^3$

Portanto, pode-se concluir que no experimento realizado, obteve-se um escoamento de Regime de transição.

Abaixo, na Figura 29, observa-se a imagem retirada da análise experimental do presente trabalho através da utilização do cilindro circular, descrito na Figura 21, como corpo de prova.



Figura 29 - Escoamento ao redor do protótipo cilíndrico

Através dessa imagem pode-se observar nitidamente a esteira de vórtices, como já era esperado de acordo com Gersen, Tabela 6. Observa-se também que há uma pequena ascensão da esteira, ela não apresenta um escoamento horizontal. Acredita-se que esse fato aconteça devido a temperatura do fio que aquece a fumaça e então tende a subir. Pode-se observar na Figura 20, onde não nenhum corpo de prova inserido no teste, que essa fumaça já está realizando esse movimento para cima, enfatizando que a temperatura do fio influencia na temperatura da fumaça.

4.6. Visualização do escoamento ao redor do Aerofólio

A característica de um escoamento através de um aerofólio pode mudar de acordo com o perfil do aerofólio. No caso desse experimento, foi utilizado um aerofólio similar ao NACA 3412, que pode ser observado na Figura 30.

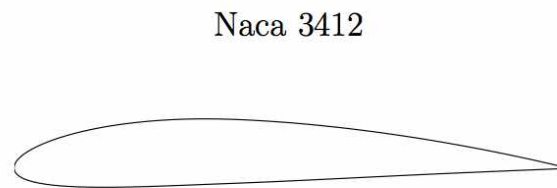


Figura 30 – Perfil NACA 3412, segundo Mathias (2006)

Para o experimento realizado no presente trabalho, o aerofólio utilizado apresenta uma espessura de 0,7 cm, portanto, o número de Reynolds correspondente a esse experimento é, $Re = 46326,9 (0,007) = 324$.

O protótipo foi testado em duas posições, a primeira com ângulo de ataque igual a zero ($AOA = 0^\circ$) e a segunda com ângulo de ataque positivo ($AOA = 20^\circ$).

De acordo com o exemplo apresentado por Anderson (2011), o aumento do Ângulo de Ataque de um aerofólio influencia no escoamento conforme mostra a Figura 31.

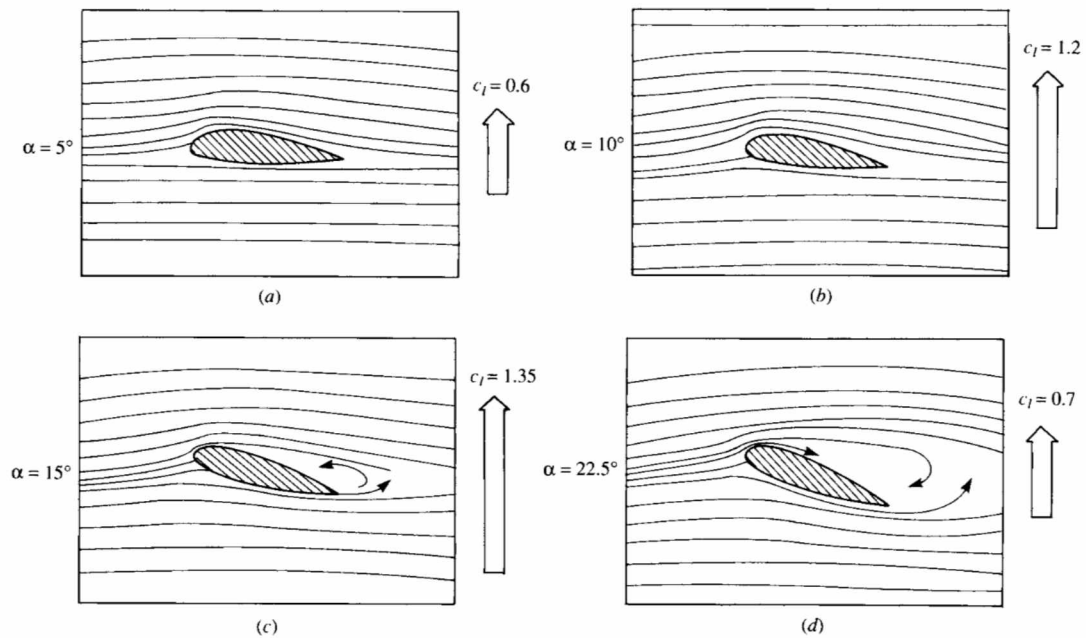


Figura 31 - Exemplos de escoamento para diferentes AOA, resultados dos experimentos de Hikaro (1988)

Abaixo nas Figuras 32 e 33 têm-se os escoamentos através do aerofólio na duas posições, $AOA = 0^\circ$ e $AOA = 20^\circ$.



Figura 32 - Escoamento ao redor do aerofólio com $AOA = 0^\circ$.

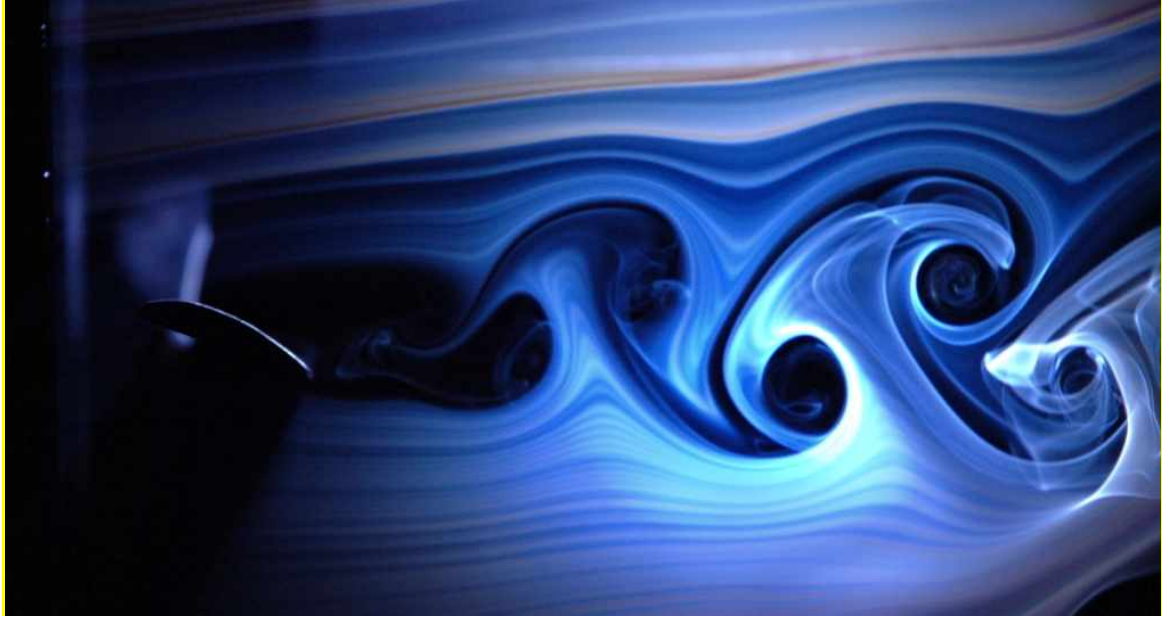


Figura 33 - Escoamento ao redor do aerofólio com $AOA = 20^\circ$.

Analisando-se as imagens obtidas a partir dessas duas situações (Figuras 32 e 33) nota-se a nítida influência do ângulo de ataque em um escoamento ao redor de um aerofólio. Como já se era esperado a partir da observação das imagens na Figura 31, que o aerofólio na posição de $AOA = 0^\circ$ possui um escoamento mais colado ao aerofólio, descolamento começa no bordo de fuga e é sutil, com esteira de vórtices ainda bem definidas. Enquanto o aerofólio com ângulo de ataque positivo, o descolamento acontece logo que o fluido começa a escoar sobre o aerofólio, no bordo de ataque, e a esteira de vórtices já não é mais tão definida.

4.7. Visualização do escoamento ao redor da placa na posição vertical

Segundo Sandraey e Muller (2009), a pressão de arrasto significa o arrasto em um corpo resultante do efeito integrado da pressão estática que atua normal a superfície, exatamente na direção de arrasto. Em um caso extremo de uma placa plana normal ao fluxo, o arrasto é totalmente o resultado de um desequilíbrio na distribuição de pressão e de forma geralmente depende do número de Reynolds. O arrasto representado na Tabela 7 a seguir é baseado na área frontal projetada. À medida que um corpo começa a se mover através do ar, a vorticidade na camada limite descolam das superfícies superior e inferior para formar dois vórtices de rotação oposta. A Tabela 7, de Cengel e Cimbala (2013), exemplifica formas simétricas com valores de

arrasto, e Reynolds a baixa velocidade.

Tabela 7 - Regime de escoamento e coeficiente de pressão, segundo Cengel e Cimbala (2013)

No	Body	Laminar/turbulent	Status	C_D
1	Cube	$Re > 10,000$		1.05
2	Thin circular disk	$Re > 10,000$		1.1
3	Cone ($\theta = 30^\circ$)	$Re > 10,000$		0.5
4	Sphere	Laminar $Re \leq 2 \times 10^5$		0.5
		Turbulent $Re \geq 2 \times 10^6$		0.2
5	Ellipsoid	Laminar $Re \leq 2 \times 10^5$		0.3-0.5
		Turbulent $Re \geq 2 \times 10^6$		0.1-0.2
6	Hemisphere	$Re > 10,000$	Concave face	0.4
		$Re > 10,000$	Flat face	1.2
7	Rectangular plate	$Re > 10,000$	Normal to the flow	1.1 - 1.3
8	Vertical cylinder	$Re \leq 2 \times 10^5$	$L/D = 1$	0.6
			$L/D = \infty$	1.2
9	Horizontal cylinder	$Re > 10,000$	$L/D = 0.5$	1.1
			$L/D = 8$	1
10	Parachute	Laminar flow		1.3

Para o experimento realizado no presente trabalho, a placa plana vertical utilizada apresenta uma altura de 2,5 cm, portanto, o número de Reynolds correspondente a esse experimento é, $Re = 46326,9 (0,025) = 1158$.

Portanto, pode-se concluir que no experimento realizado, obteve-se um escoamento de Regime de Laminar, sendo $Re < 10000$ (Rectangular plate, exposto na Tabela 7).

Abaixo, na Figura 34, observa-se a imagem retirada da análise experimental do presente trabalho através da utilização da placa plana, descrito na Figura 24, como corpo de prova.

Como era de se esperar, após a placa plana, a visualização do escoamento torna-se comprometida, não sendo mais possível observar as esteiras de vórtices que foram observadas nos exemplos anteriores. Para esse regime de escoamento era esperado uma esteira laminar mais nítida. No entanto, o resultado obtido não permite classificá-la como tal. Tal visualização provavelmente deve-se ao fato da formação de vórtices opostos, gerados ao passar pelas bordas superior e inferior da placa.

Observa-se também um descolamento maior em relação a borda superior da placa do que em relação à inferior, provavelmente devido ao fato da fumaça estar escoando com uma leve inclinação para cima devido a temperatura, como mencionado anteriormente.



Figura 34 - escoamento através de placa vertical.

4.8. Visualização do escoamento ao redor da placa horizontal com cilindro circular em cima

Segundo Sumner (2013), na situação de escoamento ao redor de uma placa com um cilindro circular, o fluxo escoia sobre a extremidade livre do cilindro circular e na junção da parede do cilindro, fazendo com que o fluxo local e o fluxo do cilindro se tornem fortemente tridimensionais. Além do vortex familiar de Kármán nas laterias do cilindro, o escoamento também é caracterizado pelo vórtice que se dobra a montante na junção da parede do cilindro (horseshoe vortex) e dois conjuntos de vórtice de rotação inversa, um perto da extremidade livre (tip vortices) associados a um fluxo de downwash na linha central (por exemplo, Kawamura et al., 1984a, Johnston e Wilson, 1996; Adaramola et al., 2006) e o outro perto do plano do solo (base vortex) (por exemplo, Tanaka e Murata, 1999; Sumner et al., 2004). No esquema da Figura 35 pode-se observar todos esses vórtices descritos acima.

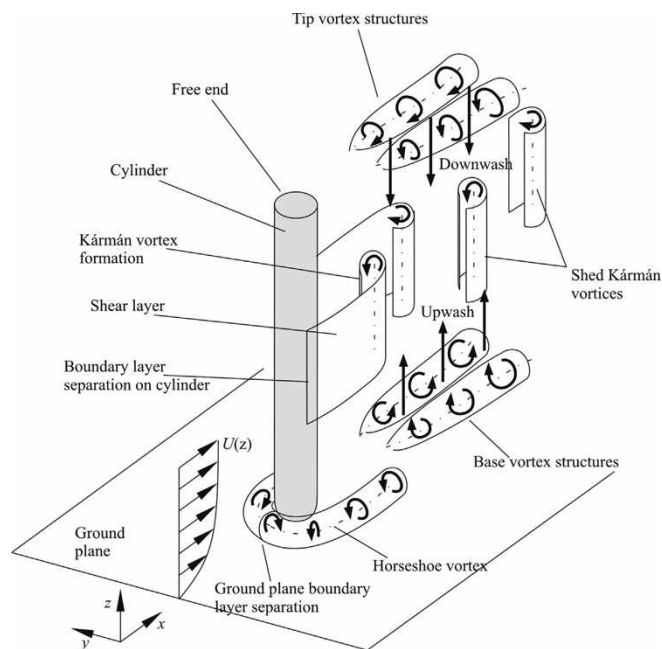


Figura 35 - Esquema do escoamento ao redor de placas com cilindros circulares em cima com base no trabalho de Sumner et al. (2004), como mostrado em Einian et al. (2010).

Não foi possível encontrar na literatura dados que determinem o regime de escoamento para esse tipo de experimento, entretanto segundo um experimento feito por Kawamura et al. (1984), o número de Reynolds obtido para o escoamento de placa com cilindro em cima, utilizando método de fumaça, foi de $1,07 \times 10^4$.

Para o experimento realizado no presente trabalho, o cilindro utilizado apresenta um diâmetro de 3 cm, portanto, o número de Reynolds correspondente a esse experimento é, $Re = 46326,9 (0,03) = 1389$. Não tão distante do número obtido por Kawamura et al. (1984).

Abaixo, na Figura 36, observa-se a imagem retirada da análise experimental do presente trabalho através da utilização da placa plana, descrito na Figura 25, como corpo de prova.

Como era de se esperar, devido aos inúmeros vórtices formados nesse protótipo, esquematizados na Figura 35, após a passagem pelo cilindro não é possível se observar nitidamente as direções dos vórtices formados.

Assim como nos casos anteriores, a fumaça tende a subir um pouco devido a temperatura elevada do fio.



Figura 36 - Escoamento através de placa com cilindro em cima.

5. Conclusão

A Técnica de visualização Smoke Wire trata-se de um método muito prático e fácil de se aplicar em laboratório por ser barato, não necessitar de muitos materiais, e como é realizado em túneis de vento de baixa velocidade, são túneis menos complexos e menores. Além disso, é um método muito eficiente pois possibilita uma análise qualitativa de visualização de escoamento ao redor de objetos muito nítida, podendo-se analisar diversos pontos do escoamento.

Na primeira análise realizada nesse PCC, do escoamento sobre um cilindro circular, obteve-se a visualização e o número de Reynolds esperado de acordo com a literatura pois, por tratar-se de um corpo aerodinâmico inserido em um meio de baixa velocidade, esperava-se obter um regime de transição, com esteiras de vórtices bem definidas e foi exatamente o resultado encontrado.

Na segunda análise, de escoamento através de um aerofólio, conseguimos analisar claramente a influência do ângulo de ataque no escoamento de um aerofólio, estudo muito importante para a área aeronáutica. O estudo do aerofólio com ângulo de ataque igual a zero apresenta um escoamento com esteiras de vórtices muito bem definidas, e quando vai se aumentando o ângulo, a esteira e torna-se cada vez menos nítida.

Na terceira análise, de escoamento através de uma placa plana vertical, obtém se uma visualização pouco clara, provavelmente devido a formação de vórtices em direções opostas ao passar pela borda superior e inferior da placa, como era de se esperar devido a aerodinâmica do corpo na posição vertical. Mesmo com uma aerodinâmica da placa na posição vertical o escoamento apresenta regime laminar, devido ao tamanho do protótipo de apenas 2,5 cm e a baixa velocidade do vento (0,7 m/s).

Na última análise, de escoamento através da placa plana com cilindro circular em cima, assim como na terceira análise, a visualização não é tão clara por existirem diversos vórtices formados em diversas direções, o que dificulta na visualização clara de análise de escoamento.

Apesar de as duas últimas análises não terem apresentado resultados visuais de escoamento tão claros, todos os protótipos testados possuíram resultados analisáveis e condizentes com as informações presentes na literatura, considerados bons resultados. Isso torna o método e os resultados obtidos através da aplicação do Smoke Wire desenvolvidos nesse trabalho aplicáveis a outros estudos e testes.

O trabalho apresentado terá uma grande importância para o laboratório de aerodinâmica da Universidade Federal de Uberlândia, pois as informações presentes nele servirão de auxílio para que a técnica seja implementada no laboratório e então, muitos testes, com diversos tipos de protótipos, poderão ser realizados.

Referências Bibliográficas

ABOELEZZ, AHMED, Flow Visualization Using Smoke Wire Technique And Laser Beam. 8th ankara international aerospace, 2015

ADARAMOLA, M.S., AKINLADE, O.J., SUMNER, D., BERGSTROM, D.J., SCHENSTEAD, A.J. Turbulent wake of a finite circular cylinder of small aspect ratio. Journal of Fluids and Structures, 2006

ANDERSON, A. D. Fundamentals of Aerodynamics, 5th edition, Mc Graw Rio, 2011

BARLOW J. B., RAE W. H., POPE A., Low-Speed Wind Tunnel Testing, 3rd edition; John Wiley & Sons, 1999

BATILL, Stephen M., MUELLER, Thomas, J. Visualization of Transition in the Flow over an Airfoil Using the Smoke-Wire Technique, AIAA Journal, Vol. 19, No. 3 , pp. 340- 345, 1981

CENGEL Y. A., and CIMBALA J. M., Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, 3rd edition, McGraw-Hill, 2013.

FREYMUTH, P. Flow Visualization in Fluid Mechanics. Revue Science Instruments, vol. 64, n ° 1, pp. 1 -18, 1993

GAD-EL-HAK, M. Visualization Techniques for Unsteady Flows: An Overview. Journal of Fluids Engineering, vol. 110, pp. 231 – 243, 1998

GERSTEN, K., Immersed Bodies, Heat Exchanger Design Handbook - Single Phase Fluid Flow, v.2, pp.223.1-223.9, Hemisphere Publishing Co, 1983.

GOLDSTEIN, R. J., SPORES, R. A. Turbulent Transport on the Endwall in the Region Between Adjacent Turbine Blades, Journal of Heat Transfer, Vol.110, pp. 862-869, 1988

GORECKI, J. P. Túneis aerodinâmicos: passado, presente e futuro. Encit 88 – II Encontro Nacional de Ciências Térmicas. Águas de Lindóia – SP, 1988.

JOHNSTON, C.R., WILSON, D.J. A vortex pair model for plume downwash into stack wakes. Atmospheric Environment, 1996

KAWAMURA, T., HIWADA, M., HIBINO, T., MABUCHI, T., KUMADA, M. Heat transfer from a finite circular cylinder on the flat plate. Bulletin of the JSME 27, 1984

LANGSTON, L.S. Secondary Flows in Axial Turbines- A Review, Heat Transfer in Gas Turbine Systems, Annals of the New York Academy of Sciences, 934, pp. 11-26, 2001

NOR, M. A. M., DOL, S. S., KAMARUZAMAN, M. K. An Improved Smoke-Wire Flow Visualization Technique, 4th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics, pp. 231-236, 2006

PRANDTL, L., TIEJENS, O. G. Fundamentals of hydro and aeromechanics, 1st Dover Edition edition, 1957

POPE, A., Low Speed Wind Tunnel Testing, New York, N.Y., John Wiley& Sons, 1966.

SANTOS, Adalberto Rodrigo dos, Silva, Bruno Washington Xavier da, NETO, Francisco Santiago, LOPES, Laura Dias e DIONÍSIO, Thais Honório. Elaboração de túnel de vento para aplicação de ensaios aerodinâmicos, 2009

SADRAEY M., Aircraft Performance Analysis, Chapter 3, Drag Force and Drag Coefficient, 2009

SHARMA, O. P., BUTLER, T. L. Prediction of Endwall Losses and Secondary Flows in Axial Flow Turbine Cascades, ASME Journal of Turbomachinery 109: 21–28, 1987

SIEVERDING, C. H., VAN DEN BOSCHE, P. The use of coloured smoke to visualize secondary flows in a turbine- blade cascade, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 134, pp. 85-89, 1983

SUNMER, D. Flow above the free end of a surface-mounted finite-height circular cylinder: A review, *Journal of Fluids and Structures*, 2013

TANAKA, S., MURATA, S. An investigation of the wake structure and aerodynamic characteristics of a finite circular cylinder. *JSME International Journal*, 1999

VIEIRA, E. D. R. Estudo qualitativo e quantitativo de escoamentos ao redor de corpos não aerodinâmicos utilizando-se a técnica de visualização em meio hidrodinâmico, 1997

WIKIPEDIA, Túneis de Vento. Disponível em:

<https://pt.wikipedia.org/wiki/T%C3%BAnel_de_vento>. Acessado em: 10 de outubro de 2017.

ZDRAVKOVICH, M. M. Flow around circular cylinders, Oxford Science Publications, 1997