



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

TATIANE DOS SANTOS FERREIRA

**ESTABILIDADE DE PERFIL BIO-INSPIRADO (FAMÍLIA ASTERACEAE) EM
TÚNEL DE VENTO VERTICAL DE BAIXA VELOCIDADE**

CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
2019

TATIANE DOS SANTOS FERREIRA

**ESTABILIDADE DE PERFIL BIO-INSPIRADO (FAMÍLIA ASTERACEAE) EM
TÚNEL DE VENTO VERTICAL DE BAIXA VELOCIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me Vânio Vicente Santos de Souza

CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
2019

TATIANE DOS SANTOS FERREIRA

**ESTABILIDADE DE PERFIL BIO-INSPIRADO (FAMÍLIA ASTERACEAE) EM
TÚNEL DE VENTO VERTICAL DE BAIXA VELOCIDADE**

Trabalho apresentado a Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Mecânica.

Data da Aprovação: Cruz das Almas, Bahia ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof^o Me. Vânio Vicente Santos de Souza
Orientador: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof^o Me. Adelson Ribeiro de Almeida Junior
Avaliador I: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof^o Cliver da Rocha Silva
Avaliador II: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser a minha fonte de sustentação e sabedoria, sem ele a caminhada e a realização desse trabalho não seriam possíveis.

Agradeço a minha mãe, meu maior exemplo de vida e amor, pelo apoio e cuidado. Agradeço também por fazer dos meus sonhos ou seus sonhos de realização. Gratidão eterna.

Agradeço ao meu pai, pelos ensinamentos de vida, pelo carinho, cuidado e otimismo.

Agradeço a Eduardo Dórea, pelo cuidado, incentivo e apoio constante em minha vida. Tenho certeza que se eu conseguir ser um pouquinho do ser humano que é, já serei uma pessoa realizada.

A Regina, Eduarda, Joana e Erico, agradeço pelo acolhimento, pelo apoio e incansáveis incentivos e gestos de carinho.

A Uitalo Márcio, além do amor, carinho e companheirismo, agradeço por me fazer acreditar na minha capacidade e de que tudo daria certo.

Aos amigos, Laise Dias por ser essa pessoa tão presente em minha vida, a Vanessa Gomes pelos anos de amizade verdadeira, a Clecia Araújo pela disponibilidade e alegria.

A Edvane Leite, a leonina mais leonina que já conheci. Muito obrigada pelo apoio, pela linda amizade e por restaurar a minha confiança.

A Thiago Nascimento, pelas suas habilidades com desenho e por uma mensagem em especial que me enviou (João 16:33) no momento certo. Obrigada Amigo!

A minha irmã de vida, Talita Lorena, apenas por existir.

Ao professor Vânio Vicente, pelos ensinamentos de vida e pelas orientações.

Gratidão!

A sutileza humana nunca conceberá uma invenção mais bela, mais simples ou mais direta do que a natureza. Nas invenções da natureza nada falta e nada é supérfluo. (Leonardo da Vinci)

Dedico este trabalho aos meus pais Luzia Borges e José Ferreira, que em meio as dificuldades não medem esforços para manter vivo a realização dos meus sonhos. Minha base, minha vida devo as vocês!

RESUMO

O vasto campo de investigação do conhecimento existentes na natureza auxilia a engenharia nas descobertas de novos comportamentos ou mesmo no desenvolvimento de novos produtos. O presente trabalho tem como objetivo a investigação e análise de estabilidade em perfis bio-inspirados em sementes voadoras da família *Asteraceae* das espécies *T.officinale*, *T. dubius* e *C. cardunculu*, delimitando-se ao mecanismo de voo e comportamentos aerodinâmicos inerentes a geometria. O estudo possibilita o uso da biomimética, como uma ferramenta inovadora e inspirada na natureza, associada a aerodinâmica de elementos biológicos. Para viabilizar o desenvolvimento do trabalho foi necessário a aplicação dos conceitos fundamentais da Mecânica dos Fluidos, Aerodinâmica, Biomimética e configurações de túneis de vento. Para conceber o estudo, foi dimensionado e confeccionado um túnel de vento vertical de baixa velocidade, quatro perfis bio-inspirados e três laminadores de fluxo. Os resultados obtidos foram com base em análises dos registrados fotográficos e filmagens. Dos quatro perfis testados no túnel de vento vertical, três apresentaram estabilidade. Tal fato, confere ao túnel de vento validade para análises de estabilidade considerando limitações de massas de 0,3g a 0,5g e uma velocidade de $1,2 \text{ m.s}^{-1}$ na seção. O teste de escoamento realizado em apenas um perfil, possibilitou a visualização de linhas de corrente em torno do pappus e entre o filamentos. Foi atribuído aos perfis confeccionados e testados com êxito o título de semente sintética bio-inspirada. Os resultados apresentados no estudo tratam-se de dados baseados em análises reais, o que confere credibilidade ao que foi observado.

Palavras-Chave: Biomimética, Aerodinâmica; Sementes voadoras, Túnel de Vento Vertical.

ABSTRACT

The vast field of investigation of existing knowledge in nature helps engineering in the discovery of new behaviors or even in the development of new products. The objective of this work is to investigate and analyse the stability of bio-inspired profiles in flying seeds of the Asteraceae family of the species *T. officinale*, *T. dubius* and *C. cardunculu*, limiting themselves to the flight mechanism and aerodynamic behaviours inherent to geometry. The study allows the use of biomimetics, as an innovative and nature-inspired tool, associated with aerodynamics of biological elements. To enable the development of the work it was necessary to apply the fundamental concepts of Fluid Mechanics, Aerodynamics, Biomimetics and configurations of wind tunnels. To conceive the study, a low speed vertical wind tunnel, four bio-inspired profiles and three flow laminators were designed and manufactured. The results obtained were based on the analysis of photographic records and filming. Of the four profiles tested in the vertical wind tunnel, three showed stability. This fact gives the wind tunnel validity for stability analysis considering mass limitations from 0.3 g to 0.5 g and a speed of 1.2 m.s⁻¹ in the section. The flow test performed on only one profile allowed the visualization of current lines around the papus and between the filaments. The profiles prepared and successfully tested were assigned the title of bio-inspired synthetic seed. The results presented in the study are data based on real analyses, which gives credibility to what was observed.

Key Words: Biomimicry, aerodynamics, flying seeds, wind tunnel vertical.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Texturização de fuselagem bio-inspirado na pele de tubarão.....	19
Figura 2 - Turbina WhalePower inspirada nas nadadeiras das baleias.....	20
Figura 3 - Trem bala bio-inspirado em bico de pássaro.	21
Figura 4 - Monocóptero inspirado em semente voadora.	25
Figura 5 - (a) Dente-de-leão espécie <i>T. officinale</i> ; (b) Partes do dente-de-leão.	26
Figura 6 - (a) Procedimento experimental; (b) Experimento real.	26
Figura 7 - Anel de vórtice separado (SVR).	27
Figura 8 - (a) Túnel de vento vertical para simulações de objetos (b) Túnel de vento vertical para simulações de voo livre.	29
Figura 9 - Tubo de corrente com conservação de massa.....	32
Figura 10 - As linhas de corrente em um aerofólio com fluxo de baixa velocidade.	33
Figura 11 - (a) Escoamento Laminar em torno de um cilindro $Re \approx 1.10^1$. (b) Escoamento Turbulento em torno de um cilindro $Re \approx 1.10^5$	34
Figura 12- Modelo real e protótipo no interior do túnel de vento.	35
Figura 13 - Forças e momentos sobre um corpo arbitrário.....	36
Figura 14 - Perfil de asa submetidos as forças de arrasto e sustentação.	37
Figura 15 - Modelo representativo de alimentação de vórtices de Gerrard (1966).....	38
Figura 16 - Desprendimento cadenciado de vórtices para diferentes Re	39
Figura 17 - Dimensões básicas do túnel de vento vertical.	40
Figura 18 - Projeto das peças e montagem em Solidworks® do túnel de vento vertical.	41
Figura 19 - Seção de teste.....	43
Figura 20 - Tipos de colmeias: (a) circular (b) quadrada (c) hexagonal.	43
Figura 21 - Colmeia.....	44
Figura 22- Tela e ventilador.	45
Figura 23 - Dimensões do ventilador.	46
Figura 24 - Túnel de vento vertical.	47
Figura 25 - Modelo de anemômetro utilizado na medição da velocidade.....	48
Figura 26 - Pontos de tomada de velocidade.....	49
Figura 27 - Corpos de prova de geometria usuais.	50
Figura 28 - Diagrama de forças de um corpo submetido a um fluido.	50
Figura 29 - Material utilizado para confecção dos perfis.	52
Figura 30 - Corpos de prova com filete.....	53
Figura 31 - Balança analítica usada na pesagem dos perfis e filetes.....	53
Figura 32 - Teste inicial com protótipo bio-inspirado.....	55
Figura 33 - Utilização de uma esfera para perturbar o escoamento acima da área com filamentos.	56
Figura 34 - (a) Anel de vórtice separado SRV; (b) Esfera “quebrando” vórtice.....	57
Figura 35 - Teste com 4 perfis bio-inspirados.....	59
Figura 36 - Ângulos característicos dos perfis.	61
Figura 37 - Alturas alcançadas pelos perfis 1, 3 e 4.	62
Figura 38 - (a) Estrutura adaptada para visualização de escoamento; (b) Altura alcançada pelo perfil plástico.	63
Figura 39 - Visualização de escoamento no perfil bio-inspirado.	64

LISTA DE TABELA

Tabela 1- Sementes voadoras.	23
Tabela 2 - Dados de entrada.	41
Tabela 3 - Dados do ventilador.....	46
Tabela 4 - Dimensões dos corpos de prova de geometria definida.	51
Tabela 5 - Dados dimensionais dos perfis bio-inspirados.	54
Tabela 6 - Dados de velocidade.....	58
Tabela 7 - Valores de Re no papus e filamento.	59
Tabela 8 – Comparativo dos resultados obtidos.....	62

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Velocidade local do som
α_i	Coefficiente de energia cinética
A_t	Área da seção transversal do duto
C_A	Coefficiente de arrasto
C_S	Coefficiente de sustentação
D_{st}	Diâmetro da seção de teste
E	Empuxo
F_A	Força de arrasto
F_i	Forças de inércia
F_R	Força de resistência
F_S	Força de sustentação
F_μ	Forças viscosas
f_S	Frequência do desprendimento
g	Aceleração da gravidade
L	Comprimento
L_{st}	Comprimento total da seção de testes
M	Número de Mach
\dot{m}	Fluxo de massa
ρ	Massa específica
ρ_{Ar}	Massa específica do ar
P	Força peso
P_{atm}	Pressão atmosférica
Q_e	Vazão do ventilador

Re	Número de Reynolds
S	Separação do escoamento
S_t	Número de Strouhal
T	Temperatura
T_{Ar}	Temperatura do ar
τ_{yx}	Tensão de cisalhamento
μ	Viscosidade dinâmica
μ_{Ar}	Viscosidade dinâmica do ar
U_∞	Campo de velocidade uniforme
v	Velocidade do escoamento
ν_{Ar}	Viscosidade cinemática do ar
V	Velocidade
V_i	Velocidade média na seção
V_{sv}	Velocidade de saída do ventilador
V_{st}	Velocidade de saída da seção de teste
\bar{V}	Campo de velocidade
γ	Peso específico do fluido
$\frac{du}{dy}$	Taxa de deformação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
1.3	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	BIOMIMÉTICA E AERODINÂMICA	18
2.1.1	BIOMIMÉTICA NA ENGENHARIA	18
2.1.2	AERODINÂMICA SUAS APLICAÇÕES	21
2.1.3	AERODINÂMICA DE SEMENTES VOADORAS	22
2.1.4	PERFIS AERODINÂMICOS BIO-INSPIRADOS	24
2.1.5	PERFIL SEMENTE DA FAMÍLIA ASTERACEAE	25
2.2	TÚNEL DE VENTO VERTICAL	28
2.3	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	29
2.3.1	FLUIDOS E TIPOS DE ESCOAMENTOS	29
2.3.2	QUANTIDADES FÍSICAS BÁSICAS DE UM FLUIDO	31
2.3.3	EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE PARA ESCOAMENTOS	31
2.3.4	CAMPO DE ESCOAMENTO: LINHAS DE CORRENTE, LINHAS DE EMISSÃO, LINHAS DE TRAJETÓRIA	32
2.3.5	NÚMERO DE REYNOLDS	33
2.3.6	SEMELHANÇA DE ESCOAMENTOS	34
2.3.7	FENÔMENOS AERODINÂMICOS	36
2.3.7.1	ARRASTO E SUSTENTAÇÃO	36
2.3.7.2	VORTICIDADE	38
3	METODOLOGIA	40
3.1	PROJETO TÚNEL DE VENTO VERTICAL	40
3.2	COMPONENTES DE UM TÚNEL DE VENTO VERTICAL	42
3.2.1	SEÇÃO DE TESTE	42
3.2.2	COLMEIA	43
3.2.3	TELA	44
3.2.4	VENTILADOR	45
3.3	CONSTRUÇÃO DO TÚNEL DE VENTO VERTICAL	46
3.4	QUALIFICAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO VERTICAL	47

3.4.1	MAPEAMENTO DE VELOCIDADE.....	47
3.5	CONFECÇÃO E PADRONIZAÇÃO DOS PERFIS EXPERIMENTAIS	49
3.5.1	PERFIS DE GEOMETRIA DEFINIDA	49
3.5.2	PERFIL DE GEOMETRIA BIO-INSPIRADA	51
3.5.1.1	TESTE INICIAL COM PROTÓTIPO	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1	ENSAIOS NO TÚNEL DE VENTO VERTICAL.....	58
4.1.1	DADOS DE VELOCIDADE	58
4.1.2	DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS	58
4.1.3	TESTE COM PERFIS BIO-INSPIRADOS	59
4.1.4	TESTE DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO NO PERFIL BIO-INSPIRADO.....	63
5	CONCLUSÕES.....	65
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
6	REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS	67
7	APÊNDICES.....	70
	APÊNDICE A: CAMADA LIMITE A SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE	70
	APÊNDICE B: CÁLCULOS REALIZADOS	72
	APÊNDICE C: REGISTROS FOTOGRÁFICOS E TRATAMENTO DE IMAGEM.....	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO

Desde os primórdios até as conjunturas atuais, o homem tenta imitar a natureza, no intuito de solucionar os problemas que os rodeiam. A natureza tem oferecido uma gama de modelos naturais como fonte de inspiração para desenvolvimento científico, tecnológico e soluções sustentáveis.

Nesse contexto, a Biomimética surge com proposta de utilizar a natureza como mentora, medida e modelo para inovar em projetos, produtos, processos, serviços e sistemas. Trata-se de uma ciência e seu conhecimento pode ser aplicado em diversos domínios, tais como na engenharia, biologia, design, administração, medicina, futurismo e tecnologia, etc.

A biomimética inspira solução aerodinâmica aplicada a diversos fins. Um exemplo, cita-se a literatura de Cummins *et al.* (2018) que defende a teoria que o mecanismo de voo utilizado por sementes de dente-de-leão pode ser a chave para uma nova forma de voar. Segundo Cummins *et al.* (2018), a sustentação das sementes de dente-de-leão é beneficiada por uma bolha de ar que permite um voo estável.

Pertencente à família Asteraceae, do gênero *Taraxacum*, o dente-de-leão é uma semente denominada voadora e, flutuam no ar devido a uma estrutura semelhante a de um paraquedas, mas ao contrário deste, essa estrutura apresenta lacunas, ou seja, uma estrutura plumada. Tal fato permite o ar fluir em torno e através dos filamentos, gerando um vórtice. O ar no interior do vórtice, ao girar continuamente, gera uma bolha de baixa pressão, e esta bolha suga a semente do dente-de-leão para cima.

Apoiado pela biomimética e inspirado no estudo desenvolvido por Cummins *et al.* (2018), o presente trabalho propõe uma investigação e análise de estabilidade de perfis bioinspirados utilizando um túnel de vento vertical de baixa velocidade como aparato experimental.

O túnel de vento, por sua vez, é um equipamento utilizado para análises experimentais do comportamento do ar ao redor de objetos sólidos, tornando possível a obtenção de dados qualitativos e quantitativos de variáveis como velocidade, pressão, forças de sustentação e arrasto provenientes de escoamentos sobre estruturas projetadas, como edifícios, automóveis, aeronaves e turbinas. É possível avaliar características aerodinâmicas citadas em projetos durante sua fase conceitual, antes do mesmo ir para a fase de testes de campo, podendo-se obter informações importantes para previsão de limitações de projeto.

Dada relevância de tal aparato para o estudo da aerodinâmica, e para viabilizar que as análises com perfil bio-inspirado seja possível, será necessário o dimensionamento e construção de um túnel de vento vertical em escala reduzida.

O desenvolvimento desse trabalho possibilitará explorar uma gama de conceitos fundamentais, partindo da Biomimética e suas aplicações, até a Mecânica dos Fluidos, Aerodinâmica e áreas relacionadas. O ponto em comum entre todas essas ciências, é sem dúvida, a natureza e os seus comportamentos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar estabilidade de perfil bio-inspirado utilizando um túnel de vento vertical em escala reduzida e de baixa velocidade como aparato experimental.

1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar o conceito de Biomimética atrelado a engenharia;
- Dimensionar, construir, avaliar e qualificar um túnel de vento vertical em escala reduzida para a realização de experimentos;
- Confeccionar e testar laminador de fluxo;
- Confeccionar e testar estabilidade perfis de geometria distintas;
- Confeccionar e testar estabilidade de perfis bio-inspirado na aerodinâmica da semente pertencente à família *Asteraceae*.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Justifica-se o desenvolvimento do trabalho pela necessidade de construção de um túnel de vento vertical. No cenário atual, pouco se tem informações a respeito dessa configuração de túnel de vento para fins experimentais, sabe-se da sua utilização em simulações de queda livre de objetos, e por paraquedistas, a fim de treinar técnicas e movimentos no ar.

O dimensionamento e confecção do túnel de vento vertical em questão será para efetuar as análises de estabilidade em perfis bio-inspirados, tal fato, confere a estrutura uma redução de escala e uma baixa velocidade. No entanto, não descarta-se a possibilidade de seu uso para outras finalidades, ou mesmo, como inspiração para construção de nova estrutura.

Dois pontos inovadores serão tratados nesse estudo, o primeiro é a utilização de colmeias múltiplas, cuja finalidade é a laminarização do fluxo de ar no interior do túnel. Os testes efetuados com essa disposição de colmeias avaliarão sua utilização validando-a ou não.

O segundo ponto, não menos importante, é o aproveitamento de uma geometria não convencional inspirada em uma semente voadora como proposta de um perfil aerodinâmico. Cummins *et al.* (2018) em sua literatura, associa o mecanismo de voo de uma semente voadora a um nova forma de voar. Investigar as estratégias usadas pelas sementes voadoras que permite um voo estável, abre um leque de descobertas e possibilidades de aplicação na engenharia.

Nesse contexto, estabelece-se uma ponte entre os conhecimentos da biomimética voltados para aerodinâmica, basicamente o uso de elementos biológicos como inspiração para criação de novos design e/ou soluções de problemas. O estudo na conjuntura atual, é uma proposta totalmente nova, não só pelos motivos citados mas, pela inexistência de literaturas nacionais que abordem esse tema.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo está dividido em cinco seções: introdução, referências bibliográficas, metodologia, resultados e discussões, e conclusão.

Na introdução, seção de contextualização acerca do tema, apresentação dos objetivos geral e específicos e a justificativa do trabalho.

Na referência bibliográfica encontra-se todos os conceitos fundamentais e pesquisas resultantes acerca do tema, cujo serão abordados os pontos pertinentes e significativos para o desenvolvimento do trabalho.

Na metodologia, seção onde seção que descreve todo o processo construtivo do trabalho, expondo o dimensionamento e confecção dos corpos de prova e aparato experimental. Será abordado também a metodologia utilizada para a realização dos testes e uma prévia do resultado de um teste inicial.

Nos resultados e discussões serão apresentados os resultados obtidos dos testes efetuados, e discutidos os pontos convenientes com base nas teorias. Por fim, a conclusão, exhibe as considerações do estudo desenvolvido, assim como sugestões de propostas futuras a serem desenvolvidas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BIOMIMÉTICA E AERODINÂMICA

2.1.1 BIOMIMÉTICA NA ENGENHARIA

A humanidade ao longo da evolução utilizou diversas palavras para descrever o uso do conhecimento provenientes da natureza como fonte de inspiração. Desde a década de 60, em que o processo de copiar ou retirar ideias do mundo natural era a função de uma ciência intitulada como Biônica (GERARDIN, 1968, apud.RAMOS; SELL,1994, p.97). Atualmente a ciência que estuda e imita os diversos sistemas naturais é denominada de Biomimética.

A ciência Biomimética (do grego *bios*, significa vida, e *mimesis*, significa imitação) é uma ferramenta inovadora e inspirada na natureza, que visa soluções sustentáveis por meio de padrões e estratégias de sobrevivência dos sistemas biológicos.

Benyus (2003) denomina a Biomimética como uma imitação consciente da genialidade da vida, e acrescenta que:

Numa sociedade acostumada a dominar ou “melhorar” a natureza, essa respeitosa imitação é uma abordagem inteiramente nova, uma verdadeira revolução. Diferentemente da Revolução Industrial, a Revolução Biomimética inaugura uma era cujas bases assentam não naquilo podemos extrair da natureza, mas no que podemos aprender com ela

Como mencionado, a Biomimética, não tenta apenas imitar a natureza o objetivo maior é obter conhecimento por meio de observações minuciosas e categóricas de seus elementos biológicos e aplicar seus conceitos em soluções de problemas e na produção de artefatos. Benyus (2003) apresenta a Biomimética por meio de três visões ligadas a natureza, são elas: a natureza como modelo, a natureza como medida e por fim, a natureza como mentora.

A natureza como modelo trata-se “A biomimética imita os modelos da natureza, ou inspira-se neles ou em seus processos, para solucionar os problemas humanos; uma célula de energia solar, por exemplo, inspirada numa folha” (BENYUS, 2003 p.8).

A natureza como medida, a visão é “A biomimética usa um padrão ecológico para ajuizar a correção das nossas inovações. [...] a natureza aprendeu: O que funciona. O que é apropriado. O que dura” (BENYUS, 2003 p.8).

Por fim, a visão da natureza como mentora “A biomimética é uma nova forma de ver e valorizar a natureza. [...] inaugura uma era cujas bases assentam não naquilo podemos extrair da natureza, mas no que podemos aprender com ela” (BENYUS, 2003 p.8).

Executando ações à maneira da natureza, a forma de alimentar, aproveitar energia, fabricar produtos, meios de cura, armazenamento de informações e administração dos negócios, podem ser modificados (BENYUS, 2003), estabelecendo um elo de sintonia entre os habitantes, sua casa e o planeta.

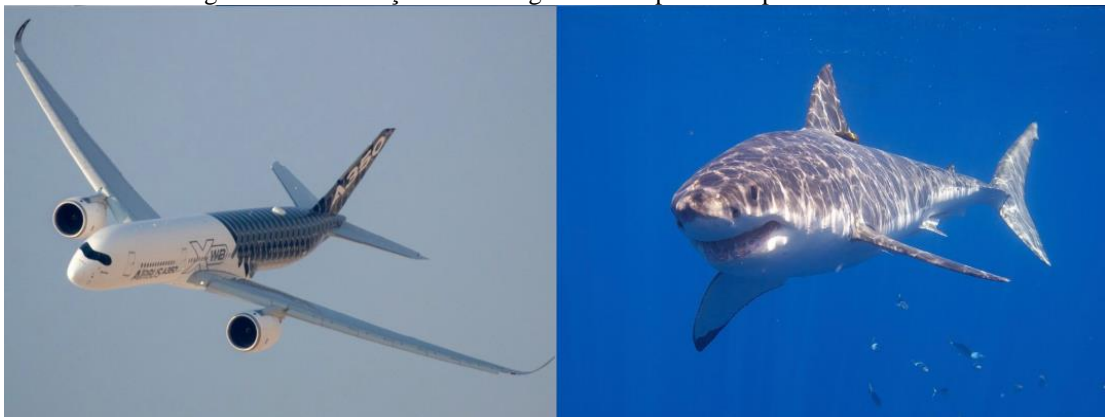
Os comportamentos e formas biológicas encontradas na natureza oferecem um vasto campo de conhecimento e ideias para uma possível aplicação nas estruturas de engenharia. Martins (2012) justifica a natureza como uma fonte de inspiração devido ao fato dos sistemas biológicos terem conseguido sobreviver milhares de anos adaptando-se ao meio predominante, utilizando os recursos da natureza de curiosa e eficiente.

Em virtude dos fatos expostos, arrisca-se afirmar que essa Revolução da Biomimética pode ser a mais desafiadora e, talvez a ferramenta mais importante do século 21 na solução de problemas de forma mais sustentável, atreladas a engenharia e tecnologia.

A biomimética contribuiu de forma bastante significativa no campo da aerodinâmica. Engenheiros da Airbus estudam o mundo natural objetivando soluções modernas de projeto de aeronaves, os últimos estudos foram voltados para pele de tubarão. Os tubarões são famosos por sua velocidade através da águas, mas, a morfologia de sua pele não é lisa e sim escamada com arestas, denominadas de "denticulos", o que curiosamente não impacta negativamente em sua velocidade.

Visto isso, nos últimos dois anos, a Airbus com intuito de imitar o efeito da pele do tubarão, aplicou nas asas e fuselagens de alguns jatos um superfície texturizada com pequeno denticulos. Os teste chegaram ao resultado de que o efeito encontrado proveniente da pele do tubarão reduz o arrasto de forma eficaz e essa aplicação é altamente recomendada para aeronaves de longo alcance. A Figura 1 exhibe a texturização da pele de tubarão na aeronave.

Figura 1- Texturização de fuselagem bio-inspirado na pele de tubarão.



Fonte: Airbus

Outro exemplo a ser citado é a turbina eólica WhalePower que tem o design da lâmina, inspirada no formato das nadadeiras de baleias, ilustrados na Figura 2. Fish (2011) autor do estudo, relata a concepção como uma maneira eficiente de gerar energia eólica. As lâminas nervuradas desse tipo de turbina eólica produzem 32% menos atrito e 8% de deslocamento de ar que as lâminas lisas convencionais. Fish (2011) acredita na possibilidade desse design se utilizado em projetos aeronáuticos, de hélices para helicópteros, pás de ventiladores e asas de aeronaves.

Figura 2 - Turbina WhalePower inspirada nas nadadeiras das baleias.



Fonte: The Word has Power. (Disponível em:< <http://thewordhaspower.com/conheca-a-ciencia-que-busca-na-natureza-solucoes-para-problemas-da-humanidade/>>).

Nesse cenário de inovações inspirados pela natureza, o trem bala de Shinkansen, localizado no Japão, tem seu design inspirado no pássaro Martim-Pescador. O trem-bala japonês apresentava uma explosão sonora produzido pelo deslocamento no ar, ocasionado antes do trem entrar em túneis, causava ondas de choque e danos estruturais. A solução do problema foi encontrado na forma aerodinâmica do bico do Martim-Pescador, geometria ideal para mergulhos com quase nenhuma perturbação na água. Após testes, o formato reduziu drasticamente o ruído, o consumo elétrico e aumentou a velocidade. É possível visualizar essa semelhança na Figura 3.

Figura 3 - Trem bala bio-inspirado em bico de pássaro.



Fonte: QuercusAmbiente (Disponível em: <https://quercusambiente.pt/tag/biomimetica/>)

A biomimética defende a utilização da natureza de forma consciente inverso da exploração, o que reforça a ideia de sustentabilidade. As inspirações citadas só enaltecem cada vez mais a importância da biomimética como uma ciência inovadora, ferramenta para novas concepções e soluções de problemas existentes. Áreas como a arquitetura, design, biologia e engenharias são as que mais beneficiam dessa ciência.

Na natureza os sistemas biológicos funcionam de uma forma curiosamente perfeita, não existe desperdícios de energia, o que existe é cooperação, diversidade, adaptação ao meio, todos esses pontos bastante otimizados.

2.1.2 AERODINÂMICA SUAS APLICAÇÕES

Um dos principais ápices na evolução dos veículos automotores é o estudo da aerodinâmica.

Segundo Larica (2003, p.216):

A aerodinâmica é um campo de pesquisa que lida com a mecânica dos fluidos, e não deve ser considerada somente quando se dirige em alta velocidade (com relação ao design automotivo), mas, também, para garantir estabilidade, melhorar com a eficiência do motor, reduzir o consumo de combustível, diminuir o desperdício de material e preservar o meio ambiente.

O estudo dos fenômenos que envolvem a aerodinâmica é de fundamental importância para os projetos de aeronaves, navios, carros, antenas, pontes, entre outros, visando a melhoria do desempenho e do fator segurança.

Rodrigues (2014) retrata a aerodinâmica como o estudo dos movimentos e interações de corpos fluidos, consistindo em movimentos de fluidos gasosos relativo às suas propriedades e características, e as forças que exercem em corpos sólidos nele submersos.

White (2011) define aerodinâmica como o estudo da interface do ar com os objetos, que possibilita a análise do comportamento do ar segundo as leis básicas da dinâmica dos fluidos.

Uma aplicabilidade do estudo da aerodinâmica é em projetos de aeronaves, onde aspectos para definir uma melhor configuração aerodinâmica de aeronave são estudados, considerando pontos relevantes como o cálculo estrutural visando um melhor desempenho e estabilidade da aeronave (RODRIGUES, 2014).

O estudo da aerodinâmica vai muito além da sua aplicação em projetos de aeronaves ou carros de alta performance, ela é de extrema importância em estudos de novos design de produtos que buscam um melhor desempenho aerodinâmico e que tenham como diferencial uma relação direta com o ar ou água.

2.1.3 AERODINÂMICA DE SEMENTES VOADORAS




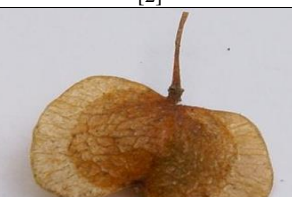



Uma das funções importantes das sementes é a dispersão, mecanismo para estabelecer as sementes portadoras de embriões em um local adequado longe de suas plantas parentais. Determinadas plantas espalham suas sementes sem a interferência de agentes externos, enquanto outras dependem de agentes dispersantes, entre eles o vento (anemocoria), a água, animais ou o homem.

O método de dispersão de semente por anemocoria é importante pelas distâncias alcançadas devido a capacidade de flutuação no ar. Além de leves, essas sementes podem apresentar características morfológicas, tais como alas e plumas, que auxiliam de forma facilitadora no transporte (PERES, 2016).

Algumas sementes apresentam uma estrutura que aumenta força de resistência do ar sobre eles, fazendo-os cair mais devagar e permitindo que o vento os leve para mais longe. Essas sementes superam muitas vezes as sementes sintéticas feitas pelo homem, pois chegam suportar uma carga maior do que o seu próprio peso e mesmo assim estabilizam-se durante a queda.

A capacidade de voo das sementes estão ligadas a sua geometria, bem como o seu desempenho aerodinâmico. Destacam-se quatro principais tipos de voos de sementes, sendo eles: tipo paraquedas, tipo helicóptero, tipo girante e tipo planador, essa classificação está exposta na Tabela 1.

Tabela 1- Sementes voadoras.

CLASSIFICAÇÃO SEMENTES VOADORAS		
Tipo	Semennte	Descrição
Tipo Helicóptero <i>(Whirlybirds)</i>	 [1]	Box Elder Família: Aceraceae Gênero: Acer Espécie: Acer negundo
	 [2]	Whirling nut Família: Gyrocarpaceae. Gênero: Gyrocarpus Espécie: G. americanus
Tipo Planador <i>(Gliders)</i>	 [2]	Alsomitra macrocarpa Família: Cucurbitaceae Gênero: Alsomitra Espécie: A. macrocarpa
Tipo Girante <i>(Spinner)</i>	 [3]	Dodonaea viscosa Família: Sapindaceae Gênero: Dodonaea Espécie: D. viscosa
Tipo Paraquedas <i>(Parachutes)</i>	 [4]	Taraxacum officinale Família: Asteraceae Gênero: Taraxacum Espécie: T. officinale
	 [5]	Tragopogon dubius Família: Asteraceae Gênero: Tragopogon Espécie: T. dubius
	 [6]	Cynara cardunculus Família: Asteraceae Gênero: Cynara Espécie: C. cardunculus

Fonte: Autor, 2019 Figuras: [1] Seidel *et al.* (2017); [2] ©W.P. Armstrong (2007); [3] Commons. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dodonaea_viscosa_2x_%26_3xwinged_fruits.JPG>; [4] Thinkstock; [5] Seed Plant. Disponível em: <<https://botany.cz/en/seeds/>>; [6] Disponível em: <<http://www.itsnotworkitsgardening.com/2011/05/dried-forgotten-wonderful.html>>.

2.1.4 PERFIS AERODINÂMICOS BIO-INSPIRADOS

O estudo de perfis aerodinâmicos provocou uma grande revolução no estudo da aerodinâmica. Um perfil aerodinâmico é uma seção bidimensional projetada com a finalidade de se obter uma reação aerodinâmica devido o escoamento do fluido ao seu redor. Com a variação da quantidade de movimento é possível decompor as forças aerodinâmicas em ângulos normais a direção de seu movimento.

Os perfis aerodinâmicos possuem uma vasta aplicabilidade, principalmente na indústria aeronáutica que é usado para criar sustentação e na indústria automobilística voltado para criar um *downforce* (força de sustentação negativa). Em aeronaves são utilizados como asas, sua geometria e performance afetam de modo geral o funcionamento do mesmo, visando compreender e obter um melhor desempenho dos principais fatores que afetam seu funcionamento tem-se o compromisso de maximizar a razão entre o coeficiente de sustentação e o coeficiente de arrasto.

Os benefícios do estudo dos sistemas bio-inspirados podem ser vistos em muitas aplicações, incluindo aerodinâmica de veículos terrestres e aéreos, estruturas, materiais multifuncionais, robôs, entre outros. O termo bio-inspirado vem sendo difundido nos meios científicos, e já está vinculado no trabalho de diversos cientistas (engenheiros, químicos, físicos, biólogos) que visam copiar os processos biológicos e aplicá-los em diferentes áreas tecnológicas e científicas.

Um perfil é dito bio-inspirado quando sua geometria e estratégia são baseados em estruturas e sistemas biológicos. A Figura 4 mostra a aplicação da geometria da semente tipo helicóptero da espécie *Acer negundo* no projeto de um Monocóptero. O veículo aéreo é composto por uma única asa que funciona da mesma maneira que a semente, é mantido uma rotação que permite que o mesmo plane de forma controlada.

Figura 4 - Monocóptero inspirado em semente voadora.



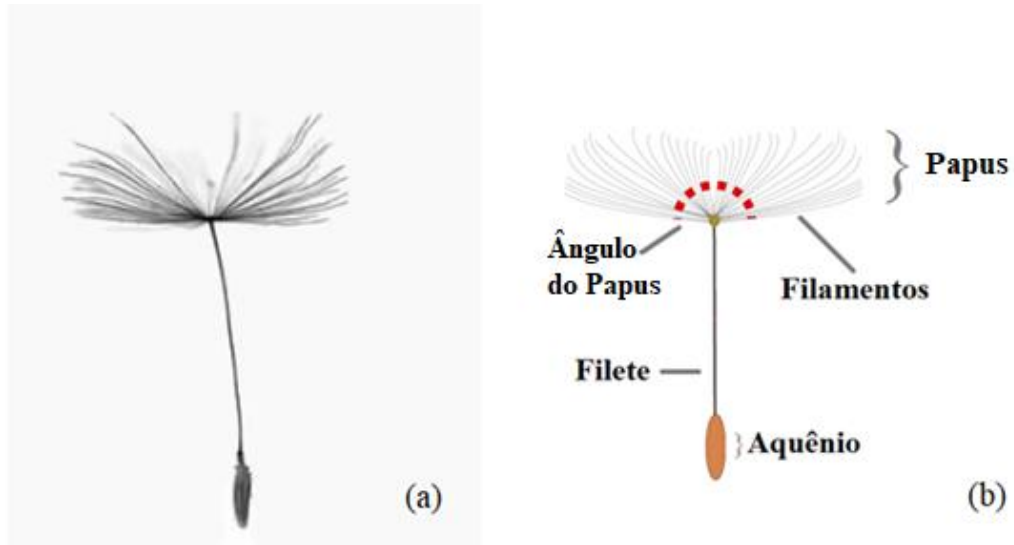
Fonte: Erick Schurr (Disponível em:< <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=microplanador-inspirado-semente-giratoria&id=010180091208#.XTKHFuhKjDc>>).

2.1.5 PERFIL SEMENTE DA FAMÍLIA ASTERACEAE

Segundo Andenberg *et al.* (2007) a família *Asteraceae* é uma das maiores de plantas e compreende cerca de 1.600 gêneros e 23.000 espécies. Barroso *et al.* (1991) e Nakajima & Semir (2001), afirmam que só no Brasil essa família representa aproximadamente 180 gêneros e 1.900 espécies.

Dentre as sementes dispersas por anemocoria, destacam-se as sementes com plumas, pertencentes a família *Asteraceae*. Um exemplo bastante conhecido dessa família é o dente-de-leão, pertencente a classe *Taraxacum*, apresenta um aquênio preso a um filete com um papus plumoso formado por filamentos eriçados, o ângulo de ataque do papus se altera com dispersão pelo vento. A Figura 5 ilustra um dente de leão da espécie *Taraxacum officinale* e as partes que o compõe.

Figura 5 - (a) Dente-de-leão espécie *T. officinale*; (b) Partes do dente-de-leão.

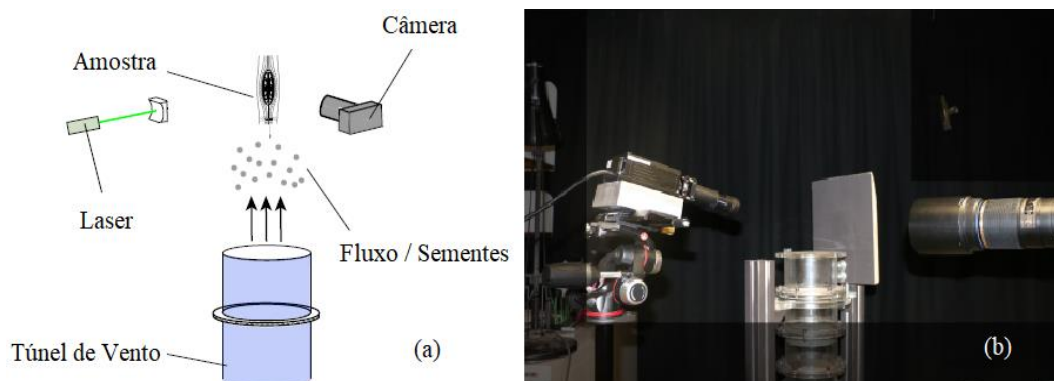


Fonte: (a) Cummins *et al.* (2018) (b) Seale *et al.* (2019) – (adaptado)

O papus tem como função prolongar a descida da semente e servir de orientação para a semente. A descida das sementes de dente-de-leão são estáveis e com uma velocidade constante. Sabe-se que para sementes dispersas pelo vento, manter a estabilidade enquanto maximiza o tempo de descida em vento turbulento beneficia a dispersão a longa distância. Cummins *et al.* (2018) afirma não compreender o porquê das sementes plumadas optarem por papus eriçados do que uma membrana semelhante a uma asa, como encontrado em outras espécies com geometria alada.

Tal fato culminou Cummins *et al.* (2018) analisar o mecanismo de voo do dente -de-leão da espécie *T.officinale*, caracterizando a dinâmica do fluido e características do papus que permite uma estabilidade no voo. As análises foram realizadas em um túnel de vento vertical, cuja finalidade das sementes eram pairar a uma determinada altura para verificação do fluxo em torno do papus. O procedimento experimental encontra-se exibido na Figura 6.

Figura 6 - (a) Procedimento experimental; (b) Experimento real.

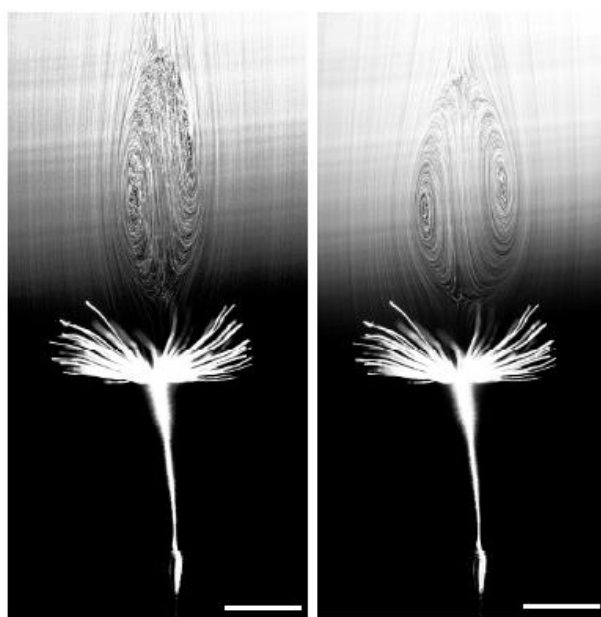


Fonte: (a) e (b) Cummins *et al.* (2018) – (adaptado)

Um comportamento até então desconhecido foi encontrado, as análises de fluxo foram registrados por fotografias e filmagens, evidenciando uma bolha de ar estável, denominada posteriormente de anel de vórtice separado (SVR - *separated vortex ring*) do corpo mas fixa a uma determinada distância do papus.

A ocorrência do SVR foi cogitada teoricamente porém, de forma muito instável, o que verifica-se nos registros é que o design do papus estabiliza o anel de vórtice. Não está claro como o papus pode gerar um anel de vórtice com uma interface de estrutura de ar tão limitada (CUMMINS *et al.*, 2018). É possível visualizar o SVR na Figura 7.

Figura 7 - Anel de vórtice separado (SVR).



Fonte: Cummins *et al.* (2018)

Cummins *et al.* (2018) explica que o papus de um dente-de-leão se beneficia de um comportamento intitulado de “efeito de parede”, que trata-se de uma forte interação entre os filamentos, o que provoca uma redução considerável no fluxo de ar através do papus. Tal efeito confere um alto coeficiente de arrasto e, ajuda a semente a permanecer no ar.

Instigado pelo estudo do mecanismo de voo de um dente-de-leão, pressupõe-se que perfis aerodinâmicos bio-inspirados na geometria do papus dessas sementes possam gerar comportamentos novos ou semelhantes. Acredita-se que a estratégia usada por essas sementes pode ser caminho para uma nova forma de voar.

2.2 TÚNEL DE VENTO VERTICAL

O túnel de vento é uma ferramenta de pesquisa que propicia a visualização do efeito do fluido em torno de um objeto sólido. Segundo Blessmann (1990), o túnel de vento desenvolvido pelo estudioso Francis Herbert Wenham no ano de 1871 na Inglaterra para a “Aeronautical Society of Great Britain” foi provavelmente o primeiro construído. O autor acrescenta que ao final do século XIX, a melhor maneira de testar modelos aerodinâmicos e estudar os fenômenos de um escoamento era por meio de túneis de vento.

A evolução do túnel de vento se deu devido a necessidade de desenvolver produtos e técnicas que otimizasse a qualidade do escoamento, objetivando a uniformidade na seção de testes, da velocidade, da pressão e da temperatura, ausência de rotação e de velocidades transversais, de vorticidade, uniformidade temporal, ausências de oscilações ou de pulsações, entre outros pontos.

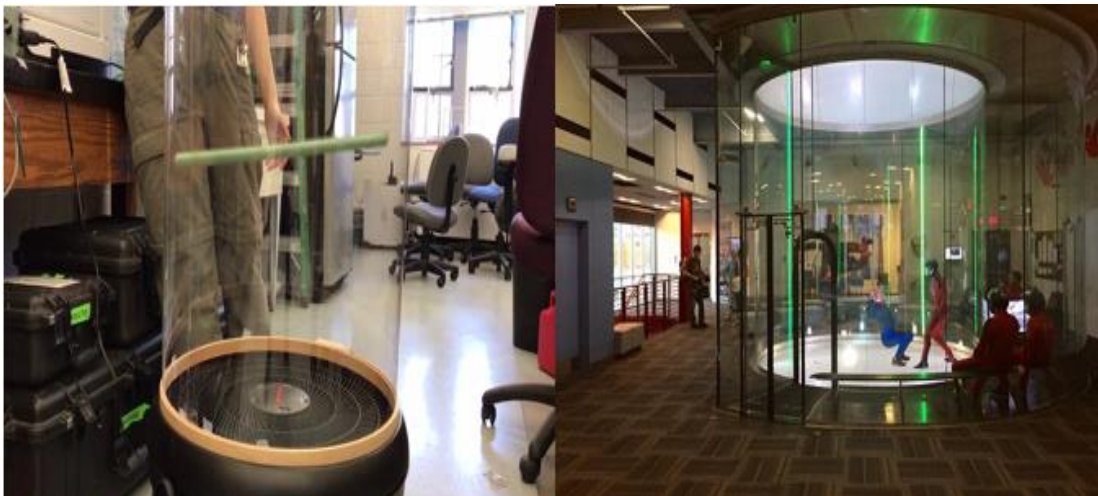
Segundo Junior (2009) para garantir os pontos citados anteriormente, torna-se necessário a utilização de alguns meios, ou a realização de alterações construtivas, tais como: grandes razões de contração, colmeias retificadoras e telas, cuidados para evitar descolamentos, nos difusores, ou em qualquer parte do circuito, como a colocação de direcionadores de fluxo.

As dimensões de um túnel de vento são variáveis, desde túneis de pequeno porte onde os testes são realizados em protótipos, a instalações em que a dimensão da câmara de ensaio seja grande o suficiente para realizar testes com aeronaves e automóveis em escalas reais (COUTINHO, 2014). O modelo de um túnel de vento é determinado de acordo com os objetivos que se deseja alcançar, levando em consideração a viabilidade econômica e condições experimentais, pois, os custos da manutenção e operacionalização são altos.

Existem várias configurações de túneis de vento. Dentre os parâmetros importantes destacam-se os de posição de construção, o tipo de circuito e a velocidade do fluxo (GORECKI, 1988).

Conforme a posição pode ser horizontal ou vertical, segundo Barlow *et al.* (1999) é mais usual os modelos de túneis de vento na posição horizontal, devido a sua praticidade de manuseio e menor custo na construção. Os túneis de ventos verticais, não menos importantes, é comumente utilizado para ensaio de queda livre, plainar e como simulador de paraquedismo. Em túneis verticais é mais comum o uso de seções circulares. A Figura 8 exhibe dois modelos de túneis de vento vertical com seções de geometria circular utilizados em simulações distintas.

Figura 8 - (a) Túnel de vento vertical para simulações de objetos (b) Túnel de vento vertical para simulações de voo livre.



Fonte: (a) Vídeo “First test of a vertical wind tunnel for schools”, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=_K36KDyttO4>. (b) iFLY Indoor Skydiving, localizado em Chicago

De acordo com Barlow et al. (1999) a maioria dos túneis de vento usam o ar como fluido de trabalho. Apesar dos gases serem considerados compressíveis e sua massa específica variar conforme a temperatura e a pressão, geralmente considera-se a massa específica do ar como constante nas condições normais de temperatura e pressão.

Embora existam diversos tipos de túneis de vento com diferentes finalidades, o escopo deste trabalho limita-se na construção de um túnel de vento vertical com características de câmara aberta e circuito aberto, para realização de análises de escoamento e estabilidade em perfis de geometrias distintas.

2.3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.3.1 FLUIDOS E TIPOS DE ESCOAMENTOS

A mecânica dos fluidos surge por volta do século vinte visando o estudo comportamental dos líquidos e dos gases tanto em equilíbrio quando em movimento. Essa mecânica aplicada abrange um universo de variáveis, partindo desde o estudo do escoamento de sangue nos capilares, até o escoamento do petróleo por meio de um oleoduto, considerando a variação dos seus diâmetros (MUNSON, 2004).

Pode-se definir fluido como a substância que se deforma continuamente quando submetida a uma tensão de cisalhamento de qualquer valor. A tensão cisalhamento é originada por forças que tangenciam dada superfície (MUNSON, 2004). Em outras palavras, define-se que o fluido como substâncias capazes de escoar. A resistência que um fluido apresenta ao

escoamento devido a força de atrito que age internamente é denominado de viscosidade (ÇENGEL, 2007).

Os fluidos têm uma ampla gama de viscosidades, como por exemplo, mover-se através do ar é muito mais fácil, do que o movimento pela água, o ar apresenta uma baixa viscosidade, enquanto a viscosidade da água é 50 vezes maior. White (2011) afirma que para fluidos comuns como ar, água e óleo apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação resultante. Todo fluido que obedece a relação dada pela equação (1) é dito um fluido newtoniano.

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

Onde, τ_{yx} é a tensão de cisalhamento e $\frac{du}{dy}$ é a taxa de deformação por cisalhamento.

Uma das linhas de estudo do comportamento dos fluidos se dá em termos da presença dos efeitos viscosos e resistência a variação de morfologia (FOX, 2006), tal premissa implica que não existe fluidos com viscosidade nula, o que existe é a quantificação da ação da força de atrito no fluido. Quando essa ação é de forma significativa é dito que o fluido é viscoso, situação reversa é denominado de fluido invíscido.

Os fluidos oferecem pequenas resistências à mudança de forma, podendo ser basicamente divididos em compressíveis e incompressíveis. Anderson Jr. (2015) afirma que toda matéria é compressível, o que difere é o nível de compressibilidade.

Define-se escoamento compressível como o fluxo no qual a variação da massa específica não é desprezível, situação onde a massa específica é constante denomina-se de escoamento incompressível (FOX, 2006).

Uma outra classificação em termos do tipo de escoamento, é interno e o externo. Os escoamentos internos sofrem influência da viscosidade em todo o campo do escoamento, a classificação é em função do tipo de regime, sendo estes laminar, de transição e turbulento, determinado pelo número de Reynolds. Em contrapartida, os efeitos viscosos nos escoamentos externos estão restritos as camadas-limites próxima das superfícies sólidas, regiões de esteira e jusante dos corpos (ÇENGEL, 2007). Além disso, os corpos submersos estão submetidos a uma força, quando decomposta, resulta na força de arrasto e na força de sustentação.

Escoamentos internos são escoamentos totalmente envoltos por superfícies sólidas, contrário ao escoamento externo, que se trata de escoamentos sobre corpos imersos num fluido limitado. Ambos podem ser laminadores ou turbulentos, compressíveis ou incompressíveis (FOX, 2006).

Um regime é dito laminar quando as partículas fluidas se movem de forma ordenada, em camadas lisas sem alteração na velocidade. Turbulento, ao contrário do laminar, as partículas fluidas se movimentam de forma desordenada, onde as camadas se misturam ao longo do escoamento gerando uma série de pequenos redemoinhos. Por fim, o regime de transição que é caracterizado em um intermédio entre o regime laminar e um regime caótico (turbulento) (FOX,2006).

2.3.2 QUANTIDADES FÍSICAS BÁSICAS DE UM FLUIDO

O estudo dos fluxos é importante devido a sua vasta aplicação. As quantidades físicas fundamentais de um fluido dentro da aerodinâmica são a pressão, massa específica, temperatura, velocidade de fluxo e linhas de corrente.

Considerando o gás como o fluido em questão, Anderson Jr. (2015) afirma que a pressão é uma das variáveis mais importante na aerodinâmica e a define como uma força por unidade de área que atua em uma superfície em virtude da taxa temporal de mudança da quantidade de movimento das moléculas que colidem em tal superfície. É designado pelo símbolo (p). A massa específica, por sua vez, como o próprio nome sugere é a massa de uma determinada substância por unidade de volume, é representada pelo símbolo (ρ). A massa específica em qualquer ponto do fluido pode variar com o tempo, a representação do campo gerado pela massa é dado pela equação (2).

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (2)$$

O campo representado acima é um campo escalar, devido a massa específica ser uma quantidade escalar.

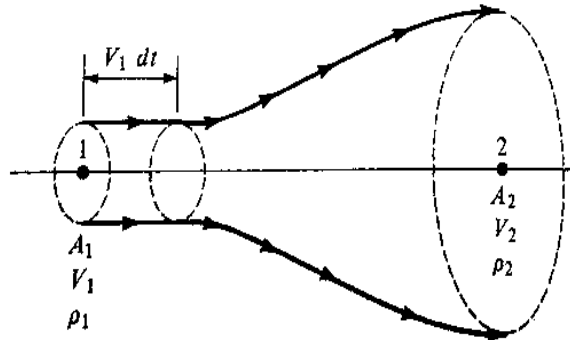
Temperatura, é uma medida da energia cinética média das partículas em questão, simbolicamente representada por (T) (ANDERSON JR., 2015).

2.3.3 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE PARA ESCOAMENTOS

A Equação da Continuidade é uma linguagem matemática ligada a um princípio físico fundamental aplicado a um fluxo aerodinâmico que assume que a massa é conservada (ANDERSON JR.,2015).

A Figura 9 mostra um tubo de corrente com um fluido confinado com área transversal perpendicular ao fluxo, o diâmetro do tubo de corrente se altera a decorrer do ponto 1 ao ponto 2.

Figura 9 - Tubo de corrente com conservação de massa.



Fonte: Anderson Jr. (2015)

Na seção 1 existe uma área A_1 , uma velocidade de fluxo V_1 e uma massa específica ρ_1 . Após um intervalo de tempo dt , um elemento de fluido se move a uma $V_1 dt$ em direção a seção 2 (A_2, V_2, ρ_2). Considerando que o fluxo seja constante, temos que o fluxo de massa \dot{m}_1 que entra pela seção transversal no ponto 1 é a mesmo fluxo de massa \dot{m}_2 que sai na seção transversal do ponto 2. As equações (3) e (4) de fluxo de massa nas seções 1 e 2:

$$\dot{m}_1 = \rho_1 A_1 V_1 \quad (3)$$

$$\dot{m}_2 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (4)$$

Pela Lei da Conservação de Massa, sabe-se que $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$. Logo:

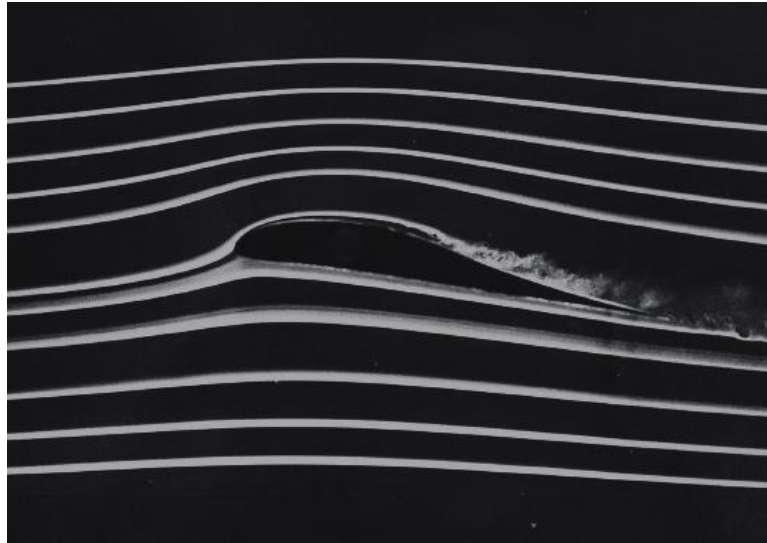
$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (5)$$

2.3.4 CAMPO DE ESCOAMENTO: LINHAS DE CORRENTE, LINHAS DE EMISSÃO, LINHAS DE TRAJETÓRIA

Considerando um fluido em regime permanente no qual o tempo não é variável, um elemento de fluido móvel traça um caminho fixo no escoamento, esse caminho é denominado de linhas de corrente do fluxo. Çengel (2007) define linhas de corrente como uma curva que tangenciam todos os pontos do vetor velocidade decorrente as distintas partículas com mesmo instante.

As linhas de corrente são úteis na indicação de direção instantânea do movimento do fluido ao longo do seu campo de escoamento. A Figura 9 ilustra bem as linhas de corrente com uma determinada velocidade em um aerofólio.

Figura 10 - As linhas de corrente em um aerofólio com fluxo de baixa velocidade.



Fonte: Anderson Jr. (2001)

2.3.5 NÚMERO DE REYNOLDS

Para escoamentos internos, a natureza de um escoamento laminar, de transição ou turbulento vai depender da geometria e da rugosidade da superfície, da velocidade do escoamento e do tipo de fluido (ÇENGEL, 2007). Sua posição relativa conforme a escala de turbulência é indicada pelo número de Reynolds (Re), parâmetro adimensional obtido pela relação entre o somatório das forças de inércia (F_i) e o somatório das forças viscosas (F_μ) (MUNSON, 2004), de acordo equação (7).

$$Re = \frac{\sum F_i}{\sum F_\mu} \quad (7)$$

Para tubos circulares, o número de Reynolds, é expresso pela equação (8).

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (8)$$

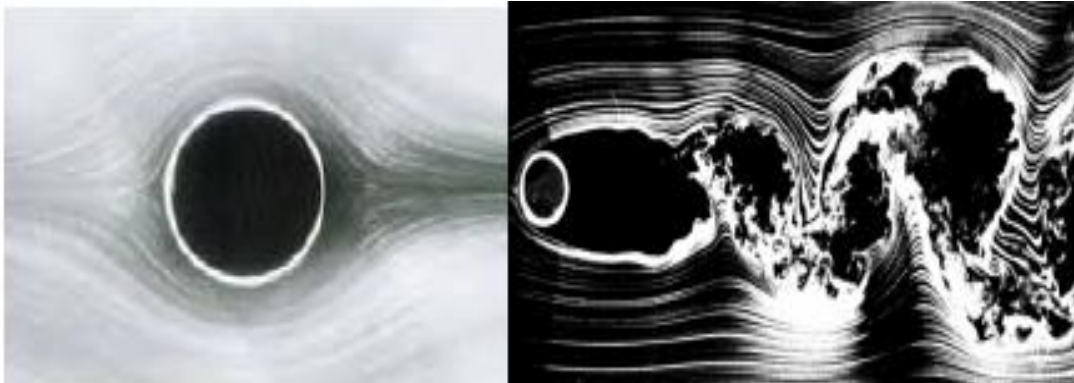
Onde ρ é a massa específica, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, V é a velocidade e D é o diâmetro da seção de testes do túnel. A segunda forma de Re é obtida utilizando a razão entre μ e ρ , e é denominada de viscosidade cinemática, expressa na equação (9).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (9)$$

Escoamentos com Re muito baixo indica a ocorrência de um escoamento viscoso cujo os efeitos de inércia tornam-se desprezíveis. Quando obtém-se números baixos e moderados de

Re têm-se um escoamento com tendência laminares, em contrapartida, altos Re indica um escoamento turbulento. É importante ressaltar que os valores para Re que caracterizam os escoamentos como laminares ou turbulentos dependem diretamente da geometria e do fluxo. A Figura 11 mostra os escoamentos laminar e turbulento em torno de um cilindro de acordo com o Número de Reynolds.

Figura 11 - (a) Escoamento Laminar em torno de um cilindro $Re \approx 1.10^1$. (b) Escoamento Turbulento em torno de um cilindro $Re \approx 1.10^5$



Fonte: (a)(<http://www.efluids.com/efluids/pages/gallery.htm>) (b)(SCHLICHTING, H., 1979)

Em geral, para tubos admite-se que um escoamento é laminar se Re for menor e igual a 2300, turbulento para valores maiores que 4000 e o intermédio compreende um regime de transição. Fox (2006) acrescenta que escoamento em um tubo de diâmetro constante será inteiramente laminar ou inteiramente turbulento, dependendo do valor da velocidade.

2.3.6 SEMELHANÇA DE ESCOAMENTOS

O teste de um modelo é considerado útil quando resultar em dados que possam, por meio de transposição por escala fornecer forças, momentos e cargas dinâmicas que existiriam no protótipo em tamanho real (FOX, 2006). É evidente que alguns requisitos devem ser atendidos para assegurar a semelhança entre o modelo e o protótipo, é necessário que sejam geometricamente, cinematicamente e dinamicamente semelhantes.

Para garantir o requisito da semelhança geométrica, é requerido que o protótipo e o modelo tenham a mesma forma, ou seja, as dimensões lineares do modelo devem ser correspondentes do protótipo por um fator de escala constante.

O segundo requisito implica que o escoamento no modelo e no protótipo seja semelhantes cinematicamente, ou seja, serão semelhantes quando as velocidades em pontos correspondentes têm a mesma direção e sentido, diferindo apenas na escala. Podem ainda, serem semelhantes se compactuarem de uma mesma tendência nas linhas de corrente.

Para assegurar a semelhança dinâmica entre dois escoamentos deve-se usar o teorema Pi de Buckingham, o mesmo é usado para encontrar grupos adimensionais governantes de um fenômeno de escoamento. Cada grupo adimensional independente deve ter o mesmo valor no modelo e no protótipo. Esses parâmetros adimensionais podem ser vistos como razões entre forças.

Considerando escoamentos de modelos e protótipos eles serão também dinamicamente semelhantes se o valor de um parâmetro independente for igual entre modelo e protótipo. Exemplificando usando a relação do número de Reynolds, têm-se a equação (10).

$$\left(\frac{\rho VD}{\mu}\right)_{\text{modelo}} = \left(\frac{\rho VD}{\mu}\right)_{\text{protótipo}} \Rightarrow Re_{\text{modelo}} = Re_{\text{protótipo}} \quad (10)$$

A reprodução do número de Reynolds entre modelo e protótipo assegura a semelhança dinâmica entre escoamentos. A semelhança geométrica requer que a rugosidade superficial relativa seja a mesma, para modelo e protótipo (FOX, 2006). Deste modo, a rugosidade relativa é um parâmetro que deve ser reproduzido nas relações entre modelo e protótipo.

Situações que os três requisitos para a similaridade são atingidos, é dito que a semelhança dinâmica é completa. Casos em que a semelhança completa entre modelo e protótipo não é completa, as informações que os estudos com modelos fornecem continuam sendo bastante úteis. A Figura 12 exemplifica visualmente a semelhança geométrica entre o modelo e o protótipo.

Figura 12- Modelo real e protótipo no interior do túnel de vento.



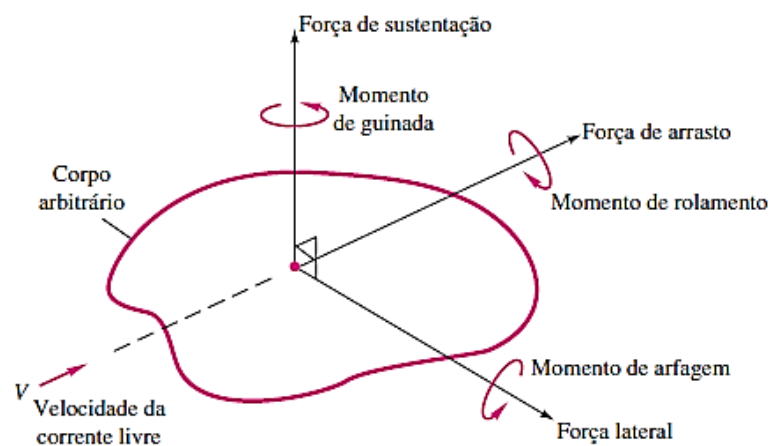
Fonte: Loredou-Souza (2009)

2.3.7 FENÔMENOS AERODINÂMICOS

2.3.7.1 ARRASTO E SUSTENTAÇÃO

Segundo White (2011) distintos corpos de qualquer formato, quando imerso em um fluido, está sujeito a forças e momentos oriundos do escoamento. Se o corpo tem forma e orientação arbitrárias, o escoamento exercerá formas e momentos relativos a todos os três eixos de coordenadas. As forças e momentos podem ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Forças e momentos sobre um corpo arbitrário.



Fonte: White(2011)

As forças de cisalhamento e as de pressão são forças conhecidas por agirem sobre um corpo submerso, quando decompostas em componentes paralelos e perpendiculares ao escoamento, tem-se o arrasto e a sustentação. O momento inerente ao eixo de arrasto é o momento de rolamento e no eixo de sustentação é o momento de guinada.

Fox (2006) define o arrasto aerodinâmico como a componente das forças que age sobre um corpo rígido paralelamente à direção do movimento.

Geralmente o arrasto é visto como um efeito indesejado e, a redução do mesmo está associada a redução do consumo de combustível em automóveis, submarinos e aviões. Em contrapartida, existem situações em que o arrasto é essencial, como saltar de paraquedas, dispersão de sementes para locais distantes, movimento dos oceanos, movimento das folhas das árvores, entre outros (ÇENGEL, 2007).

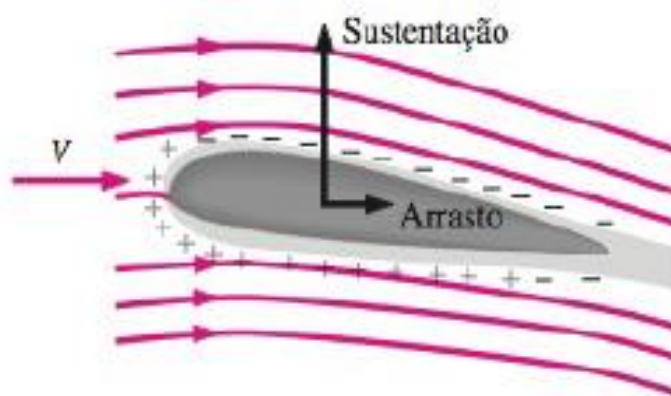
As forças de pressão e de cisalhamento, têm componentes na direção do escoamento, a força de arrasto é proveniente dos efeitos combinados da pressão e do cisalhamento na parede

do escoamento; as forças da direção normal ao escoamento tendem a mover o corpo nessa direção, a soma das forças é denominado de sustentação.

Ahmed (1983) afirma que todo corpo imerso em um fluido sofre a ação de forças de sustentação. Conceitua-se sustentação como a componente da força aerodinâmica resultante perpendicular ao movimento do fluido. Essa força vertical é a responsável pelo voo do avião, as asas apresentam um formato aerodinâmico visando gerar sustentação com a menor força de resistência possível.

Exemplificando a ação de ambas as forças, tem-se que as asas dos aviões devem ser modeladas e posicionadas de forma a gerar sustentação com pouco arrasto, essa condição é possível fixando um ângulo de ataque. A Figura 14 ilustra o perfil de uma asa sob ação da sustentação e arrasto.

Figura 14 - Perfil de asa submetidos as forças de arrasto e sustentação.



Fonte: Çengel (2007)

As forças de arrasto F_A e sustentação F_S dependem da massa específica do fluido, da velocidade, da área e de outras mais variáveis. Torna-se conveniente expressar essas forças por meio de números adimensionais, tais como: coeficiente de arrasto C_A e coeficiente de sustentação C_S , respectivamente nas equações (11) e (12).

$$C_A = \frac{F_A}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (11)$$

$$C_S = \frac{F_S}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (12)$$

Onde, A é a área frontal do corpo, ρ massa específica do fluido e V velocidade.

2.3.7.2 VORTICIDADE

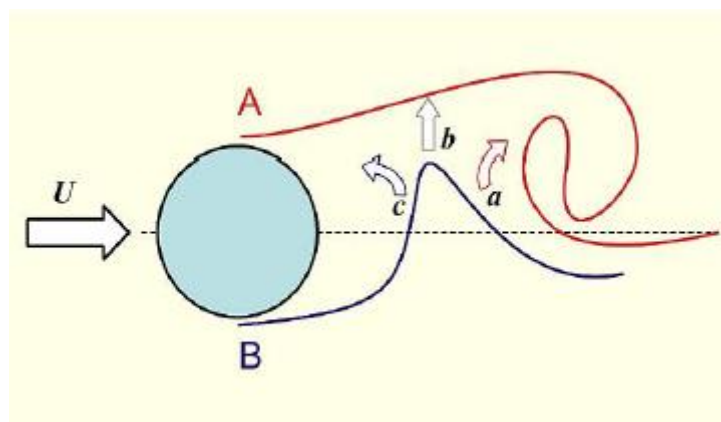
Conceitua-se vorticidade como uma grandeza vetorial que representa a tendência à rotação de uma partícula de um fluido conforme sua movimentação no campo de escoamento (RUBINO, 2016). Os vórtices são trajetórias circulares na esteira causados pelo deslocamento da camada limite da superfície do corpo, também conhecido como esteira de Kármán, em homenagem ao pesquisador Theodore Von Kármán (1881 – 1963). A explicação teórica com respeito a camada limite e a sua separação encontra-se no Apêndice A

A formação de vórtices está relacionada à separação da camada limite ocasionada pela distribuição de pressão ao longo do escoamento ao redor de um corpo imerso. Considerando um escoamento invíscido, algumas partículas do fluido tendem a acelerar e desacelerar provocando uma oscilação na pressão. As partículas que estão próximas a parede do corpo tem o seu movimento dificultado devido ao atrito presente na camada limite, fazendo com que precisem consumir grande porção de energia cinética.

Em compensação, quando encontram um aumento de pressão, essas partículas tendem a se movimentar em direção oposta ao do escoamento, impulsionadas por esse aumento de pressão (RIBEIRO, 2002).

A propagação de vórtices transforma-se inteiramente na esteira. Toda circulação produzida na camada limite, devido ao movimento contrário das partículas, será liberada na esteira em dois pontos separados em caso de um cilindro, onde são formadas as camadas cisalhantes oposta (ASSI, 2005). A Figura 15 ilustra uma esquematização de alimentação da esteira em um cilindro.

Figura 15 - Modelo representativo de alimentação de vórtices de Gerrard (1966).



Fonte: Assi (2005)

Na representação do modelo de Gerrard (1966), a esteira é alimentada por dois filamentos de vorticidade liberados em nos pontos A e B. Um filamento livre emite uma circulação na esteira, que devido inexistência de obstáculo, enrola-se gerando um núcleo de vorticidade, definindo um vórtice. Conforme o aumento da intensidade do vórtice, a velocidade rotacional no campo da esteira atrai uma camada cisalhante oposta (ASSI, 2005).

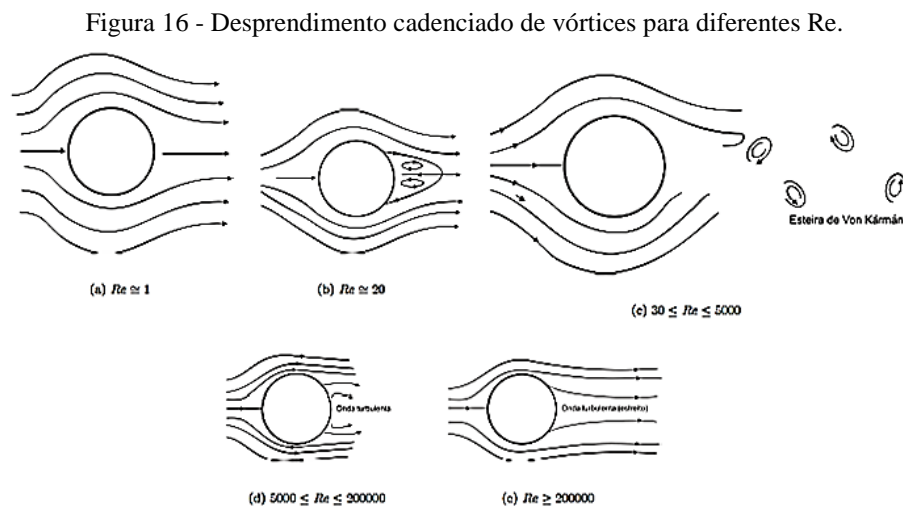
Assi (2005) explica que o filamento B é atraído pela velocidade induzida pela circulação do filamento A, as duas camadas cisalhantes possuem sinais contrários de vorticidade. Deste modo, ocorre subdivisão do filamento em três direções distintas nomeadas como direções *a*, *b* e *c*. Na direção *a* uma fração desse filamento é imerso ao vórtice diminuindo sua circulação total; na direção *b* ocorre uma interrupção da alimentação de vorticidade que abastece o lado A; por fim, direção *c* inicia-se um novo vórtice oposto a B, finalizando o ciclo de emissão.

Os vórtices se desprendem de forma alternada dependendo do número de Reynolds (*Re*). A frequência do desprendimento (f_s) desses vórtices dependem do número adimensional de Strouhal (S_t) dado pela equação 13.

$$S_t = \frac{f_s D}{V} \quad (13)$$

Onde, *D* é o diâmetro do corpo e *V* é a velocidade do escoamento.

Em virtude do número de Strouhal ser dependente da geometria e do número de Reynolds para baixos números de Mach, arbitra-se o S_t em função do *Re* para distintas geometrias de corpos imersos em escoamento. A Figura 16 ilustra a formação de vórtices para distintos números de Reynolds.



Fonte: Ribeiro (2013) – (Adaptado)

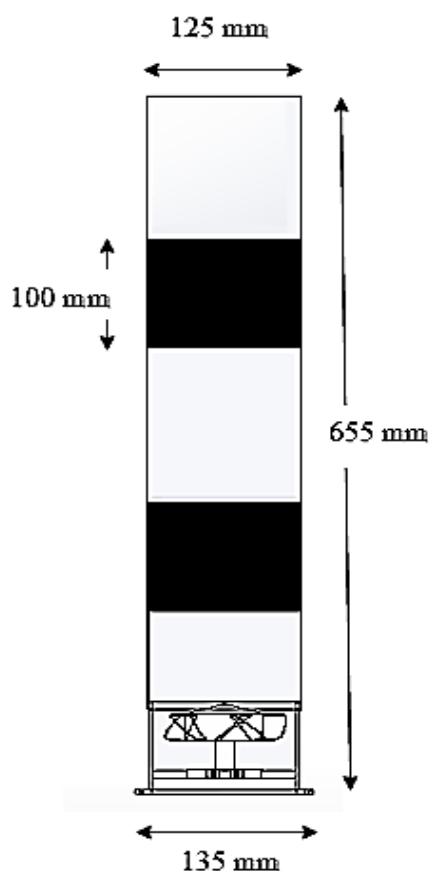
3 METODOLOGIA

3.1 PROJETO TÚNEL DE VENTO VERTICAL

Para desenvolvimento do estudo, foi necessário o dimensionamento e construção de um túnel de vento na configuração vertical, de baixa velocidade e de circuito aberto. A escolha por essa configuração de túnel baseou-se nos critérios tais como: custo, facilidade de construção, e por ser o mais adequado para o estudo a qual foi destinado.

A construção do túnel de vento foi relativamente simples, não necessitando de muitos materiais, utilizou-se um exaustor para gerar o fluxo de ar, um tubo de plástico transparente seccionado em três partes para o corpo do túnel vertical e tubos menores de plástico para a confecção da colmeia. A estrutura é pequena por se tratar de um túnel de vento didático, leve, com grande valor funcional e estético. Projetou-se a estrutura nas dimensões básicas cujos valores estão ilustrados na Figura 17.

Figura 17 - Dimensões básicas do túnel de vento vertical.



Fonte: Autor (2019)

Antes de iniciar o funcionamento do túnel de vento foi-se necessário identificar algumas características do mesmo, tais como: propriedades físicas do ar, temperatura, pressão

e velocidade em seu interior afim de caracterizar o aparato. A Tabela 2 abaixo, contém os valores das propriedades e dimensões das seções do túnel de vento.

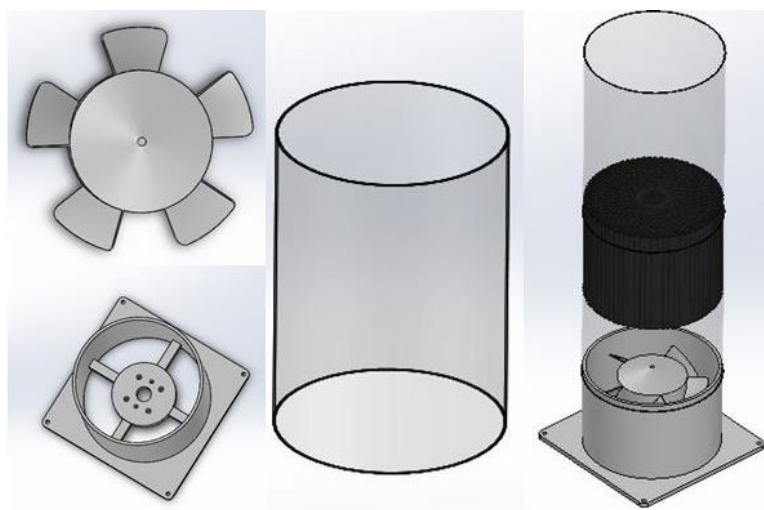
Tabela 2 - Dados de entrada.

Descrição	Valor	Nomenclatura
Diâmetro da seção de teste	125 mm	D_{st}
Comprimento total da seção de teste	575 mm	L_{st}
Velocidade média de saída do ventilador	$2,2 \text{ m.s}^{-1}$	V_{sv}
Velocidade média de saída da seção de teste	$1,2 \text{ m.s}^{-1}$	V_{st}
Massa específica do ar	$1,184 \text{ kg.m}^{-3}$	ρ_{Ar}
Temperatura do ar	$25 \text{ }^\circ\text{C}$	T_{Ar}
Viscosidade cinemática do ar	$1,56 \text{ E}^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	ν_{Ar}
Viscosidade dinâmica do ar	$1,85 \text{ E}^{-5} \text{ N.s.m}^{-2}$	μ_{Ar}
Pressão Atmosférica	101,325 KPa	P_{atm}
Vazão do ventilador	$312 \text{ m}^3/\text{h}$	Q_e

Fonte: Autor, 2019

Os componentes do túnel de vento vertical foram dimensionados e projetados no software Solidworks® de licença estudantil e são eles, o ventilador, a seção de teste e a colmeia. O projeto pode ser visualizado na Figura 18 juntamente com o desenho do túnel montado em sua versão simplificada.

Figura 18 - Projeto das peças e montagem em Solidworks® do túnel de vento vertical.



Fonte: Autor (2019)

3.2 COMPONENTES DE UM TÚNEL DE VENTO VERTICAL

Os túneis de vento em geral, devem ser analisados em partes, componente a componente (WATTENDORF, 1938). Os componentes do túnel de vento vertical para o estudo proposto, com a configuração onde o circuito é aberto são: seção de teste, tela, colmeia e ventilador. De forma sucinta e para melhor compreensão será dito o que é, qual a função, o dimensionamento e a construção de cada componente do aparato experimental.

3.2.1 SEÇÃO DE TESTE

A seção de teste é a área do túnel de vento onde os corpos de provas são posicionados para serem testados experimentalmente. As paredes da seção devem ser de uma forma que facilite a visualização do experimento e também o manuseio do objeto a ser estudado, sem que haja interferência no escoamento.

A geometria da seção de teste pode variar conforme o propósito do projeto, encontra-se formas geométricas de seção circular, quadrada, retangular, hexagonal e até mesmo octogonal. Em túneis verticais é mais comum o uso de seções circulares.

A seção de teste deve possibilitar que o escoamento se desenvolva e se comporte de maneira adequada ao experimento, sendo que sua seção terá dimensões iguais à da garganta do bocal. Uma seção de teste é projetada de acordo com as necessidades dos experimentos. As dimensões e formatos são projetados de maneira que as interferências no corpo de prova sejam mínimas.

Nessa configuração de túnel de vento vertical, as análises serão realizadas no bocal de saída da seção de teste. Para obter dados de qualidade, as três seções que compõem comprimento total da seção de teste devem possuir o mesmo diâmetro e a parede interna do tubo deve ser lisa, livre de rugosidade.

O comprimento total da seção de teste é de 575 mm sendo que duas seções possuem 195 mm e uma seção de 185 mm de comprimento. A estrutura encontra-se ilustrada na Figura 19.

Figura 19 - Seção de teste.



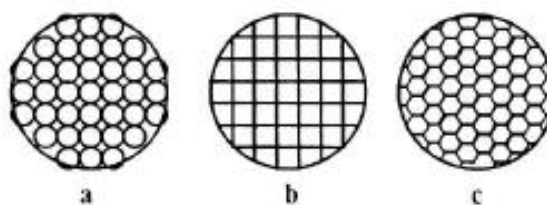
Fonte: Autor (2019)

3.2.2 COLMEIA

Barlow *et al.* (1999) define colmeia como um aparato que direciona o fluido por meio de filamentos individuais e de forma paralela. De maneira mais esclarecedora, a colmeia tem a função de corrigir a direção de escoamento, estabilizando o fluxo na câmara de teste, que devido a contração e pelo aumento da velocidade tem característica turbulenta.

É nomeado dessa forma devido a sua estrutura ser semelhante a colmeias de abelha, trata-se de uma placa com pequenos tubos de diâmetro reduzido arranjados um ao lado do outro, possuindo um determinado comprimento. Dentre os tipos de geometria de colmeias as mais comuns são as hexagonais, as quadradas e as circulares. A Figura 20 exemplifica os diferentes tipos de geometria das colmeias.

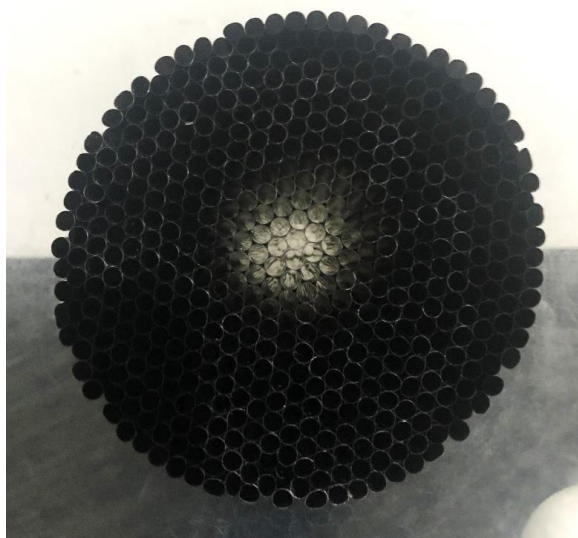
Figura 20 - Tipos de colmeias: (a) circular (b) quadrada (c) hexagonal.

Fonte: Barlow *et al.* (1999)

Scheiman *et al.* (1981) afirma baseado em estudos que a forma hexagonal apresenta o menor coeficiente de perda de carga. Os coeficientes são, 0.30, 0.22 e 0.2, respectivamente.

No túnel de vento vertical optou-se pela utilização de duas colmeias de geometria circular, para a confecção foram necessários 1020 unidades de tubos de um plástico maleável, com diâmetro de 30 mm e 100 mm de comprimento. As colmeias formaram uma placa circular com um total de 510 tubos removíveis ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Colmeia.



Fonte: Autor (2019)

As colmeias foram dispostas entre as três seções do túnel de vento, os tubos que ficaram próximos da parede do túnel tiveram a área da seção transversal reduzida, em outras palavras, “amassados” devido o tubo ser maleável.

3.2.3 TELA

A tela possui a mesma finalidade da colmeia de remover oscilações da velocidade do fluido mas, além disso, tem a função de proteger o ventilador. Utilizou-se uma tela de polietileno com orifícios pequenos, cujo tamanho da malha é 1,5 mm x 5,0 mm e o diâmetro do fio é 0,23 mm, a tela foi fixado na saída do ventilador, onde ocorre a primeira laminarização do fluido. Na Figura 22 mostra a localização da tela.

Figura 22- Tela e ventilador.



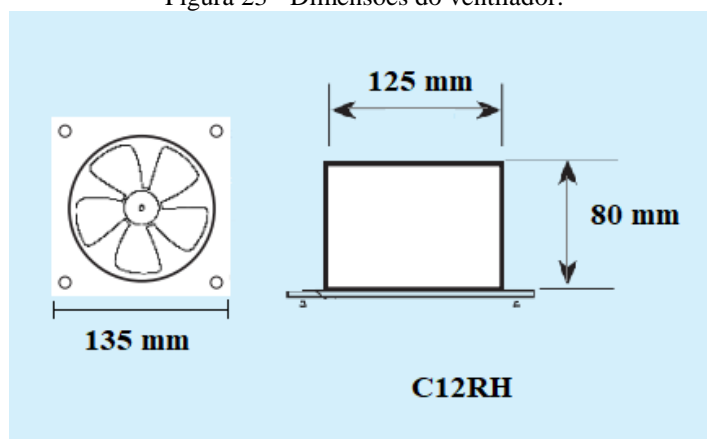
Fonte: Autor (2019)

3.2.4 VENTILADOR

O ventilador é um componente importante no projeto do túnel de vento, o mesmo deve atender a demanda do sistema, superar as perdas geradas em cada componente e fornecer a vazão esperada. Geralmente se utilizam ventiladores axiais ou centrífugos nos casos de túneis subsônicos.

Devido ao fato de ser um túnel de vento vertical de pequeno porte e baixas velocidades, optou-se pelo uso de um exaustor axial do fabricante AirFan, linha C modelo C12RH (R – mancais de rolamentos e H – maior potência). O exaustor não foi utilizado com a função de exaurir e sim com a função de ventilar, ou seja, soprar, em virtude disso, inverteu-se a forma de uso do equipamento. As dimensões e especificações do ventilador encontra-se na Figura 23 e Tabela 3, respectivamente.

Figura 23 - Dimensões do ventilador.



Fonte: AirFan

Tabela 3 - Dados do ventilador.

Especificações do Ventilador Axial

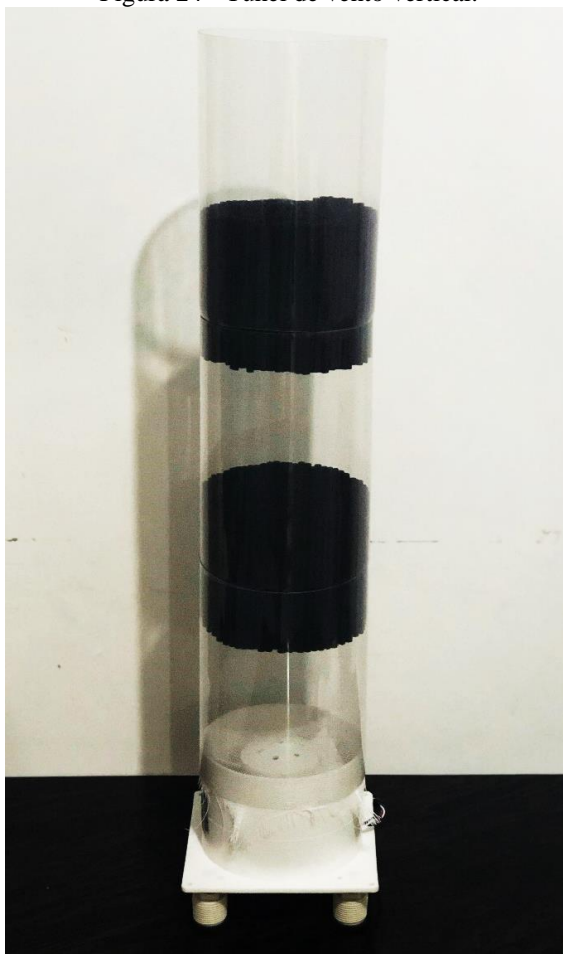
Diâmetro	124 mm
Tensão Nominal	125/220 V
Frequência	60 Hz
Potência Nominal	32/23 W
Rotação	3050 rpm
Potência Sonora	43 dB(A)
Pressão	95 Pa
Vazão	312 m ³ /h

Fonte: AirFan

3.3 CONSTRUÇÃO DO TÚNEL DE VENTO VERTICAL

A etapa de construção iniciou-se após o dimensionamento e de todos pontos do projeto do túnel de vento serem definidos. Por se tratar um de uma estrutura de pequeno porte, a construção do túnel de vento vertical foi relativamente simples. A montagem foi basicamente a base de encaixes, as colmeias serviam de ligação de uma seção com a outra e, o comprimento total da seção foi acoplado no bocal de saída do ventilador, em seu intermedio posicionou-se a tela . A Figura 24 mostra o aparato finalizado.

Figura 24 - Túnel de vento vertical.



Fonte: Autor (2019)

Em virtude da vibração do ventilador, foi necessário colocar um pedaço de borracha em cada pé da base do túnel visando a minimização da vibração e evitando uma possível movimentação da estrutura. Apesar da simplicidade, o aparato é funcional, leve e de fácil manuseio.

3.4 QUALIFICAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO VERTICAL

3.4.1 MAPEAMENTO DE VELOCIDADE

O controle de velocidade do túnel de vento foi possível devido a uso de um dimmer, possibilitou testar algumas velocidades e definir a mais viável para a realização dos testes. O ventilador foi ligado a uma tensão de 127 V e segundo fabricante a uma rotação de 3050 rpm.

As medidas foram realizadas de duas maneiras, com e sem a utilização de colmeias. Sem a utilização de colmeias, foi selecionado dois pontos para a tomada de velocidade, no caso,

um ponto na saída do ventilador a 260 mm de distância do ponto de referência e o outro na saída do túnel a 630 mm de distância considerando o mesmo ponto.

Com a utilização de colmeia, realizou-se medidas de velocidade na saída de cada seção, totalizando três medições ao longo da seção de teste do túnel de vento. A primeira, encontra-se a uma distância de 260 mm, o segundo a 440 mm e o último a 630 mm, medida também com relação ao ponto de referência

Essas medidas foram necessárias para o mapeamento da velocidade do escoamento na extensão do túnel para possibilitar a realização dos testes. Na coleta de medidas de velocidade fez-se o uso de um anemômetro digital da marca ANEMOMETER ilustrado na Figura 25.

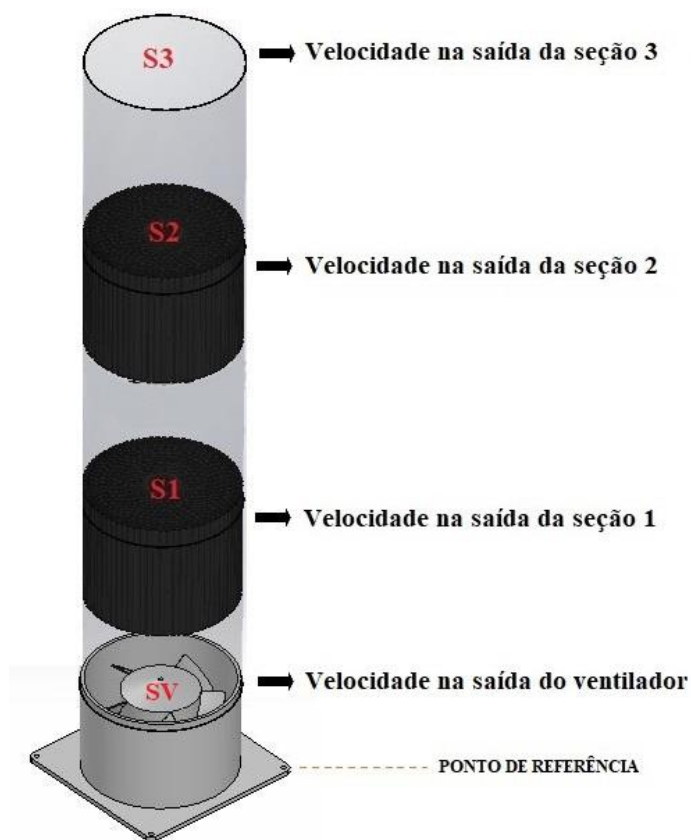
Figura 25 - Modelo de anemômetro utilizado na medição da velocidade.



Fonte: Autor (2019)

Iniciou-se os testes após ligar o ventilador e aguardar alguns minutos para que o fluxo tivesse mais desenvolvido no interior do túnel, passado instantes, deu-se início as medições de velocidade no centro da saída de cada seção, cujo o ponto de referência é partir da base do ventilador. Na Figura 26 encontra-se ilustrado os pontos de medição.

Figura 26 - Pontos de tomada de velocidade.



Fonte: Autor (2019)

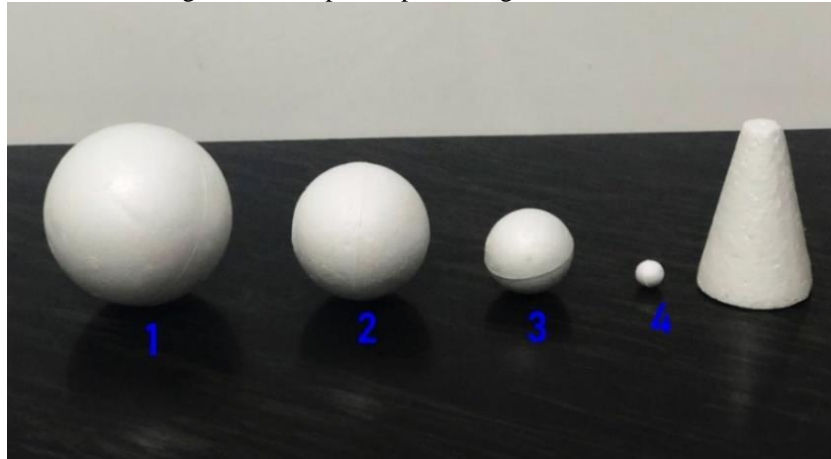
3.5 CONFECÇÃO E PADRONIZAÇÃO DOS PERFIS EXPERIMENTAIS

3.5.1 PERFIS DE GEOMETRIA DEFINIDA

Os testes iniciais no túnel de vento vertical foram realizados com perfis de geometria definidas, optou-se pela utilização de geometrias usuais tais como esférica e cônica. Os corpos de prova foram testados na saída das três seções do túnel de vento, visando rastrear o comportamento dos objetos as condições submetidas. O túnel possui 3 seções, foram testados 4 perfis, totalizando em 12 testes efetuados

Utilizou-se quatro esferas com dimensões distintas e uma seção de cone, as esferas foram enumeradas de forma crescente com o diâmetro. A Figura 27 ilustra os perfis enfileirados.

Figura 27 - Corpos de prova de geometria usuais.

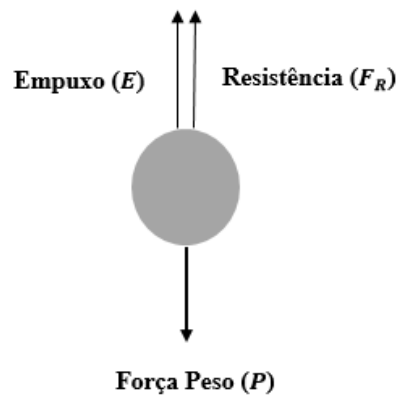


Fonte: Autor (2019)

O teste com esses elementos não foram satisfatórios visto que, a relação massa e empuxo não propiciaram estado de equilíbrio entre corpo e o meio, as limitações de velocidade do aparato experimental já era um indicativo.

Segundo o regime de resistência do meio, existem forças que dificultam o movimento de corpo quando submetidos a um fluido. As esferas e o cone durante a descida na seção foram submetidos a algumas forças, tais como: força de resistência aplicada pelo fluido ao movimento (F_R), a força de empuxo (E) e a força peso (P). O diagrama de forças encontra-se ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Diagrama de forças de um corpo submetido a um fluido.



Fonte: Autor (2019)

A condição de equilíbrio de acordo o diagrama, é dada pela igualdade entre a força peso e o somatório do empuxo com a resistência ($P = E + F_R$), cada força é representada por expressões regentes de acordo as equações (14), (15) e (16).

$$P = mg \tag{14}$$

$$E = \rho_{fluido} V_{corpo} g \quad (15)$$

$$F_R = C_r \gamma A \frac{v^2}{2g} \quad (16)$$

Os cálculos das forças encontra-se no Apêndice B.1, os resultados obtidos juntamente com as informações dimensionais dos corpos de prova encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensões dos corpos de prova de geometria definida.

Esfera	d (mm)	m (g)	A (m ²)	P (N)	V (m ³)	E (N)	F_R (N)	P = E + F_R (N)
Esfera 1	100	7,1	0,3	0,0697	0,000524	0,00608	0,1278	$P < E + F_R$
Esfera 2	75	4,2	0,0180	0,0412	0,0002209	0,002566	0,0719	$P < E + F_R$
Esfera 3	46	4,7	0,0066	0,0461	0,0000510	0,000592	0,0270	$P > E + F_R$
Esfera 4	16	< 1	0,0008	0,0098	0,00000214	0,000025	0,0033	$P > E + F_R$
Cone H = 95	62 18	1,4	0,0019	0,0137	0,00003938	0,000457	0,00560	$P > E + F_R$

Fonte: Autor, 2019

Os dados tabelados é a confirmação de que a condição de equilíbrio não seria satisfeita em nenhuma hipótese considerando o cenário a qual foi submetido. Percebe-se que para a esfera 1 e 2, o somatório das forças de empuxo e resistência é sempre superior a força peso, desse modo o corpo “flutua” no fluido; para a esfera 3, 4 e o cone, o peso é maior do que o somatório das forças, o corpo “afunda no fluido”.

3.5.2 PERFIL DE GEOMETRIA BIO-INSPIRADA

O estudo desenvolvido por Cummins *et al.* (2018) com respeito ao mecanismo de voo do dente-de-leão, semente pertencente à família Asteraceae, possibilitou o conhecer o universo das sementes voadoras, caracterizando sua geometria como um modelo aerodinâmico otimizado. Em paralelo, a biomimética propagada por Benyus (2003) como ciência inovadora e inspirada na natureza, é inserido nesse contexto, enaltecendo a natureza por fornecer modelos de processos, mecanismos e *designs* para novas criações.

O anel de vórtice descoberto por Cummins *et al.* (2018) acima do papus do dente-de-leão, induziu a um questionamento: ‘É possível que um perfil inspirado na geometria do dente-

de-leão apresente um comportamento semelhante?”. Não estar claro como o papus pode gerar e estabilizar um anel de vórtice, tal fato, norteou o objetivo geral do presente trabalho.

Um perfil é dito bio-inspirado quando sua criação é motivada pela geometria de um elemento biológico. O perfil proposto foi bio-inspirado em sementes da Família *Asteraceae*, nas espécies *T.officinale*, *T. dubius* e *C. cardunculu*. As espécies possuem papus plumados e compactuam mesma geometria, que é similar a um paraquedas.

A geometria da semente é basicamente um corpo com filamentos eriçados preso a um filete com uma concentração de massa em sua ponta. Um protótipo foi construído sem considerar o dimensional, a nível de obter as primeiras impressões para o experimento. Utilizou-se folha de papel seda e plástico para confeccionar a região dos filamentos e um palito de madeira para o filete. A obtenção dos primeiros resultados com o protótipo construído, viabilizou a réplica do modelo porém, de forma padronizada.

Estabeleceu-se duas configurações de perfis com base no protótipo, a utilização com e sem filete, variando o material e a quantidade e comprimento de filamentos. A divisão dos perfis ficaram as seguinte forma: dois corpos feitos de plástico (com e sem filete), um corpo mesclado (com filete) e um corpo de papel seda (sem filete). Manteve-se o uso do papel seda e uma folha plástica com os respectivos cortes ilustrados na Figura 29.

Figura 29 - Material utilizado para confecção dos perfis.



Fonte: Autor (2019)

A quantidade de filamentos em cada folha variava entre 40 a 43, com base no protótipo, estabeleceu-se dois comprimentos para o filamento de 65 e 70 mm, duas composições de papus uma com 86 filamentos (igual protótipo) e a outra com 120 filamentos. A confecção para 86 e 120 filamentos contou com a utilização de duas folhas com 43 fios e três folhas com 40 fios, respectivamente. As folhas foram colocadas uma sobreposta a outra, a parte retangular foi enrolada, unindo-as em um único centro. Após isso, o centro foi colado, e aparado o tamanho

no intuito de só ficar a região plumada. Esse procedimento construtivo foi para todos os corpos de prova, sendo que dois deles, um filete de madeira com comprimento de 15 mm acoplado ao centro. Configuração dos perfis com filete ilustrada na Figura 30.

Figura 30 - Corpos de prova com filete.



Fonte: Autor (2019)


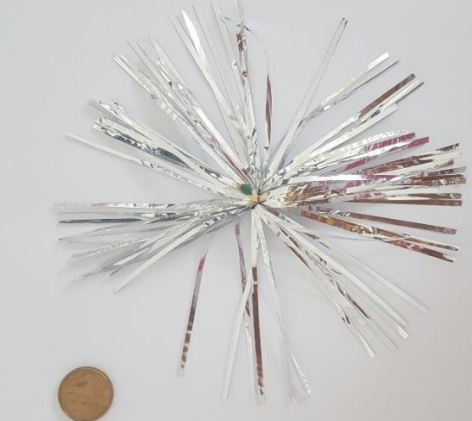


O diâmetro formado pela área plumada é considerado importante na confecção dos modelos, acredita-se que a área transversal de filamentos radiais interage com meio de forma a propiciar sustentação. Para a padronização dos perfis medidas dimensionais e pesagens foram realizadas. Por se tratar de corpos de prova pequenos e leves utilizou-se uma balança analítica com calibração interna de 0,0001g da marca Bioscale nas pesagens, conforme Figura 31. As informações dimensionais dos perfis juntamente com imagens que evidenciam o diâmetro formado pelos filamentos radiais estão inseridos na Tabela 5.

Figura 31 - Balança analítica usada na pesagem dos perfis e filetes.



Fonte: Autor (2019)

Tabela 5 - Dados dimensionais dos perfis bio-inspirados.

	PERFIL	INFORMAÇÕES
PERFIL 1		<p>Filamentos Material: Plástico Peso: 0,3537g Diâmetro: 145 mm Quantidade: 86 Largura: 1 mm Comprimento: 70 mm</p>
PERFIL 2		<p>Filamentos Material: Plástico Peso: 0,4758g Diâmetro: 145 mm Quantidade: 86 Largura: 1 mm Comprimento: 70 mm</p> <p>Filete Material: Madeira Peso: 0,0658g Largura: 1 mm Comprimento: 15 mm</p>
PERFIL 3		<p>Filamentos Material: Papel Seda Peso: 0,4336g Diâmetro: 130 mm Quantidade: 120 Largura: 1 mm Comprimento: 65 mm</p>
PERFIL 4		<p>Filamentos Material: Papel Seda + Plástico Peso: 0,4758g Diâmetro: 135 mm Quantidade: 86 Largura: 1mm Comprimento: 65 mm</p> <p>Filete Material: Madeira Peso: 0,0329g Largura: 1 mm Comprimento: 15 mm</p>

A padronização dos perfis bio-inspirados permite que posteriormente os comportamentos visualizados possam ser relacionados com dimensional, além, de torná-los replicável. O procedimento experimental para todos os perfis bio-inspirados testados ocorreram da mesma forma, primeiramente com o perfil posicionado em cima da colmeia da seção 3, o ventilador foi ligado aos poucos, partindo de uma velocidade mínima até atingir 1.2 m.s^{-1} velocidade máxima na respectiva seção. Os testes foram registrados por meio de filmagens e fotografias, para serem analisadas posteriormente com cautela.

3.5.1.1 TESTE INICIAL COM PROTÓTIPO

Realizou-se um teste inicial com o protótipo confeccionado sem considerar parâmetros, o corpo de prova foi posicionado na saída da seção 3 do túnel e o ventilador ligado, passados alguns instantes o perfil atingiu uma determinada altura, onde alguns comportamentos foram observados. Na Figura 32 é possível visualizar o posicionamento do protótipo e o comportamento de forma sequencial.

Figura 32 - Teste inicial com protótipo bio-inspirado.

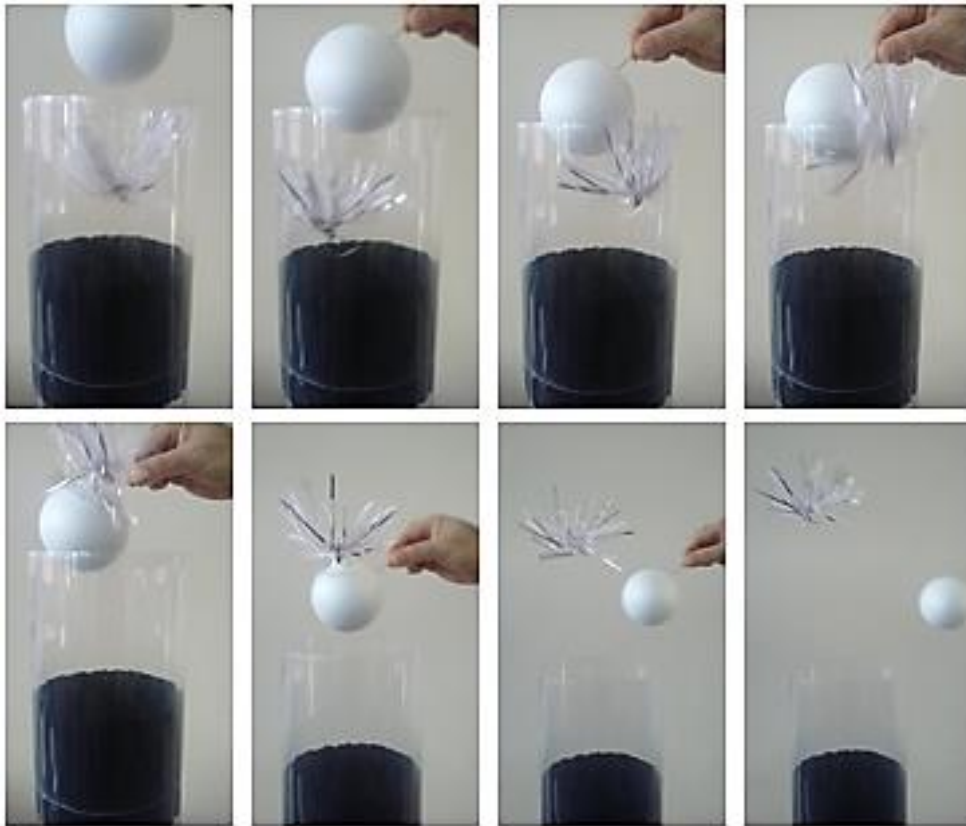


Fonte: Autor (2019)

Observou-se no teste um movimento rotacional do perfil, variações na altura, além de outros dois comportamentos visualizados. O primeiro comportamento foi a perda de sustentação quando distantes da borda; o segundo, é basicamente a reação contrária do primeiro, perto da borda houve um ganho de sustentação, aumento de velocidade.

A Figura 33 demonstra o procedimento realizado com a interferência da esfera. Percebeu-se que o perfil bio-inspirado reagia com movimento da esfera, quando um determinado ponto naquela região era “perturbado”.

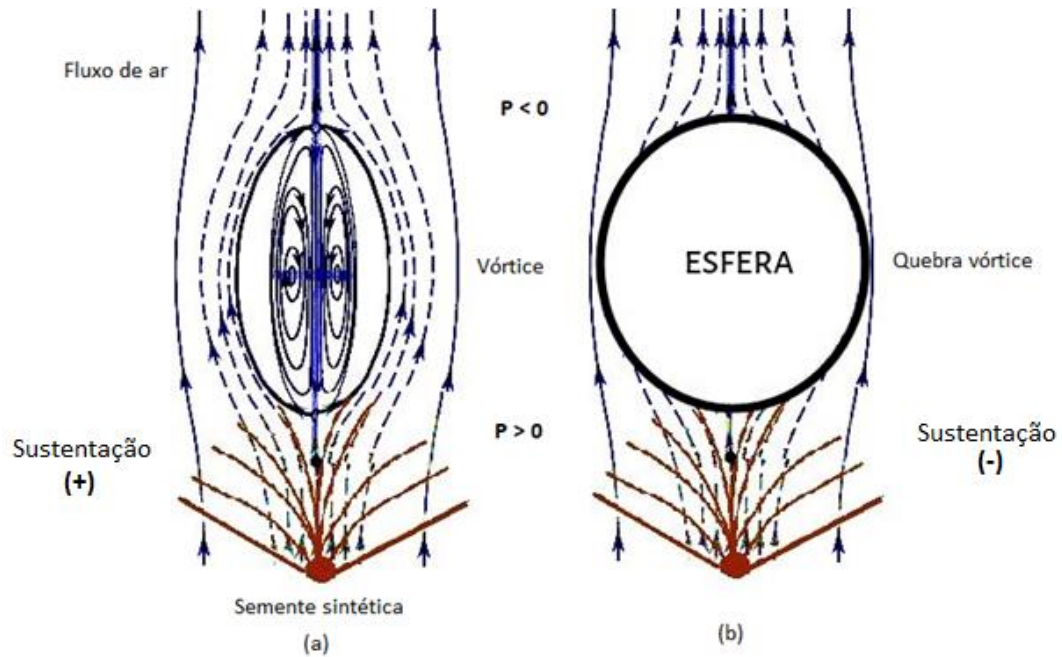
Figura 33 - Utilização de uma esfera para perturbar o escoamento acima da área com filamentos.



Fonte: Autor (2019)

Segundo Cummins *et al.* (2018) o anel de vórtice descoberto afastado do papus, fica a uma distância fixa. Tal fato, acarretou no seguinte pensamento: se o anel de vórtice é o que possibilita a sustentação do corpo então, ao “perturbar” a área acima do papus acarretaria na perda de sustentação, comprovando a possível existência do vórtice também em geometrias semelhantes a do dente-de-leão. Desse modo, acima da área de filamentos do protótipo posicionou-se uma esfera, objetivando causar “perturbações” naquela zona de fluxo. A representação do comportamento observado após teste com interferência da esfera pode ser visualizado na Figura 34.

Figura 34 - (a) Anel de vórtice separado SRV; (b) Esfera “quebrando” vórtice.



Fonte: Adaptado de Cummins *et al.* (2018).

Em (a) o perfil está submetido a um fluxo de ar e, acima da região plumada um vórtice é formado permitindo um voo estável, ou seja, a sustentação do corpo está diretamente ligada a estabilidade do vórtice. A utilização da esfera para causar “perturbações” nessa região específica acarreta na perda de sustentação, o elemento age como um “quebra” vórtice, como representado em (b)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIOS NO TÚNEL DE VENTO VERTICAL

4.1.1 DADOS DE VELOCIDADE

Na Tabela 6 encontra-se os dados de velocidade nas duas configurações estipuladas na metodologia para o mapeamento de velocidade.

Tabela 6 - Dados de velocidade.

Configuração	Posição	Velocidade
Com colmeia	S1 (Saída da Seção 1)	2,2 m.s ⁻¹
	S2 (Saída da Seção 2)	1,4 m.s ⁻¹
	S3 (Saída da Seção 3)	1,2 m.s ⁻¹
Sem colmeia	SV (Saída do Ventilador)	2,2 m.s ⁻¹
	S3 (Saída da Seção 3)	1,8 m.s ⁻¹

Fonte: Autor, 2019

Considerando a configuração com utilização de colmeia e, com os valores de velocidade de escoamento obtidos, pode-se calcular a vazão ($Q_{seção}$) na saída de cada seção do túnel vento e, é dado pela equação (17) abaixo:

$$Q_{seção} = AV_{seção} \quad (17)$$

Onde, $V_{seção}$ é a velocidade de escoamento na seção transversal em m.s⁻¹ e A é a área da seção transversal em m². O cálculo de vazão será feito apenas para a seção S3 do túnel de vento cuja área é igual 0,012271 m² e a velocidade da seção é equivalente a 1,2 m.s⁻¹, obtém-se uma vazão de 0,014726 m³.s⁻¹.

4.1.2 DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS

O número de Reynolds é um parâmetro adimensional que caracteriza a importância relativa da inércia para forças viscosas em um fluido. O presente estudo contou com o cálculo de dois números de Reynolds, um com relação ao fluxo em torno de todo o papus do perfil e o outro de um filamento individual. Utilizou-se a equação (8) para o cálculo do Re de todos os perfis bio-inspirados, os valores podem ser consultados abaixo na Tabela 7..

Tabela 7 - Valores de Re no papus e filamento.

Perfil Bio-Inspirado	Re_{papus}	$Re_{filamento}$
Perfil 1	11136	5376
Perfil 2	11136	5376
Perfil 3	9984	4992
Perfil 4	10368	4992

Fonte: Autor, 2019

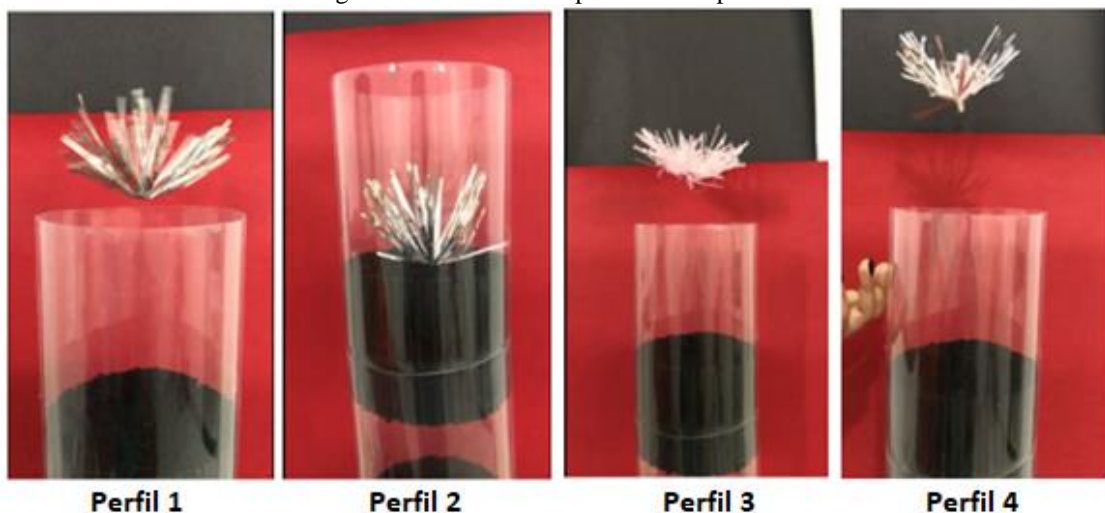
Os valores das variáveis que compõe a equação de Reynolds o cálculo encontra-se no Apêndice B.2. É importante ressaltar que para o cálculo do Re no filamento, no lugar do diâmetro foi utilizado o valor do comprimento em virtude de se tratar da área de ação do fluxo.

4.1.3 TESTE COM PERFIS BIO-INSPIRADOS

Após os testes efetuados, as análises foram realizadas com base nos registros fotográficos e filmagens, verificando se os perfis bio-inspirados testados apresentaram algum mecanismo de voo, identificando as principais características estruturais em caso de estabilidade do perfil com o meio.

Cada perfil testado apresentou um comportamento específico. Os perfis 1, 3 e 4 foram suspensos pelo fluxo de ar, ao atingir uma determinada altura ocorre uma estabilização, já o perfil 2 permaneceu em repouso, sem indícios de elevação. Os registros fotográficos de forma sequencial dos testes realizados com os perfis bio-inspirados podem ser visualizados no Apêndice C. A Figura 35, evidencia os quatro perfis testados e seus respectivos momentos de estabilidade.

Figura 35 - Teste com 4 perfis bio-inspirados.



Fonte: Autor (2019)

O perfil 1 confeccionado em plástico, apresentou um comportamento bastante curioso, observou-se um posicionamento central, sem oscilações na altura e um movimento rotacional em torno do seu próprio centro. O teste com o perfil 1 foi repetido, e mais uma vez, os resultados foram os mesmos. Não se sabe ao certo a proveniência do movimento rotacional mas, especula-se uma possível influência do ventilador, o sentido preferencial de rotação foi o horário.

As filmagens possibilitaram a estimativa de rotações realizadas pelo perfil no tempo de um segundo. Marcou-se um ponto como referência para a contagem de voltas, em um vídeo com duração de 0:13 segundos foram contabilizados 40 voltas, o equivalente a 3 rps (revolução por segundo). É importante ressaltar, que o método foi totalmente visual, logo erros estão atrelados.

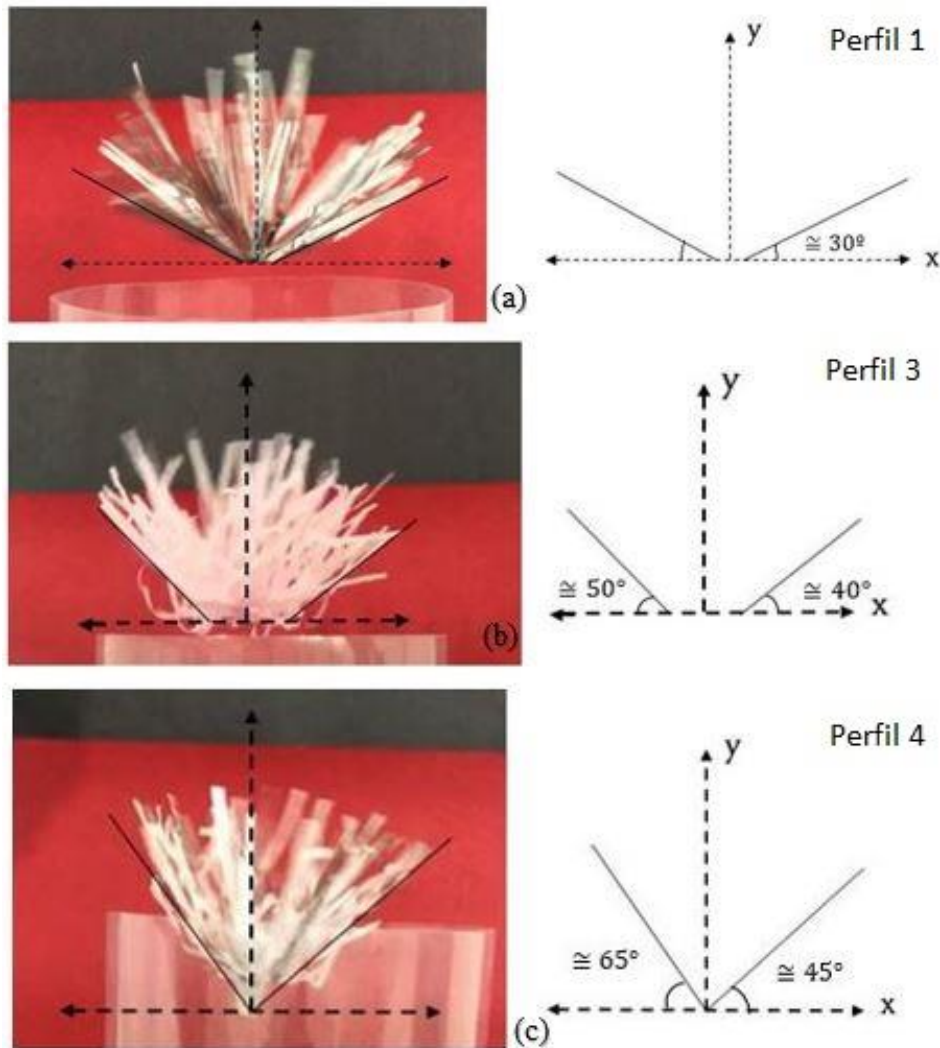
O perfil 2 confeccionado também em plástico e acrescido de um filete, não apresentou estabilidade. Esse fato pode ser explicado pela relação de massa versus empuxo, não ocorreu uma igualdade entre as forças não satisfazendo a condição de equilíbrio entre o perfil e o fluido. O perfil permaneceu em repouso e não apresentou movimento rotacional, logo, o se fez necessário o cálculo de rps.

Confeccionado em papel seda e o único com 120 filamentos, o perfil 3 apresentou um resultante semelhante ao perfil 1, estabilidade e um lento movimento circular. O corpo de prova, atingiu uma determinada altura e permaneceu plainando.

O último corpo de prova testado foi perfil mesclado com 86 filamentos preso a um filete. Verificou-se que a estrutura, assim como o perfil 2, estava muito pesada. Para conseguir estabilidade, a redução do filete pela metade se fez necessário, realizado o teste com a novo peso, constatou-se que essa redução foi suficiente para se chegar a uma condição de estabilidade.

Durante as análises dos perfis, um ponto observado foi a ângulo gerado pela região dos filamentos, constatou-se um ângulo preferencial para cada perfil, é importante ressaltar que o tipo do material também influencia. O mapeamento dessas angulações foi efetuada com base nas imagens, foram traçados eixos coordenados x e y e marcado ângulo formado entre o eixo e o filamento limítrofe. O método utilizado e os desenhos do característicos dos perfis 1, 3 e 4 encontra-se exibidos na Figura 36.

Figura 36 - Ângulos característicos dos perfis.



Fonte: Autor (2019)

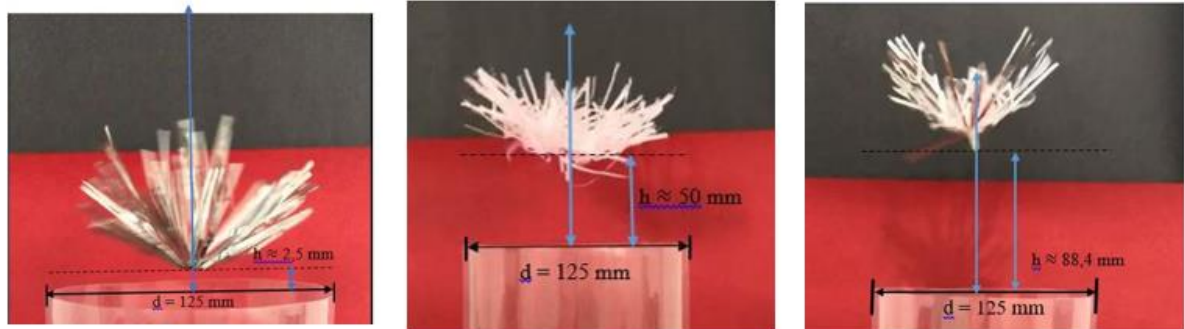
Na Figura 36 é notório uma faixa de angulação que possibilita a estabilidade do perfil. Em (a) percebe-se uma simetria e formação de ângulo com o eixo coordenado imaginário de aproximadamente 30° graus, diferentemente de (b) e (c) que o registro não favoreceu essa correspondência de ângulos, e variou entre aproximadamente 40° a 65° graus. Acredita-se que esse ângulo formado seja um fator determinante para a condição de estabilidade, e está susceptível a variação quando ocorrer mudanças de material e velocidade de fluxo.

Foram observados também as alturas alcançadas pelos perfis, percebeu-se uma variação, o perfil 4 chegou a uma elevação de 88,4 mm a maior alcançada, o perfil 1 e 3 com 2,5 mm e 50 mm, respectivamente. Em virtude da impossibilidade de meios de medição no ato do teste, as alturas foram realizadas por meio das imagens, utilizou-se o valor do diâmetro (único conhecido) como referência e, uma analogia foi realizada com base nesse comprimento.

Uma reta com o mesmo comprimento do diâmetro de 125 mm foi traçada verticalmente formando um ângulo de 90° graus com a área transversal da seção 3. Ao lado dessa reta, uma

outra foi traçada, correspondendo a altura alcançada pelo perfil. Por analogia chegou-se a um valor aproximado da distância. O método utilizado, encontra-se representado na Figura 37.

Figura 37 - Alturas alcançadas pelos perfis 1, 3 e 4.



Fonte: Autor (2019)

Afim de se obter uma visão ampla acerca dos resultados obtidos, os dados foram reunidos e inseridos na Tabela 8. Essa conjuntura possibilitará uma análise comparativa dos comportamentos e desempenhos dos perfis testados.

Tabela 8 – Comparativo dos resultados obtidos.

Perfil	Material	Massa	Re	Altura	Comportamento Observado	Gráfico
1	Plástico sem filete	0,3537g	11136	2,5 mm	Estabilidade Movimento rotacional	
2	Plástico com filete	0,4758g	11136	-	Sem estabilidade Sem movimento rotacional	Sem gráfico
3	Papel seda sem filete	0,4336g	9984	50 mm	Estabilidade Sem movimento rotacional	
4	Mesclado com filete	0,4758g	10368	88,4 mm	Estabilidade Movimento rotacional (lento)	

Fonte: Autor, 2019

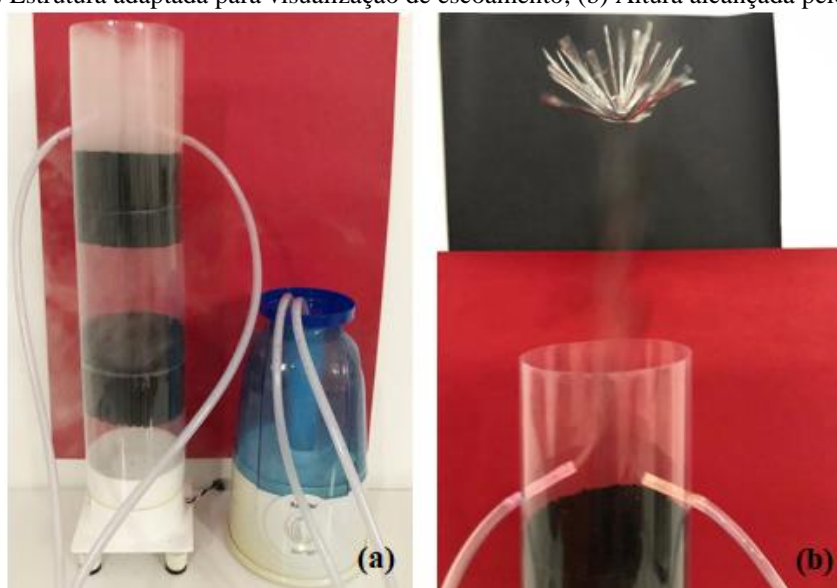
4.1.4 TESTE DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO NO PERFIL BIO-INSPIRADO

Para que o teste de visualização de linhas de correntes por meio do escoamento pudesse ser realizado, o túnel de vento vertical precisou sofrer algumas alterações estruturais. Na seção 3, na região acima da colmeia dois furos foram feitos em lados opostos para a entrada de fumaça, utilizou-se mangueiras para fazer essa ligação do gerador de fluxo até o túnel.

Utilizou-se um umidificador de ar da marca G-Tech, ultrassônico de alta frequência que produz uma névoa finíssima, o fato da fumaça ser a base de água impossibilitou o uso dos perfis 3 e 4 por serem de papel. O teste de escoamento foi realizado apenas com o perfil de plástico, com objetivando a visualização das linhas de corrente ao escoar pela região de filamentos.

O procedimento experimental ocorreu da mesma forma da estabilidade, só com acréscimo da fumaça. A adaptação da estrutura experimental e a altura alcançada pelo perfil encontra-se na Figura 38.

Figura 38 - (a) Estrutura adaptada para visualização de escoamento; (b) Altura alcançada pelo perfil plástico.

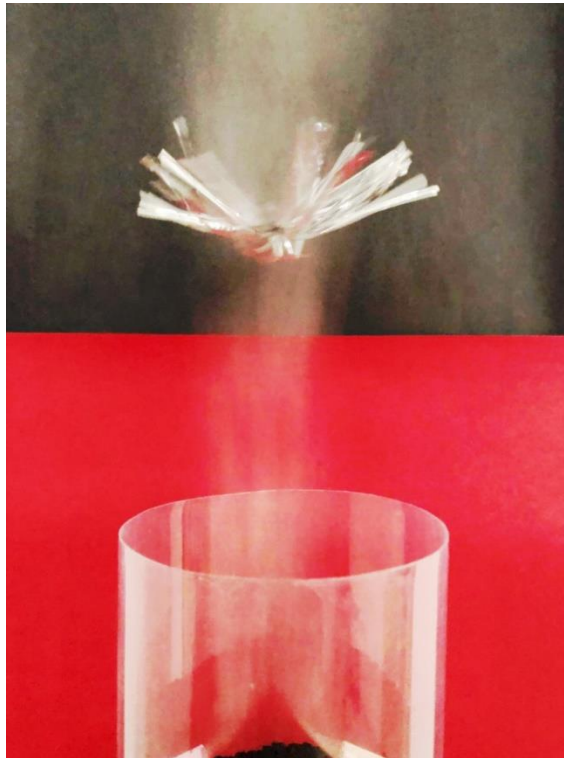


Fonte: Autor (2019)

Em (a) o gerador de fumaça encontra-se ligado para preencher a seção do túnel, optou-se em injetar fumaça na última seção, devido a vazão fornecida não ser o suficiente para se visualizar, caso a alimentação tivesse sido na primeira seção. Em (b) mostra o teste com perfil submetido a fumaça, o mesmo alcançou uma altura maior do que sem a utilização da fumaça, de alguma maneira, ela auxilia nesse processo. Além disso, é possível visualizar a forma na qual ocorre o escoamento, o fluxo passa entre os filamentos e não apenas em torno da região plumada.

O registro fotográfico precisou ser submetido a um tratamento de imagem, objetivando mais visibilidade das linhas de corrente. Para o tratamento utilizou-se um software de edição de imagens, aumentou em 80 % o brilho e, em sequência o uso do efeito avivar em modo obscurecido. As edições não provocaram alterações na imagem, apenas, evidenciaram o comportamento das linhas. Após tratamento, as linhas de corrente encontra-se evidenciadas na Figura 39, e a imagem original encontra-se no Apêndice C.2.

Figura 39 - Visualização de escoamento no perfil bio-inspirado.



Fonte: Autor (2019)

5 CONCLUSÕES

A proposta de analisar estabilidade de perfis bio-inspirados em túnel de vento vertical foi atendido. O túnel de vento vertical foi dimensionado, confeccionado, testado e considerado válido para o tipo de estudo a qual foi proposto, essa validade é atestada através dos resultados obtidos de estabilidade de perfis bio-inspirados e de geometrias definidas usuais, além da visualização de linhas de corrente.

A utilização dos três laminadores de fluxo ao longo do comprimento do túnel foi de extrema importância, além de auxiliar com uma perda de carga favorável, contribuiu para um fluxo mais liso reduzindo de forma considerável a turbulência inerente do escoamento. O uso de colmeias em quantidade é uma configuração nova, essa metodologia não foi encontrada em nenhuma literatura nacional.

Os perfis 1, 3 e 4 confeccionados e inspirados na geometria das espécies de semente *T.officinale*, *T. dubius* e *C. cardunculu*, cuja as massas estão entre 0,3g a 0,5g, quando submetidos a uma velocidade de $1,2 \text{ m.s}^{-2}$ apresentaram estabilidade, com exceção do perfil 2. Os dados expostos na Tabela 8, mostraram que o perfil 2 e 4 mesmo com massas iguais não obtiveram o mesmo comportamento, podendo assim descartar a influência do fator massa. Outros dois fatores justificáveis seriam o tipo do material e o ângulo formado.

A Tabela 8, permite que um comparativo entre a altura e o ângulo. Os gráficos evidenciam que quanto maior for o ângulo formado com o eixo x maior será a altura alcançada pelo perfil, obviamente, considerando os parâmetros no qual os testes foram realizados. Outro ponto, a respeito dos ângulos é que os perfis apresentaram estabilidade numa faixa de ângulos de 30° a 60° graus (simétricos ou não), acredita-se que essa angulação deve ser considerada em caso de réplica do perfil.

O número de Reynolds variou de aproximadamente 10000 a 11000 no papus e 4900 a 5400 nos filamentos, essa faixa classifica o escoamento do ar em ambos como turbulento.

Os testes com os perfis de geometria definida não foram satisfatórios, a relação massa versus empuxo não propiciaram estabilidade, as forças atuantes (empuxo e resistência) foram superiores a força peso, considerando os parâmetros a qual foram submetidos. Atribui-se a esses perfis de geometria definida testados a condição de geometria não-aerodinâmica.

A descoberta de Cummins *et al.* (2018) a respeito do mecanismo de voo do dente-de-leão por meio da formação de um anel de vórtice separado acima do papus, induziu a responder questionamento exposto na metodologia: “É possível que um perfil inspirado na geometria do dente-de-leão apresente um comportamento semelhante?”. Sim, é possível. Os testes mostraram

que ao “perturbar” a região da possível localização do vórtice, o perfil perdia sustentação. Tal fato, permite concluir que a estabilidade alcançado pelo perfil de geometria similar esteja associado a um vórtice, comportamento semelhante ao da semente de dente-de-leão. Infelizmente, por indisponibilidade de equipamentos não foi possível registro visual desse vórtice.

Em virtude dos resultados satisfatórios e funcionalidade da geometria do perfil bio-inspirado, atribui-se ao protótipo o título de semente sintética. O estudo comprova, que corpos com pouca área transversal disponível, formada por filamentos eriçados, também propiciam estabilidade. Essa estabilidade é justificada por Cummins *et al.* (2018) em sua literatura, como resultante de um “efeito parede”, que nada mais é que, uma interação dos filamentos que reduz passagem do fluxo e permite a semente plainar.

O túnel de vento vertical mostrou eficácia no teste de escoamento no perfil bio-inspirado 1, os registros evidenciaram as linhas de corrente de forma nítida passando entre os filamentos e não somente em torno do papus. O fluxo auxiliou o perfil a alcançar uma altura maior comparado ao teste de estabilidade. Apesar, dos números de Reynolds alegarem um regime turbulento, não foram visualizados turbulências acentuadas no escoamento.

Visto que os resultados apresentados no presente trabalho tratam-se de dados baseados em testes reais em um túnel de vento vertical, atribui-se credibilidade aos comportamentos observados e ao estudo desenvolvido

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, podem ser listadas algumas propostas:

- Implantação de sensores e/ou instrumentos que possibilite a obtenção de valores de pressão sobre o perfil determinando assim as forças de sustentação e arraste atuantes.
- Testar outras geometrias de sementes para confecção de perfis bio-inspirados.
- Utilização de câmeras de alta e baixa velocidade, laser e anemometria Doppler, para a visualização do vórtice.
- Padronização das dimensões do corpo de prova.
- Dimensionamento e confecção de filetes para a condição de estabilidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, S.R. **An Experimental Study of the Wake of Typical Automobile Shapes.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol.9, 1983.

AIRBUS. **Biomimicry: engineering in nature's style.** Disponível em: < <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2018/01/biomimicry--engineering-in-nature-style.html>>. Acesso em: 26 jun 19.

ANDENBERG, A.A., BALDWIN, B.G., BAYER, R.G., BREITWIESER, J., JEFFREY, C., DILLON, M.O., ELDEÑAS, P., FUNK, V., GARCIA-JACAS, N., HIND, D.J.N., KARIS, P.O., LACK, H.W., NESON, G., NORDENSTAM, B., OBERPRIELER, CH., PANERO, J.L., PUTTOCK, C., ROBINSON, H., STUESSY, T.F., SUSANNA, A., URTUBEY, E., VOGT, R., WARD, J. & WATSON, L.E. 2007. Compositae. Pg. 61- 588. In: J.W. Kadereit & C. Jeffrey (Eds.). **Flowering Plants Eudicots Asterales**, Vol. VIII. The Families and Genera of Vascular Plants, K. Kubitzki (Ed.). Springer – Verlag, 2007.

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

ANDERSON JR., John D. **Fundamentals of Aerodynamics.** 2ª ed. Editora McGraw-Hill, 2011.

ANDERSON, D.F, SCOTT, E., **Understanding Flight**, McGraw-Hill, 2nd ed., United States of America, 293p., 2009.

ÁSSI, G. R. S. **Estudo experimental do efeito de interferência no escoamento ao redor de cilindros alinhados.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

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

BARROSO, G.M.; PEIXOTO, A.L.; COSTA, C.G.; ICHASO, C.L.F.; GUIMARÃES, E.F.; LIMA, H.C. de. 1991. **Sistemática de Angiospermas do Brasil.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. v.3. pp. 237-315.

BENYUS, Janine M. **Biomimética – Inovação inspirada pela natureza.** Ed. Pensamento-Cultrix Ltda, 2003.

BLESSMANN, J., **Obtenção de Perfis de Velocidade Média em Túnel de Vento.** Revista Brasileira de Tecnologia, São Paulo, 1990.

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

COUTINHO, Felipe Rodrigues. **Projeto de um túnel aberto subsônico.** Rio de Janeiro, RJ: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

ECODESIGN. **Biomimética: A natureza como modelo e medida.** Disponível em: <<http://www.ecodesenvolvimento.org/noticias/biomimetica-a-natureza-como-modelo-e-medida#ixzz1Vo5bSmfj>>. Acesso em: 26 jun 19.

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

FREIRE, ATILA PANTALEÃO S., **Teoria de Camada Limite.** Rio de Janeiro, RJ: UFRJ: Programa de Engenharia Mecânica, 1990.

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

GROFF, J. E. A.; ALÉ, J. V. **Projeto de túnel de vento subsônico de circuito aberto.** Rio Grande do Sul: PUC-RS, 2000.

LARICA, Neville Jordan. **Design de Transportes: Arte em Função da Mobilidade.** Rio de Janeiro: 2AB / PUC-RIO, 2003. 216p.

LOREDO-SOUZA, A. M. ; NÚÑEZ, G. J. Z. ; OLIVEIRA, M. G. K. ; SIQUEIRA, G. M. ; BÊNIA, M. C. D. . **Majorações e Reduções nas Cargas de Vento em Edifícios Altos de Concreto Armado: Influência de Prédios Vizinhos.** In: 51 Congresso Brasileiro do Concreto, 2009, Curitiba. Anais do 51 Congresso Brasileiro do Concreto, 2009.

MARTINS, Rui, A. L. **Biomimética do projecto de estruturas espaciais.** Dissertação de Mestrado FCT/UNL.Lisboa, 2012.

MEJÍAS, Alberto Muñoz . **Diseño y Análisis Computacional para Túnel de Viento de Baja Velocidad.** Madrid, ES: UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID - ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR, 2012.

NAKAJIMA, N.J. & SEMIR, J. 2001. **Asteraceae do Parque Nacional da Serra da Canastra,** Minas Gerais, Brasil. *Revta. Brasil. Bot.* 24(4): 471-478.

PERES, M. K. **Estratégias de dispersão de sementes no bioma cerrado: considerações ecológicas e filogenéticas.** Tese de Doutorado UnB, Brasília, 2016.

PEREIRA, PEDRO H. T. **Análise da interferência entre cilindros rígidos alinhados sujeitos a vibrações induzidas pelo escoamento.** Joinville UFSC 2018.

RIBEIRO, P. A. R. **Desprendimento de vórtices e controle em esteira de cilindros por simulação numérica direta.** 2002.

RIBEIRO, Marcelo. **Controle Ativo de Vibrações Estruturais Induzidas pela Ação do Vento.** Dissertação de Mestrado Juiz de Fora UFJF 2013

RUBINO, Leonardo F. **Simulação numérica de vibração induzida por vórtices via dinâmica dos fluidos computacional.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, UFRJ, 2016.

SCHEIMAN, James; BROOKS, J. D. **Comparison of experimental and theoretical turbulence reduction from screens, honeycomb, and honeycomb-screen combinations.** *Journal of Aircraft*, 1981.

SEIDEL *et al.* **Structural Analysis of Biologically Inspired Small Wind Turbine Blades.** *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* (2017) 12:19 DOI 10.1186/s40712-017-0085-3

WATTENDORF, Frank L. **Factors Influencing the Energy Ratio of Return Flow Wind Tunnels.** Cambridge: Fift International Congress for Applied Mechanics. September 12-16, 1938

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

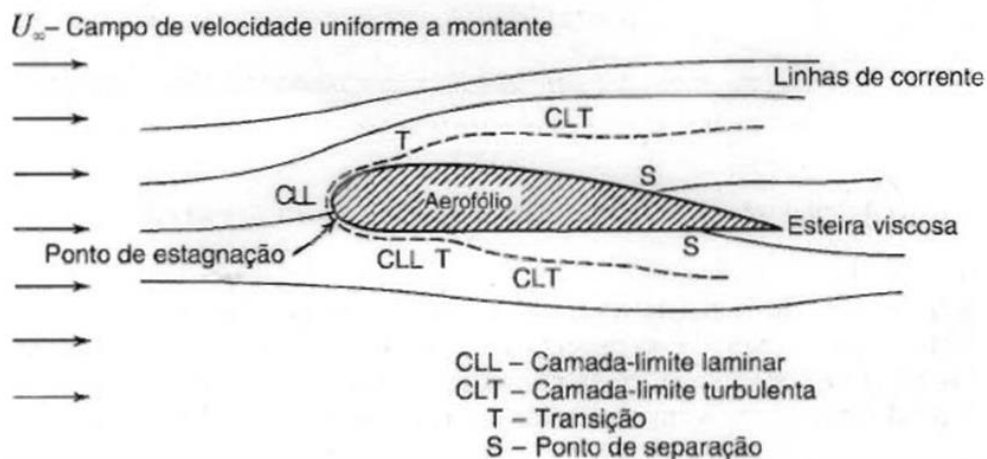
7 APÊNDICES

APÊNDICE A: CAMADA LIMITE A SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE

Os escoamentos externos sobre um determinado corpo apresentam grandes variedades de fenômenos, suas características dependem diretamente de parâmetros como morfologia, velocidade, orientação e da propriedade do fluido em questão (MUNSON, 2004). Na Figura A.1 mostra um fluido viscoso escoando sobre um aerofólio com um alto número Reynolds, esse escoamento de corrente livre divide-se no ponto de estagnação e circunda o corpo, a parte em contato com superfície absorve a velocidade do corpo ocasionando em uma condição de não-deslizamento. O fato resulta na formação de uma camada limite na superfície superior e inferior do corpo, onde o efeito da viscosidade atua e é importante (FOX, 2006).

Em outras palavras, quando um fluido escoar sobre uma superfície, o fluido instantaneamente em contato com a parede adere a velocidade do corpo, se a viscosidade for pequena, essa mesma velocidade aumenta, indo de zero para o valor do escoamento externo. Tal fenômeno ocorre em uma região estreita, onde as forças de atrito se fazem presente retardando o fluido de sua velocidade externa para um completo repouso na parede. Deste modo, conceitua-se essa região estreita de camada limite.

Figura A.1 - Escoamento viscoso em torno de um aerofólio.



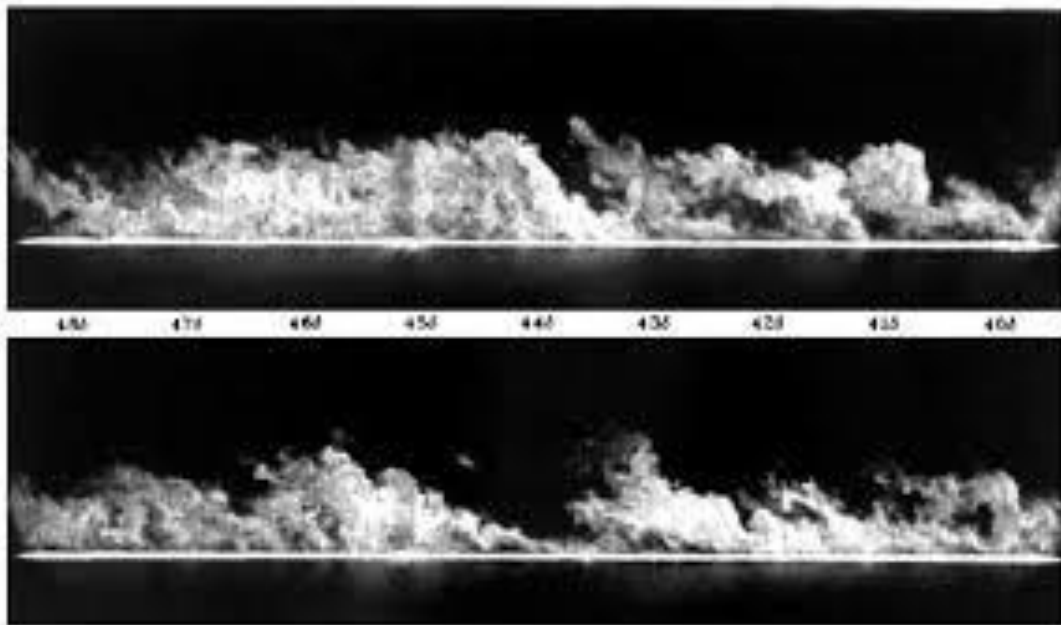
Fonte: Fox (2006)

Esse escoamento de corrente livre divide-se no ponto de estagnação e circunda o corpo, a parte em contato com superfície absorve a velocidade do corpo ocasionando em uma condição de não-deslizamento. O fato resulta na formação de uma camada limite na superfície superior e inferior do corpo, onde o efeito da viscosidade atua e é importante (FOX, 2006).

Em outras palavras, quando um fluido escoar sobre uma superfície, o fluido instantaneamente em contato com a parede adere a velocidade do corpo, se a viscosidade for pequena, essa mesma velocidade aumenta, indo de zero para o valor do escoamento externo. Tal fenômeno ocorre em uma região estreita, onde as forças de atrito se fazem presente retardando o fluido de sua velocidade externa para um completo repouso na parede. Deste modo, conceitua-se essa região estreita de camada limite.

Como ilustrado na Figura A.1, existe um campo de velocidade uniforme (U_∞), e é de conhecimento que o escoamento da camada limite pode ser laminar (CLL) ou turbulento (CLT), para estabelecer o estado de transição (T) não existe um valor único que caracterize a transição de escoamento laminar para um turbulento na camada limite, verifica-se o comportamento descrito na Figura A.2.

Figura A.2 - Camada limite turbulenta.



Fonte: Teoria de Camada Limite, Freire (1990) – UFRJ

Na camada-limite o escoamento é inicialmente laminar, a um certo distanciamento do ponto de estagnação ocorre a transição. O estado transitório depende de fatores como o gradiente de pressão, a rugosidade superficial, a transferência de calor, as forças de campo e as perturbações da corrente livre. Passando o estado de transição a camada-limite torna-se turbulenta, acontece um pequeno deslocamento das linhas de corrente na região exterior ocasionado pelo crescimento das camadas-limite sobre as superfícies, onde é uma região de pressão crescente, ou seja, o gradiente de pressão é adverso devido sua oposição ao movimento

do fluido, desacelerando as partículas fluidas resultando na separação do escoamento (S) e formação de esteiras viscosas (FOX, 2006).

A teoria da camada-limite propicia uma compreensão qualitativa e quantitativa com respeito aos escoamentos viscosos mas, devido a separação do escoamento e a formação de esteiras, a teoria não permite um cálculo quantitativo de todo o campo do escoamento. Atualmente, não existe um teoria satisfatória para as forças sobre um corpo arbitrário imerso a uma corrente escoamento a um determinado número de Reynolds, logo a duas maneiras possíveis seriam por experimentos de escoamentos externos e por análise computacional.

APÊNDICE B: CÁLCULOS REALIZADOS

B.1 - Cálculo de Força peso, Empuxo e Resistência

Para determinar a força peso, empuxo e resistência utilizou-se as equações (14), (15) e (16):

$$P = mg$$

$$E = \rho_{fluido} V_{corpo} g$$

$$F_R = C_r \gamma A \frac{v^2}{2g}$$

Onde,

$$g \text{ (aceleração da gravidade)} = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$$

$$\rho \text{ (massa específica)} = 1,184 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\gamma \text{ (peso específico)} = 1,225 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$v \text{ (velocidade do escoamento)} = 1,2 \text{ m.s}^{-1}$$

$$A \text{ (área transversal ao fluxo) Esfera: } 4\pi r^2$$

$$\text{Cone: } \pi(R + r)h$$

$$C_r \text{ (coeficiente de resistência) Esfera: } 0,47$$

$$\text{Cone: } 0,34$$

$$V_{corpo} \text{ (volume do corpo) Esfera: } \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$\text{Tronco de cone: } \frac{\pi H}{3} (R^2 + Rr + r^2)$$

Esfera 1

$$P = mg = 7,1 * 9,81 = 0,0697 \text{ N}$$

$$E = \rho_{fluido} V_{corpo} g = 1,184 * 0,00052 * 9,81 = 0,00608 \text{ N}$$

$$F_R = C_r \gamma A \frac{v^2}{2g} = 0,47 * 1,225 * 0,03 * \frac{1,2^2}{2 * 9,81} = 0,1278 \text{ N}$$

Esfera 2

$$P = mg = 0,0042 * 9,81 = 0,0412 \text{ N}$$

$$E = \rho_{fluido} V_{corpo} g = 1,184 * 0,0002209 * 9,81 = 0,002566 \text{ N}$$

$$F_R = C_r \gamma A \frac{v^2}{2g} = 0,47 * 1,225 * 0,018 * \frac{1,2^2}{2 * 9,81} = 0,0719 \text{ N}$$

Esfera 3

$$P = mg = 0,0047 * 9,81 = 0,0461 \text{ N}$$

$$E = \rho_{fluido} V_{corpo} g = 1,184 * 0,0000510 * 9,81 = 0,002566 \text{ N}$$

$$F_R = C_r \gamma A \frac{v^2}{2g} = 0,47 * 1,225 * 0,018 * \frac{1,2^2}{2 * 9,81} = 0,0270 \text{ N}$$

Esfera 4

$$P = mg = 0,001 * 9,81 = 0,0098 \text{ N}$$

$$E = \rho_{fluido} V_{corpo} g = 1,184 * 0,0000214 * 9,81 = 0,000025 \text{ N}$$

$$F_R = C_r \gamma A \frac{v^2}{2g} = 0,47 * 1,225 * 0,000804 * \frac{1,2^2}{2 * 9,81} = 0,0033 \text{ N}$$

Cone

$$P = mg = 0,0014 * 9,81 = 0,0137 \text{ N}$$

$$E = \rho_{fluido} V_{corpo} g = 1,184 * 0,00003938 * 9,81 = 0,000457 \text{ N}$$

$$F_R = C_r \gamma A \frac{v^2}{2g} = 0,34 * 1,225 * 0,000952 * \frac{1,2^2}{2 * 9,81} = 0,00560 \text{ N}$$

B.2 - Cálculo do Número de Reynolds

Para determinar o número de Reynolds no papus e no filamento utiliza-se a equação (8):

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{\rho V L}{\mu}$$

Onde,

$$\rho \text{ (massa específica)} = 1,184 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\mu_{Ar} \text{ (viscosidade dinâmica do fluido)*} = 1,85 \text{ E}^{-5} \text{ N.s.m}^{-2}$$

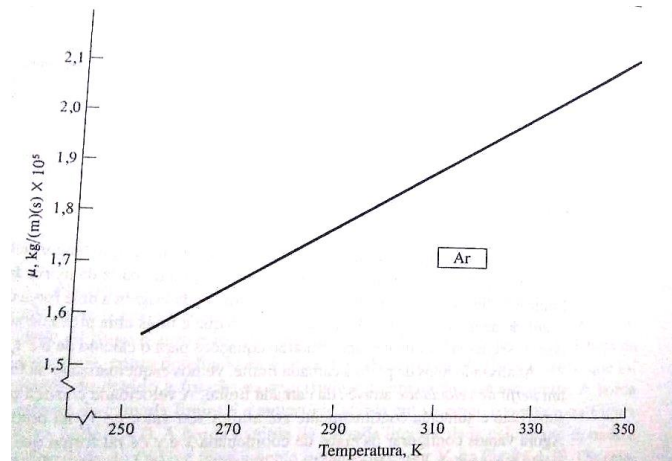
$$V \text{ (velocidade do escoamento)} = 1,2 \text{ m.s}^{-1}$$

D (diâmetro do papus) ou L (comprimento do filamento)

* A viscosidade (μ_{Ar}) varia com a temperatura (T) dado em Kelvin (K).

$T(K) = T_o + 273,15 = 298,15$ K; $T_o = 25$ °C. Valor de μ_{Ar} retirada do gráfico da Figura B.1 .

Figura B.1 – Variação de viscosidade com a temperatura.



Fonte: Anderson Jr. (2015)

Perfil 1

- Papus

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{1,184 * 1,2 * 0,145}{1,85 \times 10^{-5}} = 11136$$

- Filamento

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{1,184 * 1,2 * 0,07}{1,85 \times 10^{-5}} = 5376$$

Perfil 2

- Papus

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{1,184 * 1,2 * 0,145}{1,85 \times 10^{-5}} = 11136$$

- Filamento

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{1,184 * 1,2 * 0,07}{1,85 \times 10^{-5}} = 5376$$

Perfil 3

- Papus

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{1,184 * 1,2 * 0,13}{1,85 \times 10^{-5}} = 9984$$

- Filamento

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{1,184 * 1,2 * 0,065}{1,85 \times 10^{-5}} = 4992$$

Perfil 4

- Papus

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{1,184 * 1,2 * 0,145}{1,85 \times 10^{-5}} = 10368$$

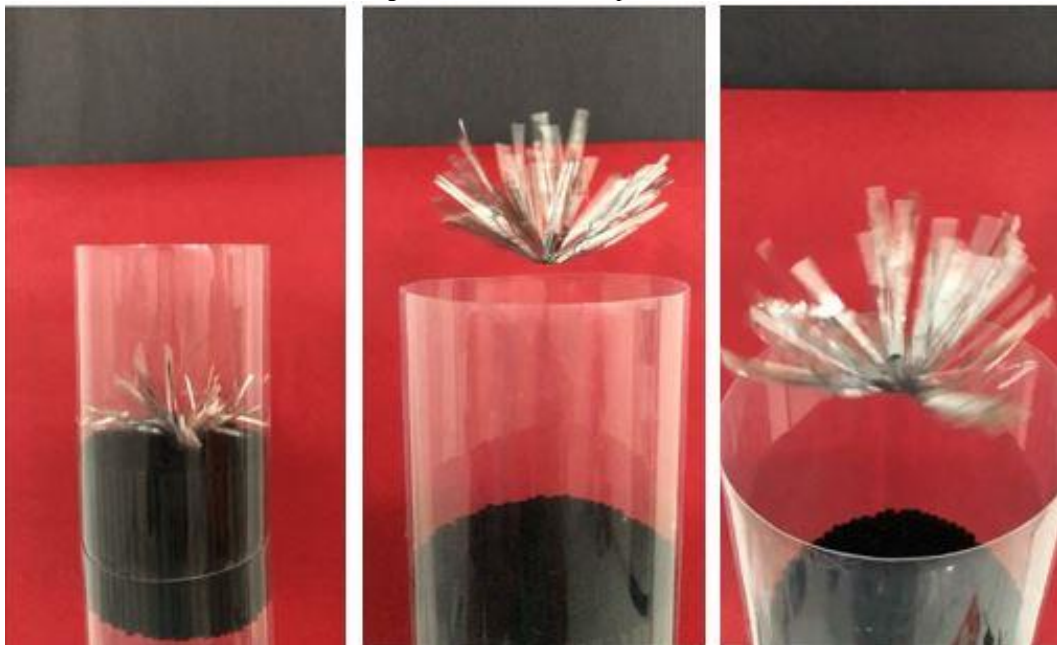
- Filamento

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{1,184 * 1,2 * 0,065}{1,85 \times 10^{-5}} = 4992$$

APÊNDICE C: REGISTROS FOTOGRÁFICOS E TRATAMENTO DE IMAGEM

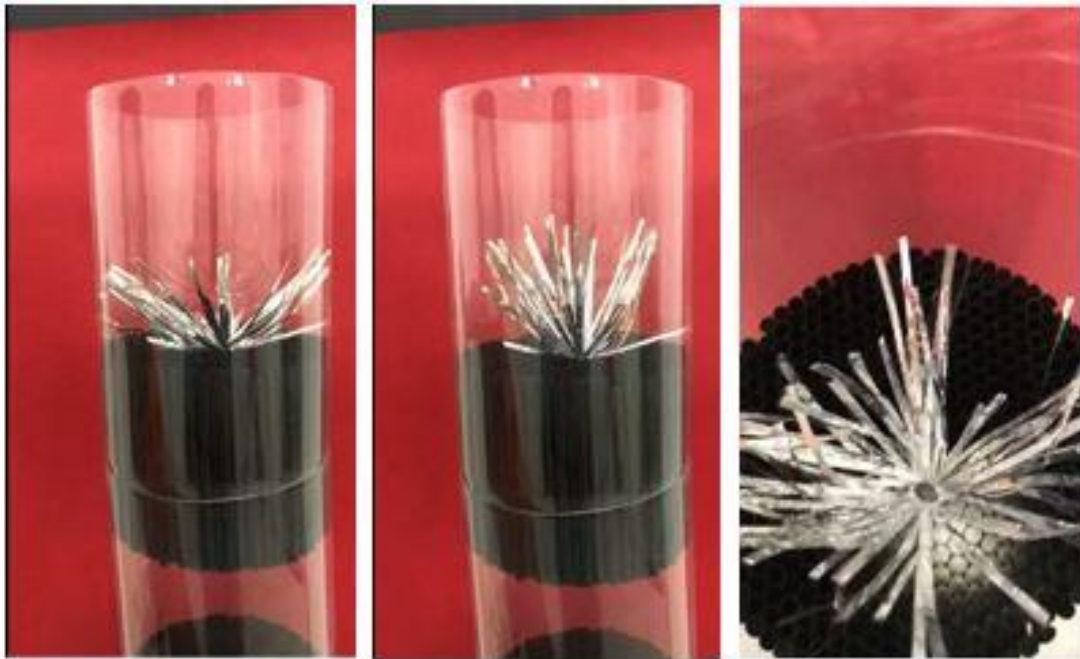
C.1 - Teste com perfis bio-inspirados

Figura C.1 - Perfil bio-inspirado 1.



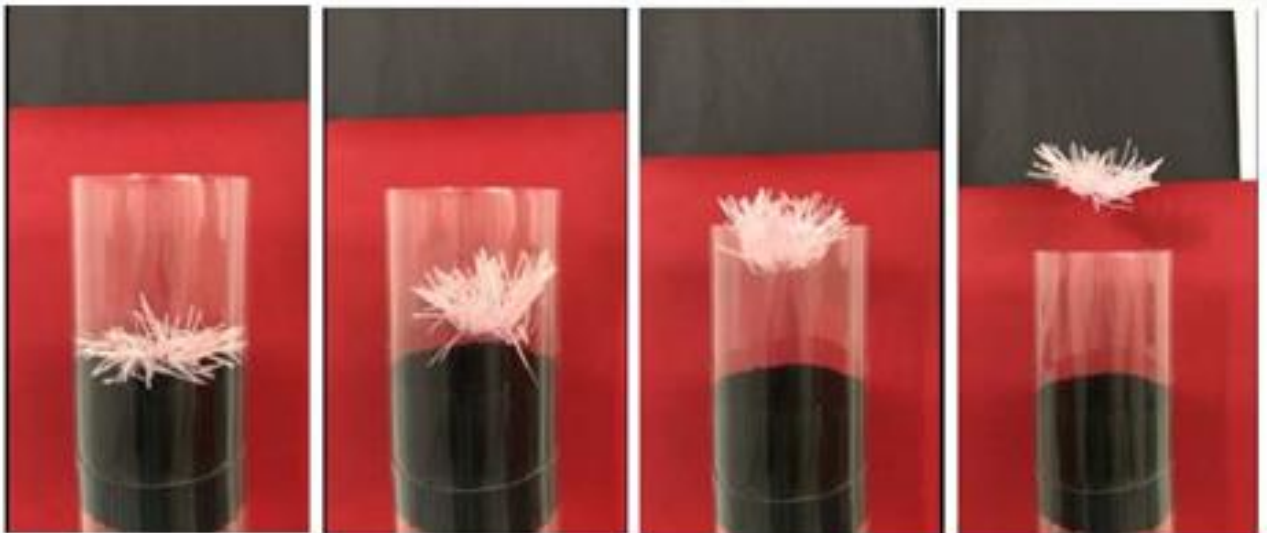
Fonte: Autor (2019)

Figura C.2 - Perfil bio-inspirado 2.



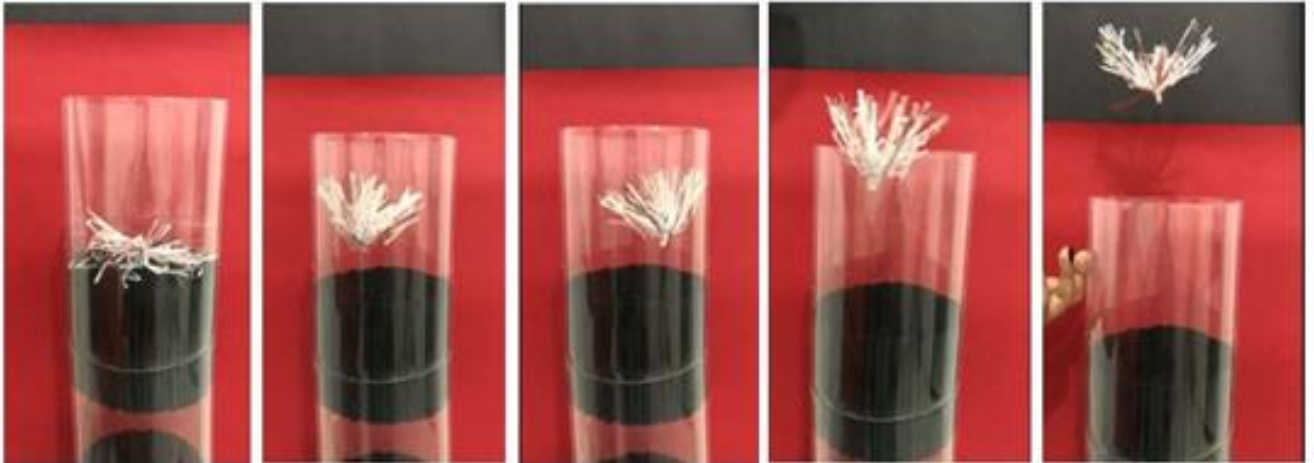
Fonte: Autor (2019)

Figura C.3 - Perfil bio-inspirado 3.



Fonte: Autor (2019)

Figura C.4 - Perfil bio-inspirado 4.



Fonte: Autor (2009)

C.2 - Tratamento de imagem

Tratamento executado: 80% de brilho / Aprofundar – Modo Obscurecido.

Figura C.5 – Original - Tratada

