TIAGO DA SILVA SOUZA

"GERAÇÃO DE VÓRTICES DE VON KÁRMÁN COM MODELAGEM EM CFD".

Universidade de São Paulo
Biblioteca da Escola Politécnica

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Hidráulica

Orientador: Prof. Dr. Podalyro Amaral de Souza.

São Paulo

2016

2769048

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 31 de março de 2016

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

versão corr.

Catalogação-na-publicação

Souza, Tiago da Silva
Geração de vórtices de von Kármán com modelagem em cfd / T. S. Souza -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
51 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1.Vórtice 2.Von Kármán 3.Número de Reynolds 4.Número de Strouhal 5.CFD I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental II.t.

Aos meus pais, esposa e filha.

AGRADECIMENTOS

Desenvolver esta dissertação em muitos pontos, só foi possível por causa da boa vontade e paciência de muitas pessoas. Entre essas pessoas está o professor Podalyro Amaral de Souza, que além de me ensinar hidráulica também me ensinou virtudes como a paciência, o que é fundamental em um professor.

À Wandréa, por sempre estar disposta a ajudar.

Aos professores e amigos que fiz durante o curso, que sempre compartilharam seus conhecimentos.

Aos meus pais, irmãos e amigos, que sempre incentivaram e acreditaram em mim.

À minha esposa, que sempre esteve ao meu lado.

À minha filha Bárbara, razão da minha vida.

Ao meu Deus.

A dificuldade reside não nas novas ideias,
mas em escapar das velhas ideias.
(John Maynard Keynes)

RESUMO

Assim como um peixe pode aproveitar a energia dos vórtices formados por uma rocha em uma corredeira para economizar energia e produzir impulso, este trabalho tem por objetivo mostrar que os vórtices de von Kármán ou esteira de vórtices, desprendidos de um corpo cilíndrico, colocado em um escoamento contínuo, com uma placa de determinado comprimento, posicionada atrás desse corpo cilíndrico e movimentando-se livremente na horizontal, pode vibrar e produzir movimentos rotacionais, obedecendo uma frequência, que pode ser devidamente aproveitado para geração de energia. Para tanto, utilizou-se software CFD (Computational Fluid Dynamic), para observar e quantificar os movimentos produzidos pela placa. Fez-se um experimento em CFD parecido com o que os irmãos Triantafyllou fizeram fisicamente, para que se tivesse um referencial para os demais experimentos. Observou-se também, como as placas de três comprimentos diferentes, com três velocidades diferentes, três números de Reynolds diferentes e com escoamentos laminar e turbulento, se comportam e qual delas produz movimento com maior frequência. Buscou-se verificar a eficiência do movimento para números de Strouhal menores e iguais a 0,21.

Palavras chave: Vórtice. Von Kármán. Número de Reynolds. Número de Strouhal. CFD.

ABSTRACT

Just as a fish can harness the energy of the formed vortices by a rock in the rapids to save energy and produce boost, this work aims to show that vortices von Kármán or Wake vortex, detached from a cylindrical body, placed in a continuous flow, with a plate of given length, positioned behind this cylindrical body and freely moving horizontally, can vibrate and produce rotational movements, following a frequency which can be properly harnessed for power generation. Therefore, we used CFD software (Computational Fluid Dynamic) to observe and quantify the movements produced by the plate. There was an experiment in CFD like what Triantafyllou brothers physically did, that they had a benchmark for other experiments. It was also observed, as the plates in three different lengths, three different speeds, three different Reynolds numbers and with laminar and turbulent flow, behave and which one produces motion with higher frequency. We attempted to verify the efficiency of movement to lower Strouhal numbers and equal to 0.21.

Keywords: Vortex. Von Kármán. Reynolds number. Strouhal number. CFD.

LISTA DE ILUSTAÇÕES

Figura 1 - Linha de tempo de alguns colaboradores para a ciência da mecânica dos fluidos. 12
Figura 2 - Escoamento Turbulento causado por obstruções triangulares e circulares 13
Figura 3 – Desenvolvimento da camada limite ao longo de uma placa, que ilustra variações na espessura da camada e tensão de cisalhamento na parede 14
Figura 4 – Separação da camada limite e esteira de vórtice turbulenta – escoamento sobre um cilindro circular com Re=2000. 15
Figura 5 – Escoamento ao redor de um cilindro. 16
Figura 6 – Esteira de vórtices de von Kármán 17
Figura 7 – Esteira de vórtices formada pelo arrasto nas extremidades. 17
Figura 8 – Design hidrodinâmico de barcos e peixes 18
Figura 9 – Vista esquemática de (*a*) Bénard-von Kármán (BvK) esteira de vórtice atrás de um cilindro circular e (*b*) reverso Bénard-von Kármán (rBvK) esteira de vórtice atrás de um peixe nadando. 20
Figura 10 - Ponte Tacoma Narrows, 1940. 21
Figura 11 – Diagrama que mostra o fólio e o cilindro em relação ao carro de reboque do tanque 24
Figura 12 – Esteira de vórtices de von Kármán (a) no fólio (b) e placa (c) 28
Figura 13 – Número de Strouhal versus número de Reynolds para um cilindro circular. 29
Figura 14 – Proporções utilizadas na simulação. 30
Figura 15 – Esquema do modelo 3D utilizado na simulação. 30
Figura 16 – Modelos 3D utilizados na simulação em perspectiva 31
Figura 17 – Demonstração de refinamento da malha para o cilindro e o fólio. 34
Figura 18 – Velocidade na esteira de vórtices na horizontal e na vertical. 35
Figura 19 – Visualização do efeito tridimensional minimizado no cilindro. 35
Figura 20 – Superfície gerada sobre o limite de velocidade 36
Figura 21 – Campos de velocidade na formação de vórtices em um perfil em "D" e velocidade u=0,002 m/s Re = 10^2 St=0,165. 36
Figura 22 – Campos de velocidade na formação de vórtices em um perfil em "D" e velocidade u=0,02 m/s Re = 10^3 St=0,210. 37

Figura 23 – Campos de velocidade na formação de vórtices em um perfil em "D" e velocidade u=0,2 m/s Re = 104 St=0,210. 37
Figura 24 – Limite dos campos de velocidade na formação de vórtices em um perfil em "D" e velocidade u=0,002 m/s Re = 10^2 St=0,165. 38
Figura 25 – Limite dos campos de velocidade na formação de vórtices em um perfil em "D" e velocidade u=0,02 m/s Re = 10^3 St=0,210. 38
Figura 26 – Limite dos campos de velocidade na formação de vórtices em um perfil em "D" e velocidade u=0,2 m/s Re = 10^4 St=0,210. 38
Figura 27 – Campo de vetores na formação de vórtices 39
Figura 28 – Gráficos de velocidade. 39
Figura 29 – Campo de vetores – fólio NACA 0012 – v=0,8 m/s. 40
Figura 30 – Campo de vetores – placa 50mm – v = 0,002 m/s. 41
Figura 31 – Campo de vetores – placa 50mm – v = 0,02 m/s. 41
Figura 32 - Campo de vetores – placa 50mm – v = 0,2 m/s. 42
Figura 33 - Campo de vetores – placa 75mm – v = 0,002 m/s. 42
Figura 34 – Campo de vetores – placa 75mm – v = 0,020 m/s. 43
Figura 35 – Campo de vetores – placa 75mm – v = 0,200 m/s. 43
Figura 36 – Campo de vetores – placa 100mm – v = 0,002 m/s. 44
Figura 37 – Campo de vetores – placa 100mm – v = 0,020 m/s. 45
Figura 38 – Campo de vetores – placa 100mm – v = 0,200 m/s. 45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cálculo do número de Strouhal – cilindro e fólio NACA 0012. 46
Tabela 2 - Cálculo do número de Strouhal – cilindro e placa. 46

LISTA DE SÍMBOLOS

C_D	Coeficiente de arrasto
F_D	Força de arrasto total
$\partial p/\partial s$	Gradiente de pressão
$\partial u/\partial y$	Gradiente de velocidade
ℓ	Comprimento característico
St	Número de Strouhal
A	Área da projeção do corpo no plano normal
L	Comprimento caracteristico
Re	Número de Reynolds
U	Velocidade de aproximação do fluido
f	Frequência de vórtices
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
ρ	Massa específica
τ	Tensão de cisalhamento
υ	Viscosidade cinemática do fluido
g_x	Aceleração gravitacional na direção x
g_y	Aceleração gravitacional na direção y
g_z	Aceleração gravitacional na direção z
u	Velocidade componente na direção x
v	Velocidade componente na direção y
w	Velocidade componente na direção z
t	Tempo
ω	Velocidade rotacional
r	Distância do eixo de rotação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 10

2. OBJETIVO 11

3. JUSTIFICATIVA 11

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 12

4.1 VÓRTICES 12

4.2 FORÇA DE ARRASTO 13

4.2.1 ARRASTO DE ATRITO 14

4.2.2 ARRASTO DE PRESSÃO 15

4.2.3 VÓRTICES NO NADAR DOS PEIXES 18

4.3 VÓRTICES DE VON KÁRMÁN 19

4.4 NÚMERO DE REYNOLDS 21

4.5 NÚMERO DE STROUHAL 22

5. MATERIAIS E MÉTODOS 24

5.1 INTRODUÇÃO 24

5.2 DINÂMICA COMPUTACIONAL DOS FLUIDOS – CFD 25

5.2.1 Equações Governantes 26

5.3 MÉTODO EXPERIMENTAL COMPUTACIONAL 27

5.4 "SETUP" DE SIMULAÇÃO 31

5.4.1 Ferramentas Geométricas - *Geometry tools* 31

5.4.2 Condições de contorno - *Bondary coditions* 31

5.4.3 Tamanho da malha - *Mesh size* 32

5.4.4 Movimento - *Motion* 32

5.4.5 Modo solução - *Solution mode* 32

5.4.6 Intervalo de tempo - *Time-step size* 32

5.4.7 Iterações internas - *Inner iterations* 33

5.4.8 Controle de solução - *Solution control* 33

5.4.9 Turbulência - *Turbulence* 33

6. RESULTADOS 34

6.1 MÉTODO COMPUTACIONAL 34

6.1.1 Comportamento do fólio NACA 0012 40

6.1.2 Comportamento da placa de 50mm 40

6.1.3 Comportamento da placa de 75mm 42

6.1.4 Comportamento da placa de 100mm 44
7. DISCUSSÃO **47**
8. CONCLUSÕES **49**
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **50**

1. INTRODUÇÃO

O mundo precisa cada vez mais da utilização de novos mecanismos, de sustentabilidade, inovação, e aperfeiçoamento de sistemas que já são utilizados, além de melhorar o aproveitamento de estudos e principalmente da aplicação desses estudos em áreas muitas vezes inusitadas.

O Brasil ainda se mostra carente da aplicação de tecnologias muitas vezes já desenvolvidas, da pesquisa em áreas que ainda não foram estudadas e do desenvolvimento de novas tecnologias de forma sustentável e com menos impactos.

Com base nessas necessidades, pesquisadores tem buscado na natureza soluções para o cotidiano. Essa mimese da natureza envolve estudos de várias áreas como, mobilidade aérea, aquática, construção, medicina, entre outras.

Há a necessidade de descobrir formas alternativas de geração de energia, de forma que, de alguma maneira se possa conquistar autonomia dos sistemas existentes. A maneira mais recente de pesquisa nessa área e nas demais é a observação e cópia dos sistemas presentes e muito bem desenvolvidos na natureza. Nessa busca, tem-se voltado a atenção no sentido de se explorar a formação de vórtices.

Em todos os lugares onde existe algum tipo de fluido, é muito provável que em algum instante os vórtices apareçam. Em algumas ocasiões o vórtice pode aparecer de forma inconveniente, fazendo com que estruturas vibrem, como foi o caso da ponte Tacoma Narrows.

Pesquisadores tem voltado os olhos de forma positiva para a formação de vórtices, através do aproveitamento de vibrações indesejadas e até mesmo provocando formações de vórtices bem desenvolvidas, como é o caso dos vórtices formados por peixes.

As pesquisas continuam para o desenvolvimento e aprimoramento da utilização de vórtices, e se em algum momento, for possível domar a geração de vórtices como os peixes fazem, então pode-se aproveitá-los de forma eficaz em benefício da humanidade.

2. OBJETIVO

Aproveitar os conceitos sobre a formação de vórtices em corpos cilíndricos e a natação dos peixes, afim de compreender melhor esse mecanismo de formação, organização e aproveitamento dos vórtices, para que o mesmo possa ser aproveitado para fins como por exemplo sistemas de geração de energia de baixa velocidade. Para tanto, estão sendo utilizados métodos computacionais como CFD (Computational Fluid Dynamic), para que se possa fazer uma melhor observação dos fenômenos de formação de vórtices.

3. JUSTIFICATIVA

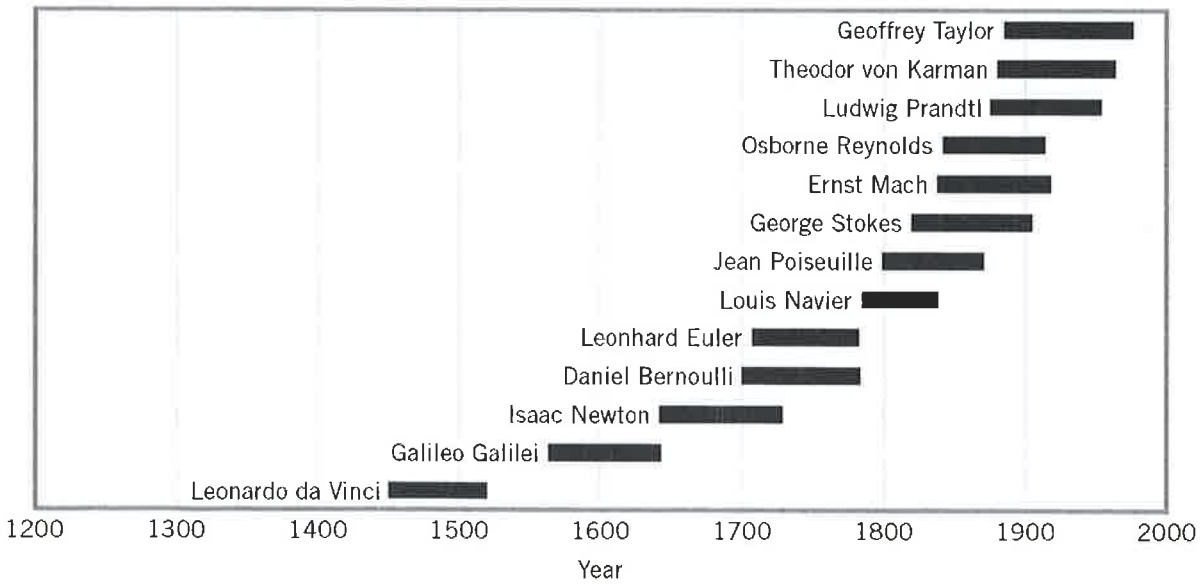
O estudo de novos métodos de possível geração de energia através da exploração do conceito de formação de vórtices e a vibração causada pelo seu desprendimento. De posse desse estudo, esse trabalho buscou aproveitar a oportunidade para o desenvolvimento do conhecimento sobre CFD, e observar sua aplicabilidade para estudos de projetos, e assim, verificar a viabilidade de construção de modelos físicos.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 VÓRTICES

Há muito tempo, existe a curiosidade de se saber sobre o desprendimento de vórtices. O desprendimento de vórtices era um fenômeno observado, assim como a gravidade e outros fenômenos. Sabia-se que os mesmos ocorriam mas havia dificuldade de explicação de como ocorriam. Do quadro abaixo destacam-se alguns estudiosos que contribuíram direta e indiretamente para que se pudesse explicar o conceito de vórtices, entre eles estão Leonardo da Vinci, Bernoulli, Euler, Navier, Stokes, Mach, Reynolds, Prandtl e von Kármán. Podemos acompanha a linha do tempo desses estudiosos na figura 1.

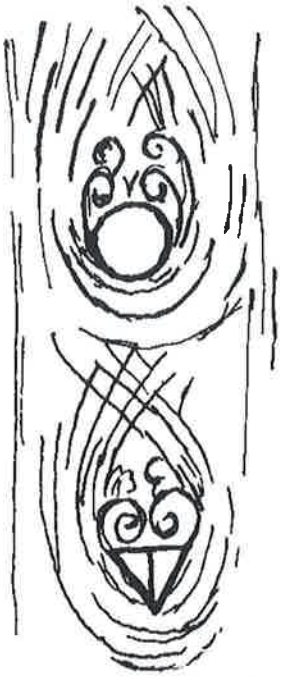
Figura 1 - Linha de tempo de alguns colaboradores para a ciência da mecânica dos fluidos.



Fonte: Munson e Young (2009)

Um dos famosos e pioneiro no estudo dos vórtices foi Leonardo da Vinci, observando que a água tenta manter seu curso de acordo com as forças ocasionais, e que, quando encontra um obstáculo pela frente termina o movimento iniciado por um movimento circular (KEMP, 2006). Um de seus desenhos de estudo pode ser observado na figura 2.

Figura 2 - Escoamento Turbulento causado por obstruções triangulares e circulares



Fonte: Kemp (2006)

A "instabilidade natural energética de escoamento" pode ser descrita pelas equações de instabilidade de Navier-Stokes, mas dificilmente isso ajuda a entender os mecanismos. (ADG-STANFORD, 2007)

4.2 FORÇA DE ARRASTO

Segundo Bistafa (2010), força de arrasto é considerada uma força detrimental, uma vez que age no sentido de impedir o deslocamento do corpo no meio fluido.

$$F_D = C_D \rho \frac{U_0^2}{2} A \tag{1}$$

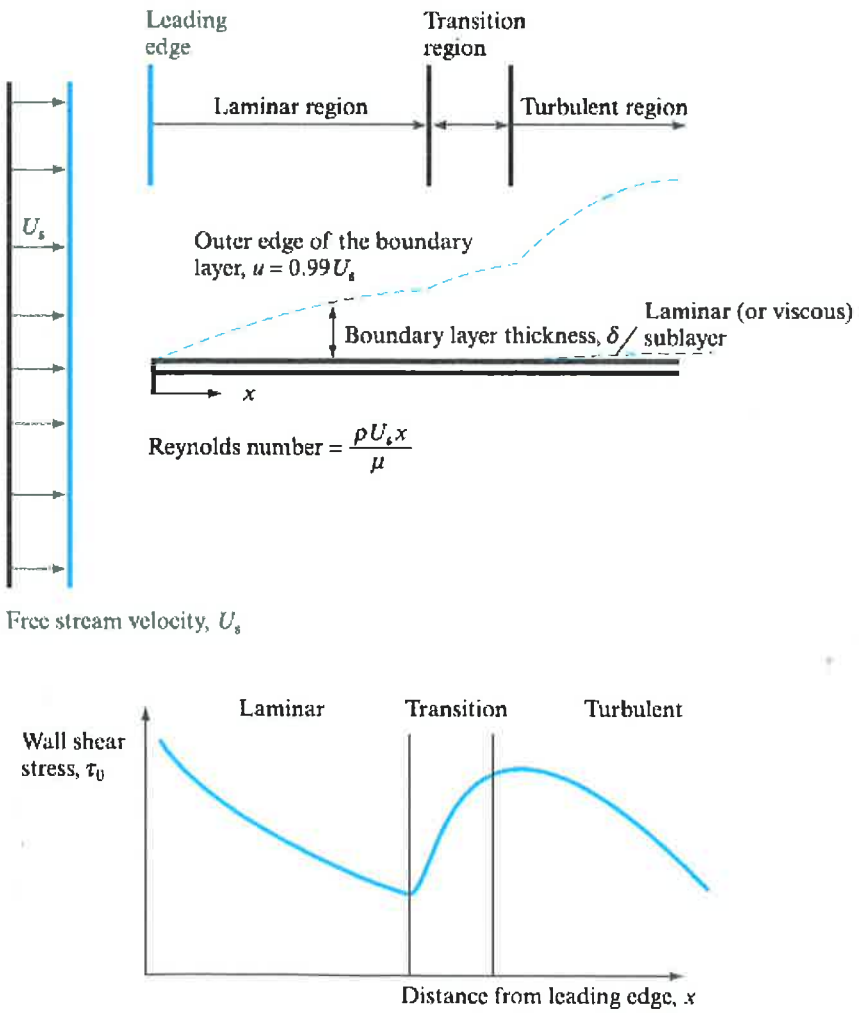
Onde F_D é o arrasto total, ρ é a massa especifica do fluido, U_0 é a velocidade de aproximação sem perturbações causadas pelo corpo, A é a área da projeção do corpo no plano normal de U_0 (exceto para placas planas, hastes e aerofólios, onde A é a maior área projetada), e C_D é o coeficiente de arrasto. (DAILY e HARLEMAN, 1966)

4.2.1 ARRASTO DE ATRITO

Segundo Currie (2003), camada limite é uma fina camada de fluido sujeito aos efeitos das forças viscosas.

De acordo com Munson e Young (2009), quem introduziu o conceito de camada limite foi o professor alemão Ludwig Prandtl com o objetivo de unificar os aspectos teóricos e experimentais da mecânica dos fluidos. Conhecido como fundador da mecânica dos fluidos moderna, foi ele que introduziu o conceito de que existe uma camada de fluido próximo a parede em que o atrito é fundamental e desprezível para o resto do fluido. A figura 3 representa o fenômeno da tensão de cisalhamento, os regimes de acordo com a região e a camada limite.

Figura 3 – Desenvolvimento da camada limite ao longo de uma placa, que ilustra variações na espessura da camada e tensão de cisalhamento na parede



Fonte: Douglas *et al.* (2005)

A camada limite é a camada de fluido próxima à superfície imersa de um sólido. Logo após a camada limite tem-se um escoamento livre, onde o gradiente de velocidade aumenta conforme o fluido se afasta da superfície do sólido. Conforme Douglas *et al.* (2005), quando o fluido na superfície da placa tem velocidade zero pode ser chamado de '*no slip*', e a tensão de cisalhamento pode ser descrita conforme equação abaixo.

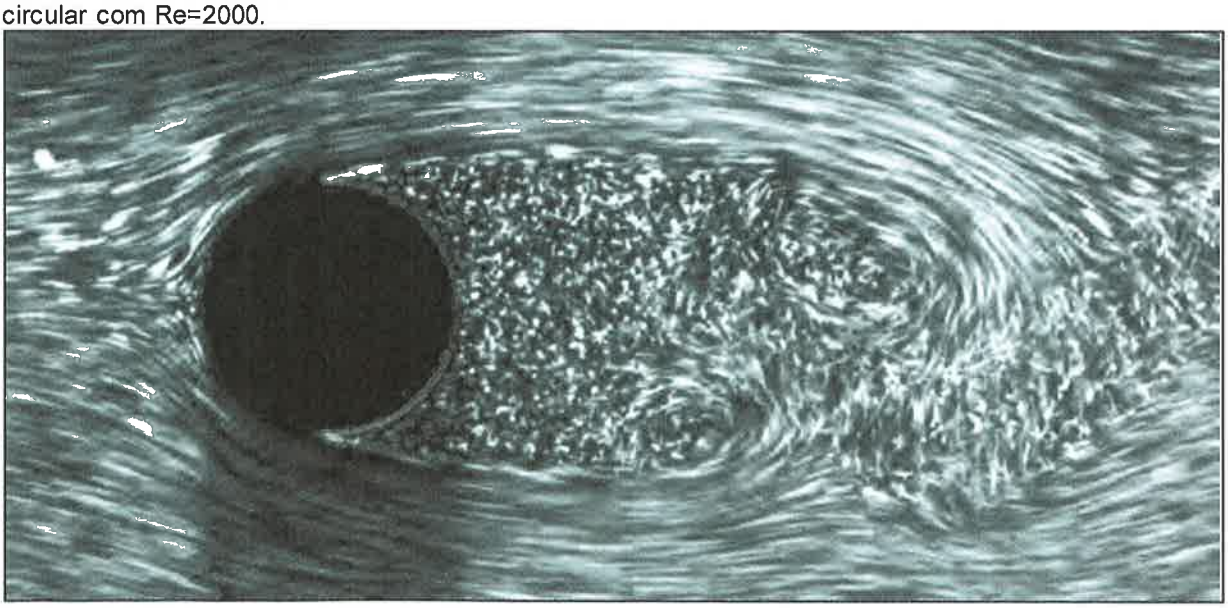
$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \tag{2}$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento, μ a viscosidade dinâmica do fluido e $\partial u/\partial y$ o gradiente de velocidade.

4.2.2 ARRASTO DE PRESSÃO

Segundo Bistafa (2010), o arrasto de pressão tem origem na pressão que é exercida sobre a superfície do corpo. Esse fenômeno pode ser visto na figura 4.

Figura 4 – Separação da camada limite e esteira de vórtice turbulenta – escoamento sobre um cilindro circular com Re=2000.

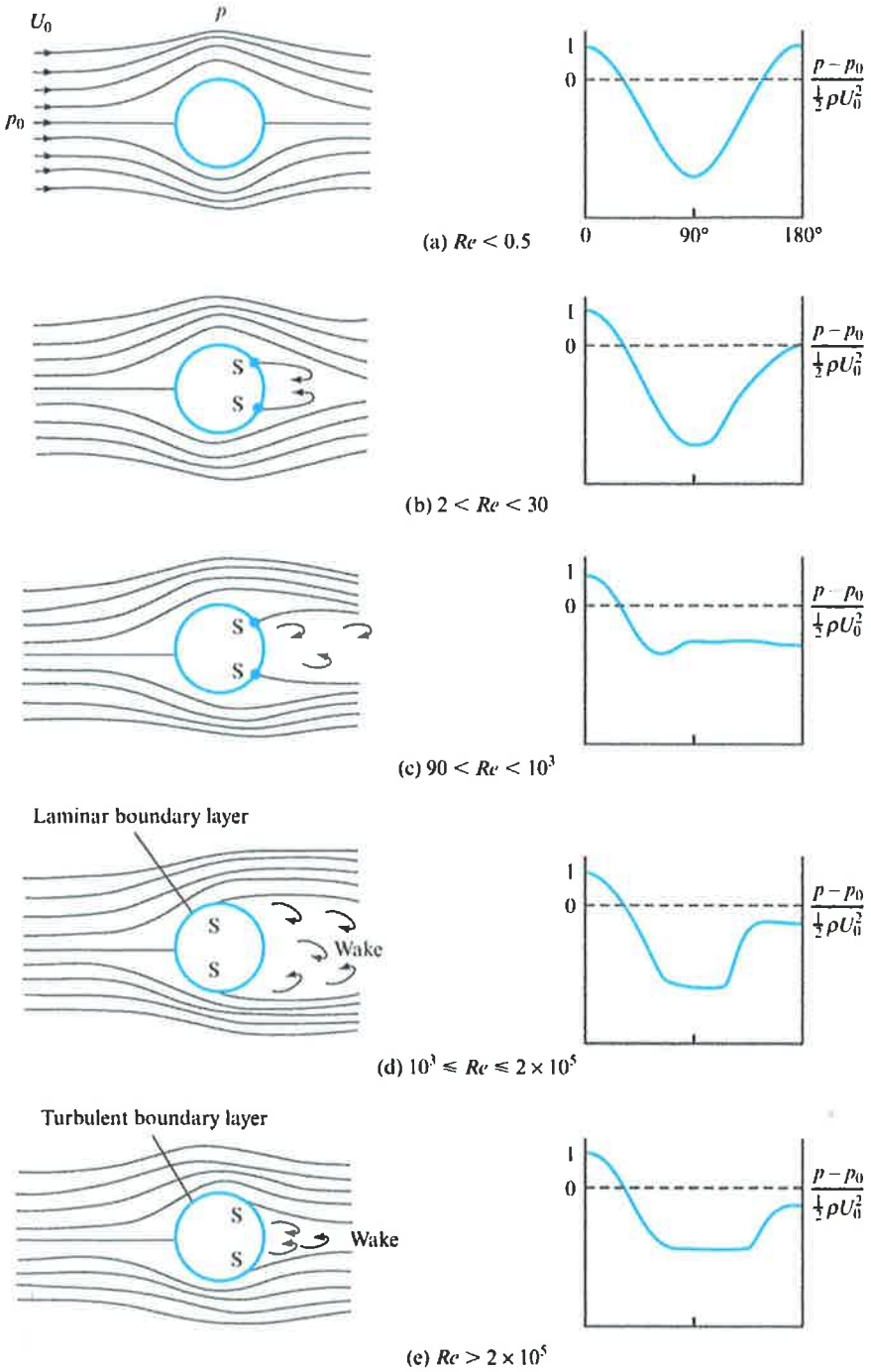


Fonte: Çengel e Cimbala (2006)

Segundo Assy (2010), o descolamento do fluido em cilindros, aparece em consequência de um gradiente de pressão retardador muito elevado na região de fluido livre ($\partial p/\partial s>0$), que é transmitido integralmente à camada-limite, que a converte em um escoamento retardado do lado de montante e em um escoamento em sentido inverso do lado de jusante. No encontro dessas duas correntes fluidas está o ponto

de descolamento e a consequente formação da superfície de descontinuidade, que se enrola rapidamente como vórtices, trazidos pelo movimento geral, como está descrito na figura 5.

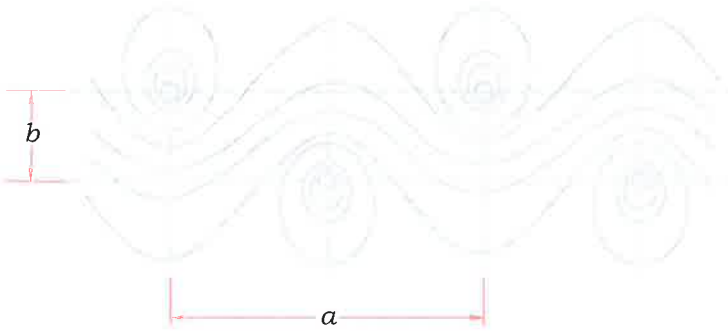
Figura 5 – Escoamento ao redor de um cilindro.



Fonte: Douglas *et al.* (2005)

O escoamento em torno de um cilindro circular liso pode desenvolver uma configuração regular de vórtices alternados a jusante. A trilha de vórtices causa uma força de sustentação oscilatória sobre o cilindro, perpendicular ao movimento da corrente. Pode-se observar na figura 6, certo padrão na proporção da formação de vórtices na esteira, onde o resultado da divisão b/a=0,281. (DAILY e HARLEMAN, 1966)

Figura 6 – Esteira de vórtices de von Kármán



Fonte: Daily e Harleman (1966)

A formação de vórtices excita oscilações que causam o "cantar" das linhas de transmissão e as batidas incômodas das adriças nos mastros de bandeiras. Algumas vezes, as oscilações estruturais podem atingir magnitudes perigosas e causar tensões elevadas; elas podem ser reduzidas ou eliminadas pela aplicação de elementos de rugosidade ou aletas – axiais ou helicoidais (algumas vezes vistas sobre uma chaminé ou uma antena de automóvel) – que destroem a simetria do cilindro e estabilizam o escoamento. (MCDONALD'S, 2011)

Figura 7 – Esteira de vórtices formada pelo arrasto nas extremidades.

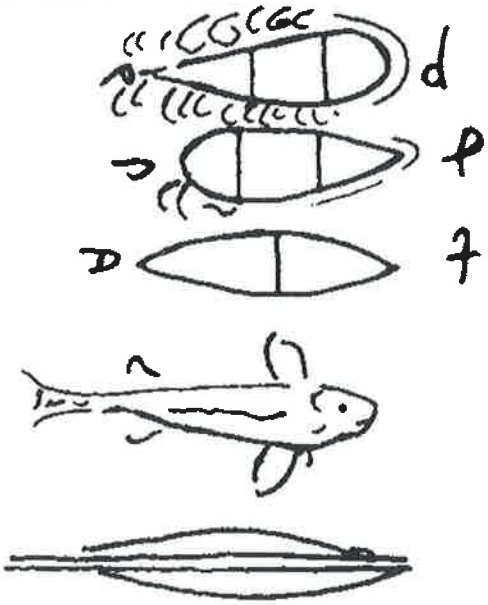
Fonte: Çengel e Cimbala (2006)

4.2.3 VÓRTICES NO NADAR DOS PEIXES

Três barcos com largura, comprimento e profundidade iguais, quando movidos sob a ação da mesma força, apresentam velocidades diferentes, como pode-se observar na figura 8. Segundo Kemp (2006), essas observações foram apresentadas por Leonardo da Vinci. Ele afirmou que o barco que tem largura maior na parte da frente é mais rápido e, se assemelha à forma de aves e peixes como a tainha. No caso do primeiro formato ele chegou à conclusão que os vórtices formados pelo deslocamento da água no primeiro terço faziam com que houvesse uma compressão nos outros dois terços do barco. O segundo barco tem um perfil que faz o inverso do primeiro e, o terceiro é um intermediário entre os dois primeiros.

Qualquer objeto num escoamento, seja um arame ao vento ou um espadarte nadando, cria um rastro de vórtices giratórios. O fio obstrui o fluxo e deixa um rastro, enquanto que a cauda de um peixe empurra a água para trás, estabelecendo o que é mais conhecida como uma coluna de jato a mover o fluido que inclui impulso produtor de vórtices. Acredita-se que esses jatos de vórtices desempenham o papel central na geração de impulso, e o principal argumento é que a formação ideal desses vórtices aumentaria muito sua eficiência. (TRIANTAFYLLOU e TRIANTAFYLLOU, 1995)

Figura 8 – Design hidrodinâmico de barcos e peixes



Fonte: Kemp (2006).

O que faz com que a elevada eficiência de impulso dos fólios seja possível é a maneira pela qual os vórtices são organizados por trás do fólio (ou uma cauda de peixe). Os vórtices tornam-se mais fortes à medida que a carga aumenta, mas o seu sentido de rotação é sempre compatível com a direção desejada de impulso, produzindo um jato eficiente (TRIANTAFYLLOU e TRIANTAFYLLOU, 1995).

O controle de vorticidade também é fundamental para o surpreendente desempenho transitório de alguns peixes cuja saída é rápida, pois, suas acelerações bruscas e manobras são muito superiores aos de navios e submarinos. O que torna essa agilidade possível, essencialmente, é a capacidade para produzir repentinas forças muito grandes. Os navios e submarinos, por outro lado, exercem controle sobre o escoamento em torno dos seus cascos e movem-se a um ritmo lento, em sua grande corrente com vórtices descontrolados, criando enormes forças de arrasto. (TRIANTAFYLLOU e TRIANTAFYLLOU, 1995)

O movimento inicial que o peixe faz é essencial para gerar o primeiro e grande vórtice, onde começa seu movimento. Pouco antes de disparar em alguma direção, o seu corpo flexiona bruscamente, com a metade para frente do corpo orientada em 60 a 120 graus em relação à direção final do movimento. Tal orientação é necessária para o peixe compensar a força lateral que acompanha o impulso. (TRIANTAFYLLOU e TRIANTAFYLLOU, 1995)

4.3 VÓRTICES DE VON KÁRMÁN

Theodore von Kármán, engenheiro húngaro e grande teórico, estudou na Hungria, Alemanha, EUA, e dedicou sua vida ao estudo de problemas de dinâmica de fluidos, em particular, estudou as esteiras de vórtices que afetam um corpo investido por um fluido que, em seguida, tomou o mesmo nome do engenheiro (vórtices von Kármán, desprendimento de vórtices) e abriu um novo capítulo na dinâmica dos fluidos, que estabelece as bases para uma correta interpretação dos fenômenos aerodinâmicos e aeroelásticos com interesse particular na indústria aeroespacial e aeronáutica. (MARTUFI, 1999)

A formação de turbilhões explica muitas quebras de simetria surpreendentes, como por exemplo, uma bolha de ar ascendente através da água ou outro liquido com gás, num ziguezague ou em espiral, em vez de um caminho reto. Um escoamento a jusante

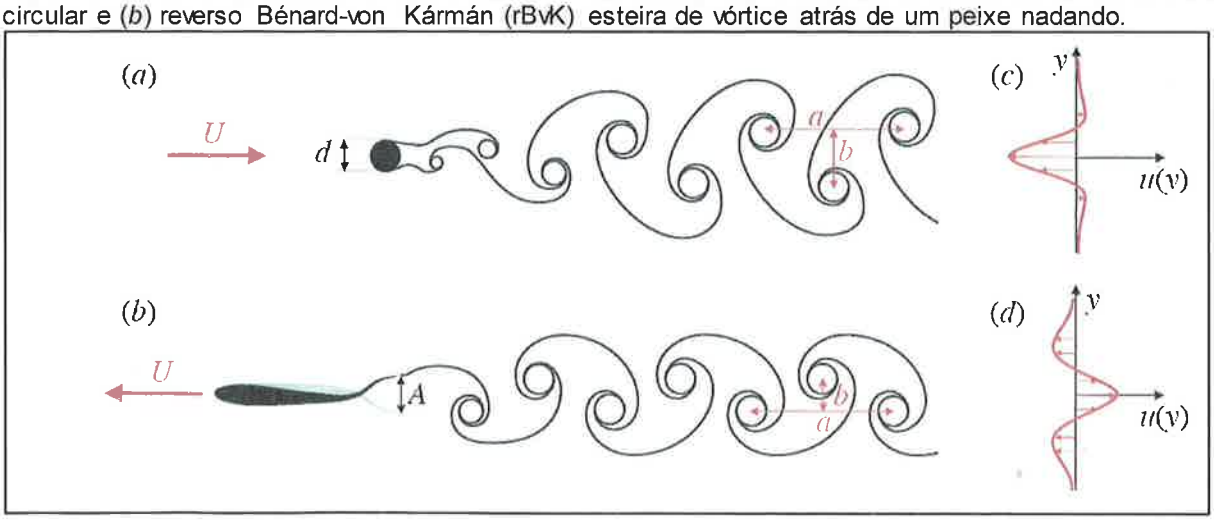
de um corpo, que resulta em uma dupla de vórtices é chamado de vórtices de von Kármán ou esteira de vórtices. (FALKOVICH, 2011)

A uma curta distância a jusante, tipicamente superior a dois diâmetros do corpo, a sequência desenvolve um componente de velocidade média a jusante do líquido, que marca o fim da chamada região de sucção. (BEAL, HOVER e TRIANTAFYLLOU, 2015)

Evidências sugerem que muitos peixes exploram a instabilidade natural e energética do fluxo para auxiliá-los na propulsão e manobras. Ajustando sua própria cinemática, o peixe é capaz de nadar de forma eficiente para gerar um grande impulso e forças de rotação, movendo-se silenciosamente através do fluxo de energia com o mínimo de desperdício. (ADG-STANFORD, 2007)

As linhas na esteira na figura 9, ilustram o que pode ser obtido tipicamente em visualizações com corante. O fluxo médio u(y) de perturbação na esteira é uma medida de jato em direção ao cilindro (c) e para longe do peixe (d) respectivamente. Ambos os jatos estão rodeados por uma região de contra fluxo.

Figura 9 – Vista esquemática de (*a*) Bénard-von Kármán (BvK) esteira de vórtice atrás de um cilindro circular e (*b*) reverso Bénard-von Kármán (rBvK) esteira de vórtice atrás de um peixe nadando.



Fonte: Eloy (2011)

Considerando um sólido qualquer imerso em uma corrente fluida incompressível, onde a pressão é p_0 e a velocidade é $\vec{v}_0$. Quando o número de Reynolds é suficientemente grande, uma camada limite se organiza em torno do obstáculo, se espessando para jusante, e uma linha de pontos de descolamento se fixa no obstáculo, a partir da qual o escoamento se destaca dando formação à esteira, que pode ser laminar ou

turbulenta. Em torno do obstáculo, as linhas de corrente ao longe são praticamente uniformes onde só ocorre rotação dentro da esteira. O fluido sofre os efeitos da viscosidade (e da turbulência) induzidos pelo atrito sobre seu contorno e pelas linhas de corrente que passam nas vizinhanças dos pontos de deslocamento e delimitam a região da esteira. (ASSY, 2010)

Um caso que ficou famoso em 1940 pelo efeito causado pelo desprendimento de vórtices, devido a trilhas de turbilhões de von Kármán liberados por um fluido após passar por uma seção circular, é o da ponte localizada no estreito de Tacoma, Washington, EUA, como podemos ver na figura 10, que veio a cair depois de ser submetida a ventos de aproximadamente 65 km/h entrando em ressonância e posteriormente colapsando.

Figura 10 - Ponte Tacoma Narrows, 1940.

Fonte: University of Washington (2014)

4.4 NÚMERO DE REYNOLDS

Segundo Çengel e Cimbala (2006) o adimensional conhecido como número de Reynolds foi desenvolvido pelo Lorde Osborn Reynolds em 1880. O número de Reynolds é o parâmetro que define o tipo de escoamento que está acontecendo.

$$Re = \frac{\rho U \ell}{\mu} = \frac{U \ell}{\upsilon} \tag{3}$$

Onde *Re* é o número de Reynolds (adimensional), ρ é a massa específica (kg/m³), *U* é a velocidade do escoamento (m/s), ℓ é o comprimento característico (m), μ é a viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s) e υ é a viscosidade cinemática do fluido (m²/s). Para os corpos cilíndricos foi definido escoamento laminar para Re ≤ 600 e turbulento Re ≥ 600. Esses números foram definidos em relação ao cilindro.

4.5 NÚMERO DE STROUHAL

Em análise dimensional, o número de Strouhal é um número adimensional que descreve um mecanismo de escoamento oscilante. O parâmetro foi nomeado em homenagem a Vincenz Strouhal, um físico tcheco que realizou experiências em 1878 com arames, experimentando vórtices e produzindo sons com o vento. O número de Strouhal é uma parte integral dos fundamentos da mecânica dos fluidos.
É frequentemente dado como:

$$St = \frac{fL}{U} \tag{4}$$

Onde St é o adimensional número de Strouhal, f é a frequência de vórtices, L é definido como o "comprimento característico" (por exemplo o diâmetro hidráulico) e *U* é a velocidade de aproximação do fluido (m/s). (WHITE, 2009)
O produto da frequência de formação de vórtice para trás de um objeto num fluxo e a largura da esteira, dividido pela velocidade do escoamento. Tal número indica, de forma compacta, a frequência de vórtices criados na esteira e a proximidade entre eles. Curiosamente, a relação permanece constante a cerca de St = 0,2 para uma variedade de condições de escoamento e formas de objetos. (ADG-STANFORD, 2007)
Embora o número de Strouhal tenha sido criado para descrever a esteira atrás de obstruções de escoamento, as semelhanças entre a esteira e jatos são de tal forma que poderia ser usado como número para descrever jatos. Para um peixe, definiu-se

o número de Strouhal como o produto da frequência do movimento da cauda e da largura do jato, dividido pela velocidade do peixe. (TRIANTAFYLLOU e TRIANTAFYLLOU, 1995)

Ao analisar dados de fólios batendo, pode-se notar que o indutor de impulso forma vórtices otimamente quando o número de Strouhal reside entre 0,25 e 0,35, e a eficiência deve ser máxima para estes valores. Alguns experimentos preliminares do MIT, no tanque de teste, confirmaram que a eficiência de um fólio batendo atinge seu ápice quando o número de Strouhal é neste intervalo. (ADG-STANFORD, 2007)

No entanto, apesar de enormes retornos potenciais, relativamente pouco trabalho tem sido feito para identificar e aplicar as características específicas de propulsão que possam beneficiar a propulsão subaquática e de navios. As imensas quantidades de carga e passageiros transportados por navio a cada ano no mundo, significam que o aumento na eficiência resultaria em enormes economias de combustível, maior capacidade de manobra, e além disso, poderia significar menos acidentes e maior segurança para os passageiros, instrumentos científicos e o meio ambiente. (TRIANTAFYLLOU e TRIANTAFYLLOU, 1995)

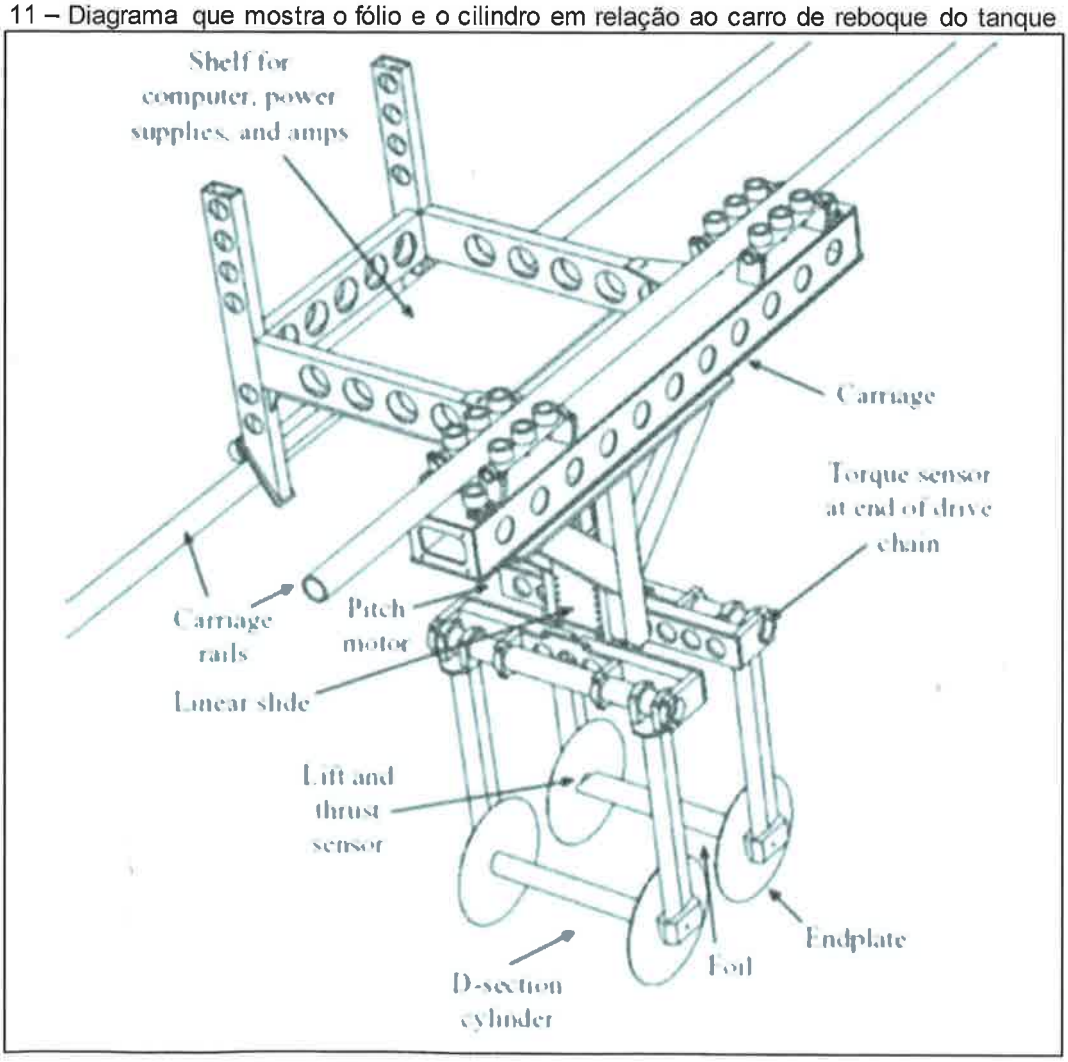
Ao analisar uma grande quantidade de dados sobre o nadar dos peixes, os irmãos Triantafyllou notaram que os peixes e mamíferos aquáticos de todos os tamanhos, de peixinho até tubarões, balançam a cauda dentro da faixa teoricamente determinada pelo número de Strouhal 0,25-0,35. Para mostrar a formação de vórtices e turbulência claramente, foi realizado um estudo separado em que foi colocado um peixe tropical pequeno no fluido que continha uma suspensão de pequenas partículas. Através da medição da velocidade do peixe, bem como a frequência e a amplitude da sua cauda agitando, foi calculado um número Strouhal de 0,30. Depois de ter preenchida a importância em atingir o número de alta eficiência, foi calculado o agitar dos fólios para valores em experimentos anteriores que haviam relatado uma eficiência decepcionante. Nenhum chegou perto do intervalo 0,25-0,35. Fazendo ajustes nos fólios para operar nesta faixa - a eficiência medida foi maior do que oitenta e seis por cento. Em contraste, as hélices pequenas usadas para conduzir veículos subaquáticos, normalmente não passam de quarenta por cento de eficiência. (TRIANTAFYLLOU e TRIANTAFYLLOU, 1995)

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 INTRODUÇÃO

A extração de energia a partir de escoamentos instáveis usando uma lâmina estacionária é chamado efeito Katzmayr, após primeiros estudos do engenheiro alemão, em 1927. Em 1991, os irmãos Triantafyllou exploraram um fenômeno relacionado, ao colocar um fólio a alguma distância atrás de um cilindro em um canal, conforme figura 11. Linhas de vórtices gerados pelo cilindro se movendo em direção ao fólio, o faziam se mover lateralmente conforme os vórtices passavam. Experiências sistemáticas confirmaram que ajustes podem melhorar ou diminuir a eficiência. (TRIANTAFYLLOU e TRIANTAFYLLOU, 1995)

Figura 11 – Diagrama que mostra o fólio e o cilindro em relação ao carro de reboque do tanque



Fonte: Beal, Hover e Triantafyllou (2015)

A experiência dos irmãos Triantafyllou, tinha o objetivo de observar a oscilação lateral de um hidrofólio a uma determinada distância de um cilindro com seção em "D", e com isso estudar o deslocamento lateral do hidrofólio enquanto os vórtices liberados pelo cilindro passavam por ele, e ambos ficavam presos por um reboque que corria dentro de um tanque. A experiência dos irmãos Triantafyllou relatada, tem como base o aproveitamento por peixes, dos vórtices formados por rochas em uma corredeira para economizar energia, ganhar impulso e subir as corredeiras. (BEAL, HOVER e TRIANTAFYLLOU, 2015)

A partir dos estudos dos irmãos Triantafyllou, esta dissertação foi desenvolvida com auxílio de software *CFD* (Computational Dynamic Fluid), e tem por objetivo verificar os efeitos de vórtices formados por um cilindro com seção transversal em "D", sobre uma placa posicionada e fixada atrás do cilindro, de forma que essa possa vibrar conforme os vórtices passam por ela.

5.2 DINÂMICA COMPUTACIONAL DOS FLUIDOS – CFD

O software utilizado neste trabalho foi o Autodesk Simulation CFD 2015, que é um software gratuito e de uso livre para fins educacionais. O seu uso teve o objetivo de observar a formação e o comportamento dos vórtices e a vibração da placa atrás do cilindro. O modelo que foi utilizado no CFD, foi produzido no software Autodesk Inventor 2015.

Para que se possa entender o escoamento de um fluido e transferência de calor, são utilizadas equações diferenciais parciais, que incluem a equação da conservação de massa, as equações de Navier-Stokes e a Primeira Lei da Termodinâmica. Estas equações estão intimamente ligadas de forma não-linear e fazem uma solução analítica para um pequeno número especial de problemas. O software CFD da Autodesk, utiliza métodos aproximados para determinar a solução dessas equações. (AUTODESK, 2015)

Serão apresentadas apenas as principais equações relacionadas com os parâmetros utilizados na aplicação do software.

5.2.1 Equações Governantes

Equação da conservação de massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \rho u}{\partial x}+\frac{\partial \rho v}{\partial y}+\frac{\partial \rho w}{\partial z}=0 \tag{5}$$

Equação de Navier-Stokes

Projeção em x

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t}+\rho u\frac{\partial u}{\partial x}+\rho v\frac{\partial u}{\partial y}+\rho w\frac{\partial u}{\partial z}= \tag{6}$$

$$=\rho g_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left[2\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right]+S_\omega+S_{DR}$$

Projeção em y

$$\rho\frac{\partial v}{\partial t}+\rho u\frac{\partial v}{\partial x}+\rho v\frac{\partial v}{\partial y}+\rho w\frac{\partial v}{\partial z}= \tag{7}$$

$$=\rho g_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[2\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right]$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)\right]+S_\omega+S_{DR}$$

Projeção em z

$$\rho\frac{\partial w}{\partial t}+\rho u\frac{\partial w}{\partial x}+\rho v\frac{\partial w}{\partial y}+\rho w\frac{\partial w}{\partial z}= \tag{8}$$

$$=\rho g_z-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)\right]$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}\left[2\mu\frac{\partial w}{\partial z}\right]+S_\omega+S_{DR}$$

Os dois últimos termos na equação de Navier-Stokes são para forças centrífugas e resistências locais e distribuídas. O termo de resistência pode ser escrito de um modo geral como:

$$S_{DR}=-\left(k_i+\frac{f}{D_H}\right)\frac{\rho V_i^2}{2}-C\mu V_i \tag{9}$$

Onde i refere-se à direção de coordenadas global (u, v, w equação impulso) e os outros termos são descritos na secção anterior. Note-se que o termo fator k pode funcionar com uma equação de impulso único de cada vez, porque cada direção tem o seu próprio fator k original. Os outros dois tipos de resistência operam igualmente em cada equação de quantidade de movimento.

O termo S_ω está associado à força centrífuga e pode ser expresso por:

$$S_\omega = -2\rho\omega_i \, x \, V_i - \rho\omega_i \, x \, \omega_i \, x \, r_i \qquad (10)$$

Onde i refere-se à coordenada global de direção, ω é a velocidade rotacional e r é a distância do eixo de rotação.

5.3 MÉTODO EXPERIMENTAL COMPUTACIONAL

Com base nos estudos apresentados, o que se fez foi simular em CFD um dos experimentos dos irmãos Triantafyllou conforme a figura 11 e figura 12a, onde se buscou-se analisar a oscilação do fólio atrás de um cilindro com seção em "D", e observar a influência da formação de vórtices sobre o fólio. O outro experimento visa estudar comprimentos diferentes de placas planas posicionadas atrás de um cilindro, com base na proporção da formação de vórtices descrita por Daily e Harleman (1966) e conforme figura 12 (c).

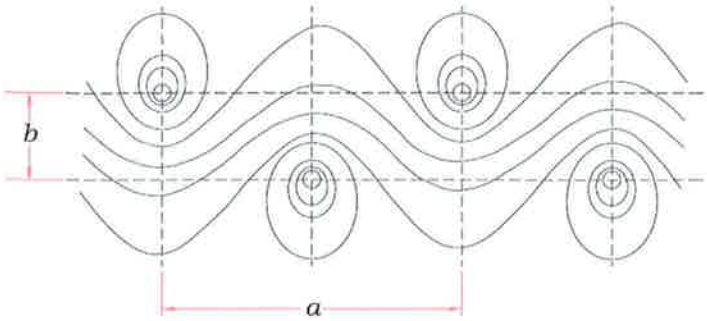
Na figura 12 (b) o cilindro com seção em "D" tem 75mm de diâmetro e está com seu pivô fixado à uma distância da face plana de 5 vezes seu diâmetro, ou seja, 375mm de distância ou ainda a distância entre a face plana do cilindro até a parte dianteira do fólio que é 4,44 vezes o diâmetro "D".

Na figura 12 (c), o comprimento da placa foi definido com base na proporção de formação de vórtices b/a= 0,281, de modo que a placa aproveite os movimentos gerados de um vórtice por vez. Como nesse experimento *b*=50mm, com base na proporção de 0,281 temos *a* ≈ 178mm. Arredonda-se *a* para 200mm e como o que se deseja é aproveitar um vórtice por vez, então, adotou-se comprimentos "*l*" iguais a a x 0,25, a x 0,375 e a x 0,50. Assim, os comprimentos da placa ficaram: 50mm, 75mm e 100mm.

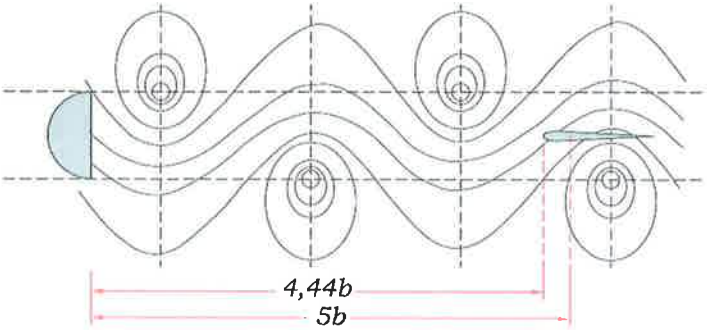
Uma vez que o comprimento da placa foi estabelecido, estabelece-se também outro fator importante que é a escolha das velocidades.

Figura 12 – Esteira de vórtices de von Kármán (a) no fólio (b) e placa (c)

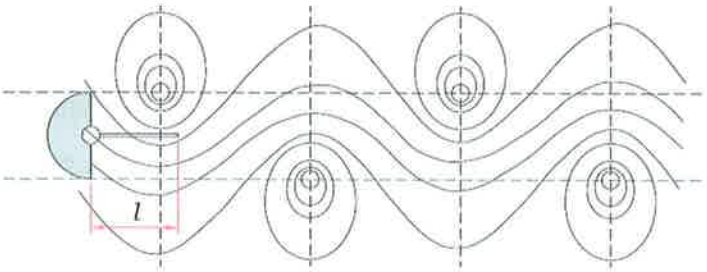
(a)



(b)



(c)

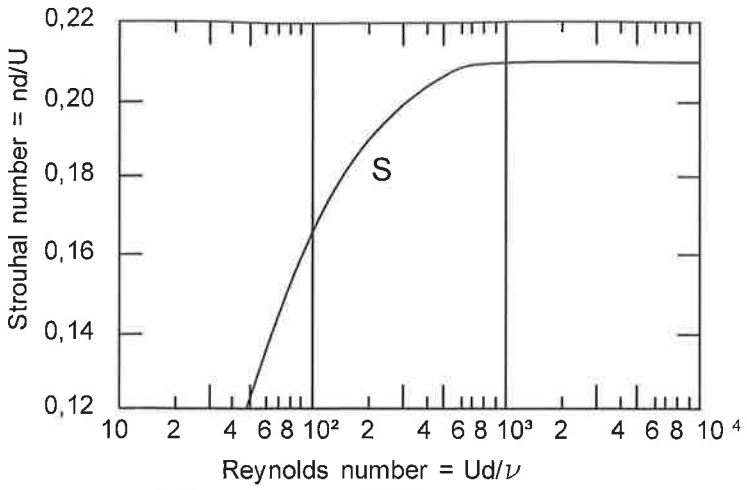


Fonte: adaptado de (a) (c) Daily e Harleman (1966) e (b) Beal, Hover e Triantafyllou (2015)

Para o experimento dos irmãos Triantafyllou, utilizou-se a velocidade original do experimento, v=0,8 m.s^{-1} e com isso Reynolds igual a 60 000.

Conforme Daily e Harleman (1966) e figura 13, um cilindro colocado em um escoamento terá número de Strouhal igual à 0,12 quando Reynolds for próximo a 50, e atingirá número de Strouhal máximo de 0,21 quando Reynolds estiver acima de 10^3.

Figura 13 – Número de Strouhal versus número de Reynolds para um cilindro circular.



Fonte: Adaptado de Daily e Harleman (1966).

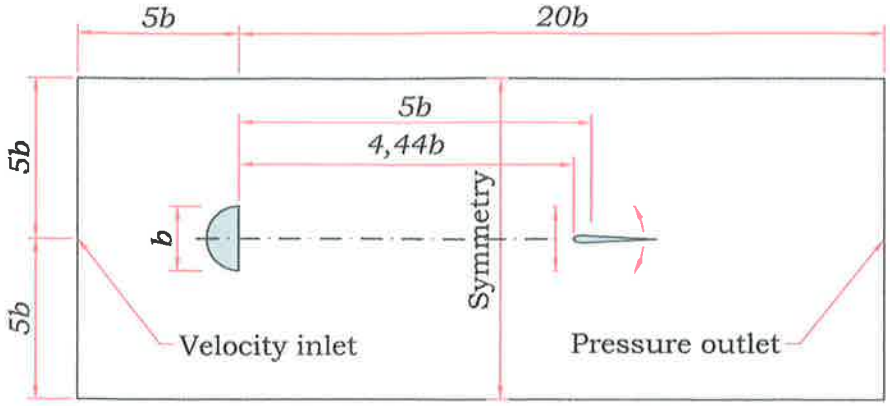
O diâmetro *b* é igual a 50mm, o objetivo é verificar o movimento da placa para diferentes números de Reynolds, sendo estes iguais a 10^2,10^3 e 10^4, escolhidos de forma que se possa verificar o comportamento da placa em três velocidades diferentes para que pelo menos uma velocidade fique no escoamento laminar, logo após o número de Strouhal atingir o valor de 0,21 e outra depois do número de Strouhal estar completamente estabelecido em 0,21, ou seja, ficaremos com uma velocidade no escoamento laminar e outras duas no escoamento turbulento, uma vez que considera-se escoamento laminar para Re ≤ 600 ou turbulento Re > 600. Será fixada a seção hidráulica para os dois experimentos conforme figura 12 a e b.

Como o fluido utilizado no experimento é a água e sua viscosidade cinemática υ igual a 10^{-6} $m^2.s^{-1}$, a temperatura de 20ºC, Reynolds igual a 10^2,10^3 e 10^4 e comprimento característico *l* igual ao diâmetro de 50mm, tem-se as seguintes velocidades *U* iguais a 0,002 $m.s^{-1}$, 0,02 $m.s^{-1}$ e 0,2 $m.s^{-1}$.

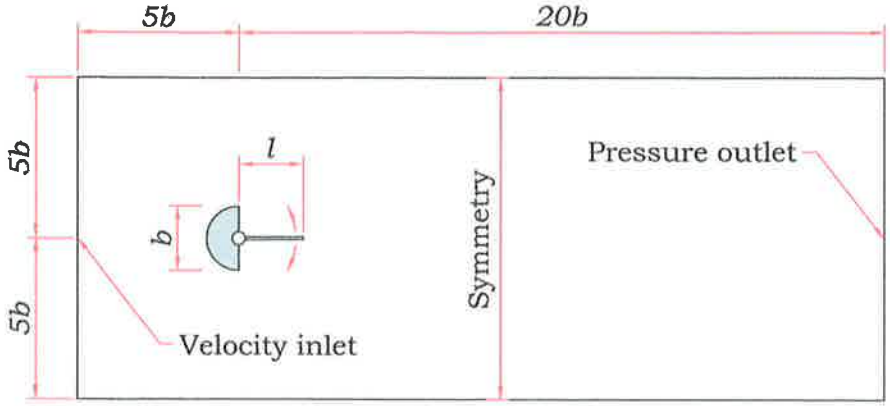
Um outro parâmetro que também foi explorado, é o fato de ser possível gerar o modelo em software 3D, observando então suas proporções e volumes. O cilindro e o fólio utilizados no experimento dos irmãos Triantafyllou, ambos tem 600mm de comprimento com discos de 250mm nas extremidades para evitar os efeitos tridimensionais. O fólio é um perfil NACA 0012 com 100mm de comprimento. No experimento do cilindro com as placas a jusante, as três peças utilizadas, tem a mesma altura de 500mm, e ambas possuem em sua extremidade, discos de 250mm para se evitar o efeito Tridimensional ou efeito de ponta, tendo assim uma segurança maior de que o observado é somente o efeito do escoamento no cilindro e na placa.

Figura 14 – Proporções utilizadas na simulação.

(a)

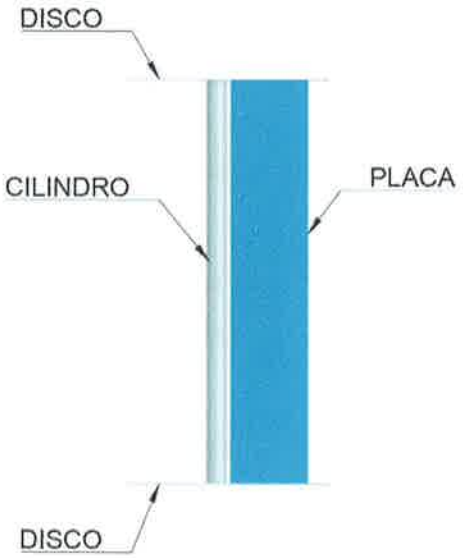


(b)



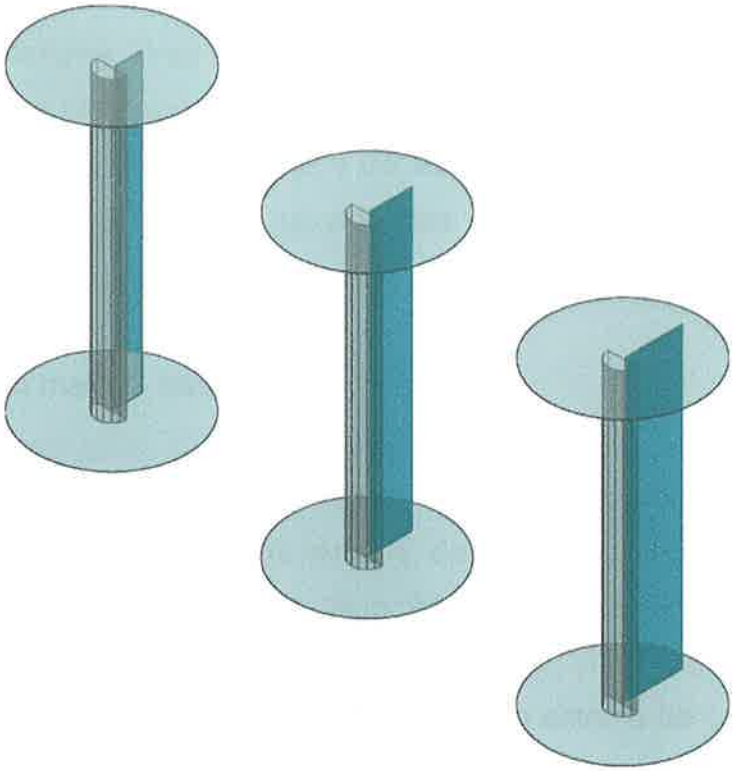
Fonte: O autor.

Figura 15 – Esquema do modelo 3D utilizado na simulação.



Fonte: O autor.

Figura 16 – Modelos 3D utilizados na simulação em perspectiva



Fonte: O autor.

5.4 "SETUP" DE SIMULAÇÃO

Neste tópico serão mostradas as principais escolhas relacionadas ao "setup" das simulações, segundo as recomendações do fabricante, e experiências realizadas.

5.4.1 Ferramentas Geométricas - *Geometry tools*

A geometria obedece às proporções apresentadas na figura 14, mas além das proporções em 2D, temos a medida no eixo Z que é 550 mm.

5.4.2 Condições de contorno - *Bondary coditions*

As condições de contorno foram definidas para simular uma seção de controle, onde todas as condições fossem conhecidas e permanecessem constantes.

Tanto as paredes laterais como a superfície e o fundo, foram definidas como *Slip/Symmetry*.

Para a entrada definiu-se *Type* como *Velocity* e *Spatial Variations* como *Constant*.

Para *Velocity Magnitude* foram definidas as seguintes velocidades para o experimento das placas atrás do cilindro, 0,002, 0,02 e 0,2 $m.s^{-1}$.

Para o experimento baseado nos estudos dos irmãos Triantafyllou foi utilizada a velocidade de aproximação de 0,8 $m.s^{-1}$.

5.4.3 Tamanho da malha - *Mesh size*

Em regiões onde há recirculação de fluido, ou experiência onde envolva largos gradientes de pressão com esteira de vórtices, deve-se usar o refinamento de malha. Dessa forma, foi utilizado o refinamento da malha somente nas proximidades do corpo cilíndrico e da placa.

É aconselhável a utilização de no mínimo 6 a 8 nós no entorno de corpos cilíndricos.

5.4.4 Movimento - *Motion*

A função é onde definiu-se o tipo de movimento da placa. Como o objetivo é observar a vibração da placa, foi ativada a função de movimento angular e *free-motion*, de forma que o ponto selecionado para rotação foi o centro da face a montante da placa, no eixo z.

5.4.5 Modo solução - *Solution mode*

A função *Solution mode* pode ser selecionado com *Steady State* ou *Transient*. Para todas as análises de movimento são utilizadas a função *Transient*.

5.4.6 Intervalo de tempo - *Time-step size*

A Autodesk (2015) aconselha que para a escolha do intervalo de tempo se use L/V onde L é o comprimento do corpo a ser analisado e v é a velocidade no escoamento.

Na sequência, para se encontrar o intervalo, deve-se dividir o resultado de L/V por vinte.

5.4.7 Iterações internas - *Inner iterations*

Conforme sugerido pela Autodesk (2015), para movimentos de rotação ou sólido em movimento uma única iteração no software CFD, é o suficiente para se obter resultados satisfatórios.

5.4.8 Controle de solução - *Solution control*

A ferramenta *Inteligent solution control,* entre outros pontos, tem a finalidade de definir a cada iteração, o intervalo de tempo e quantas iterações são necessárias para que se possa visualizar todas as reações do fluido, mas, para visualizações de alguns fenômenos como vórtices, é necessário ir além das iterações sugeridas, e por isso muitas vezes é necessário desligar essa ferramenta e estender para mais iterações na simulação.

Segundo Autodesk (2015), *Advection* é um mecanismo numérico de transporte de quantidade com temperatura e velocidade, e neste caso, entre os cinco métodos de advecção, foi escolhido o ADV5. Além da estabilidade oferecida por esse método, o maior motivo para essa escolha, é sua recomendação para movimentos rotativos e precisão de movimento.

5.4.9 Turbulência - *Turbulence*

O tipo de turbulência aplicado para a velocidade U=0,002 $m.s^{-1}$ – Laminar, tanto para o cilindro como cilindro e placa.

As simulações somente com o cilindro e velocidades U=0,02 $m.s^{-1}$ e 0,2 $m.s^{-1}$, foi utilizado SST k-omega SAS.

As simulações com o cilindro e placa e velocidades U=0,02 $m.s^{-1}$ e 0,2 $m.s^{-1}$, foi utilizado SST k-omega DES.

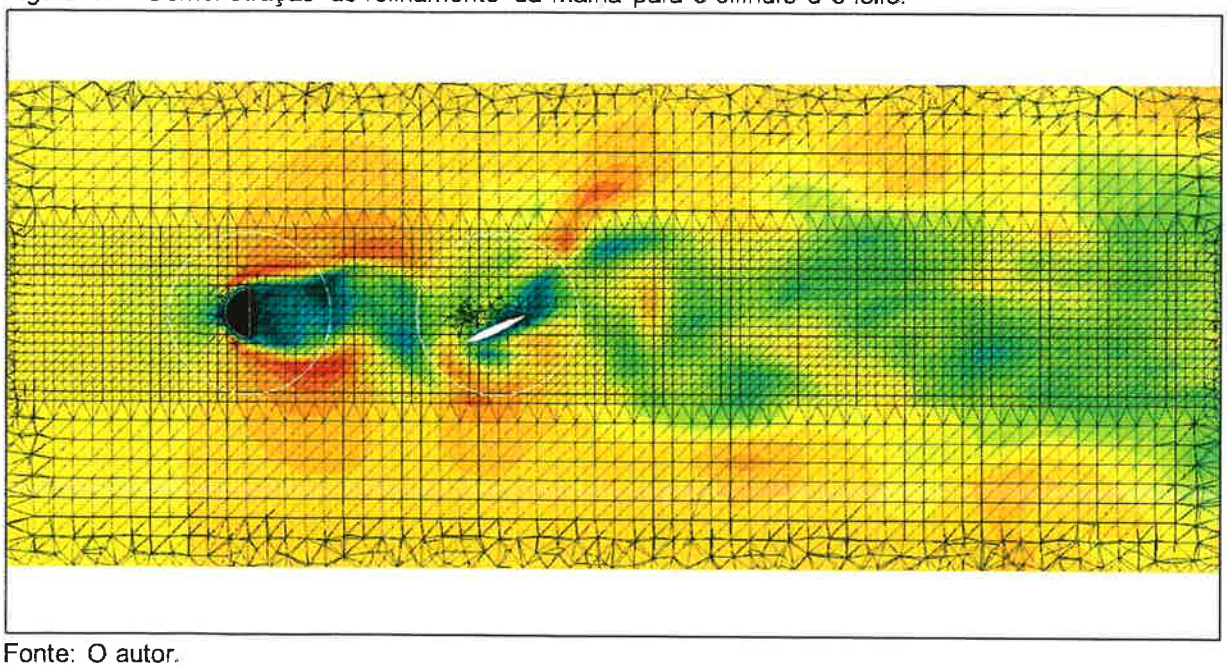
6. RESULTADOS

Os resultados apresentados foram gerados e extraídos do software CFD.

6.1 MÉTODO COMPUTACIONAL

O primeiro ponto a ser observado, é a malha gerada e seu refinamento. Muitas vezes uma malha muito refinada por todo o espaço a ser verificado, pode gerar arquivos muito grandes e de difícil simulação devido ao excesso de dados. Nesse caso, refinou-se somente os locais de interesse.

Figura 17 – Demonstração de refinamento da malha para o cilindro e o fólio.

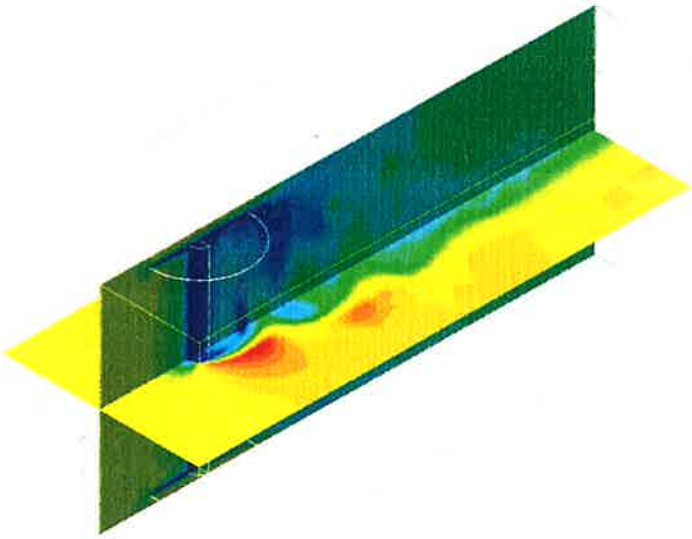


Fonte: O autor.

Utilizou-se uma malha volumétrica tetraédrica em todos os experimentos. Para o primeiro experimento com o cilindro e o fólio, simulou-se com 282.659 nós do fluido e 1.406.184 elementos do fluido, 3.334 nós do sólido e 35.404 elementos do sólido, sendo um total de 285.993 nós e 1.441.588 elementos. No experimento da placa de 50mm foi utilizado 37.422 nós do fluido e 193.471 elementos do fluido, 944 nós do sólido e 11.487 elementos do sólido, sendo um total de 38.366 nós e 204.958 elementos. No experimento da placa de 75mm foi utilizado 53.526 nós do fluido e 282.595 elementos do fluido, 3.093 nós do sólido e 22.085 elementos do sólido, sendo um total de 56.619 nós e 304.680 elementos. No experimento da placa de 100mm foi

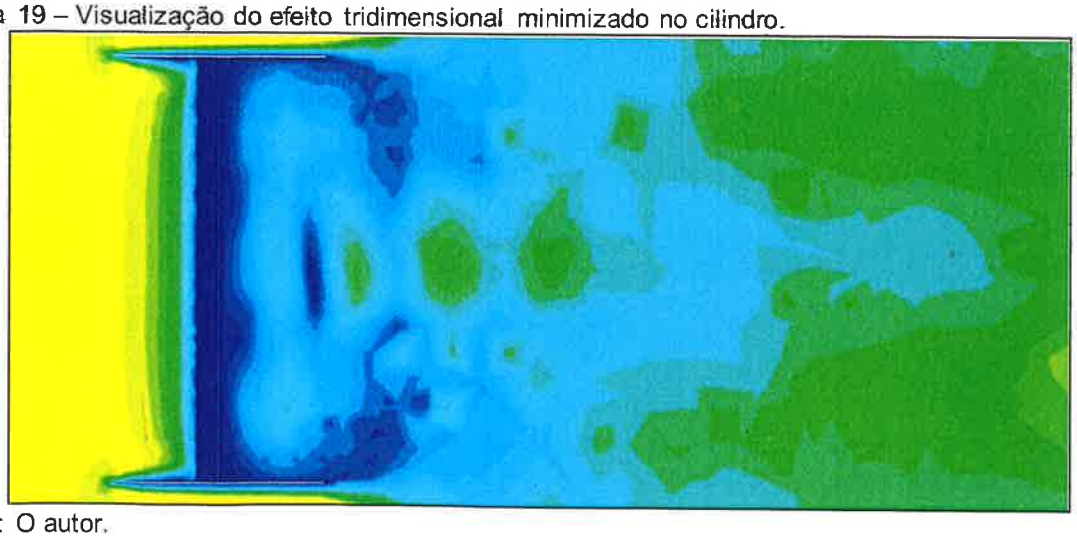
utilizado 19.580 nós do fluido e 98.517 elementos do fluido, 1.239 nós do sólido e 10.889 elementos do sólido, sendo um total de 20.819 nós e 109.406 elementos. Também pode-se observar que os discos na extremidade fazem com que o efeito tridimensional possa ser minimizado, o que evita que haja visualizações equivocadas, como pode ser observado nas figuras 18, 19 e 20.

Figura 18 – Velocidade na esteira de vórtices na horizontal e na vertical.



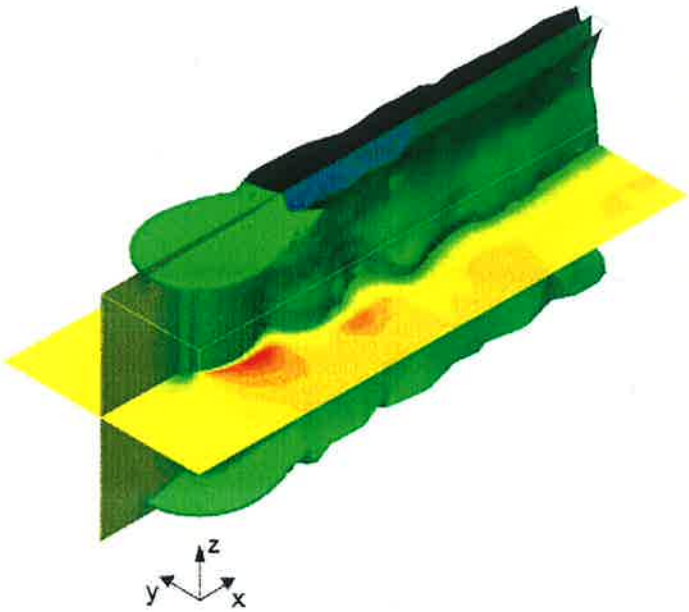
Fonte: O autor.

Figura 19 – Visualização do efeito tridimensional minimizado no cilindro.



Fonte: O autor.

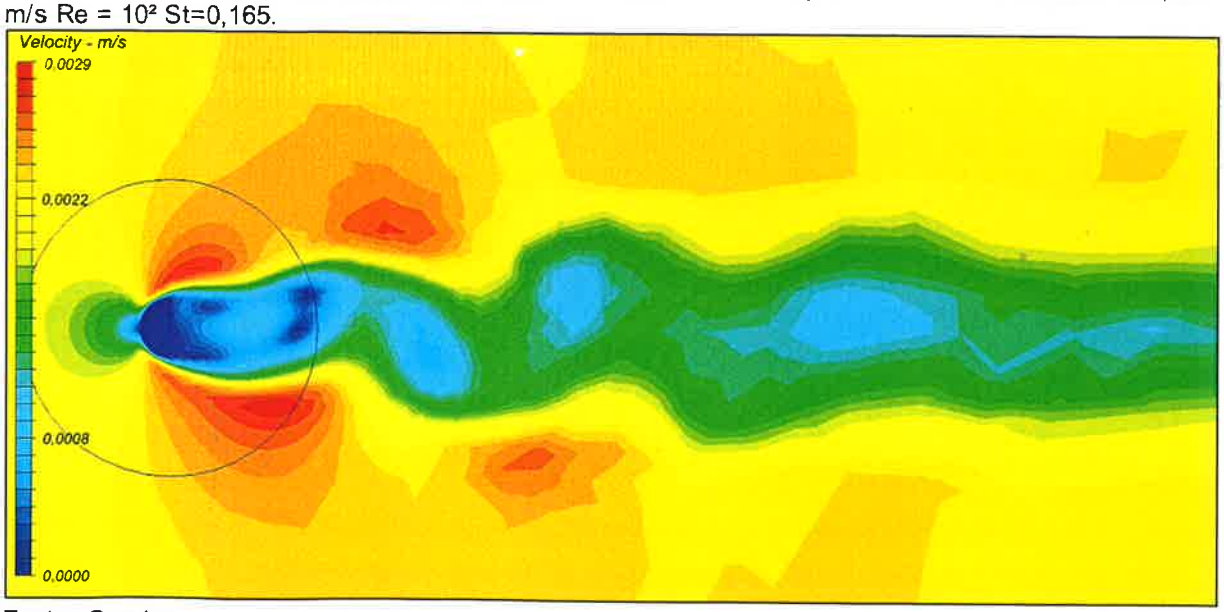
Figura 20 – Superfície gerada sobre o limite de velocidade



Fonte: O autor.

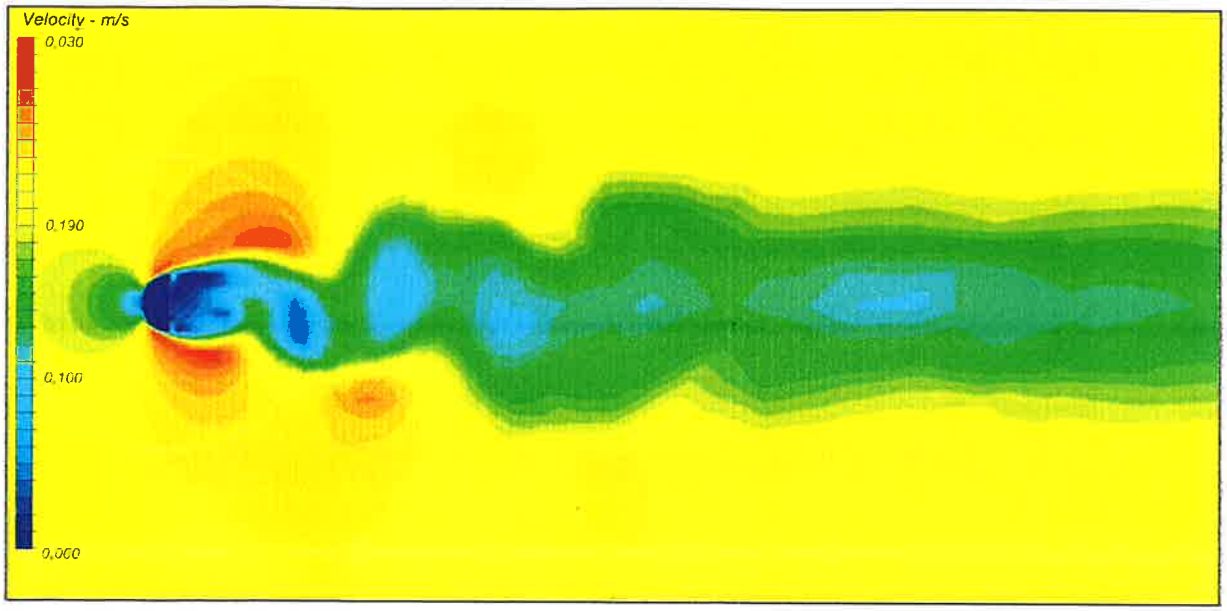
Observando as figuras 21, 22 e 23 extraídas da simulação, pode-se constatar a formação de vórtices, onde a proporção explicada na figura 6 é obedecida. Com isso pode-se ter confiança de sua uniformidade de acordo com as velocidades estabelecidas anteriormente.

Figura 21 – Campos de velocidade na formação de vórtices em um perfil em "D" e velocidade u=0,002 m/s Re = 10^2 St=0,165.



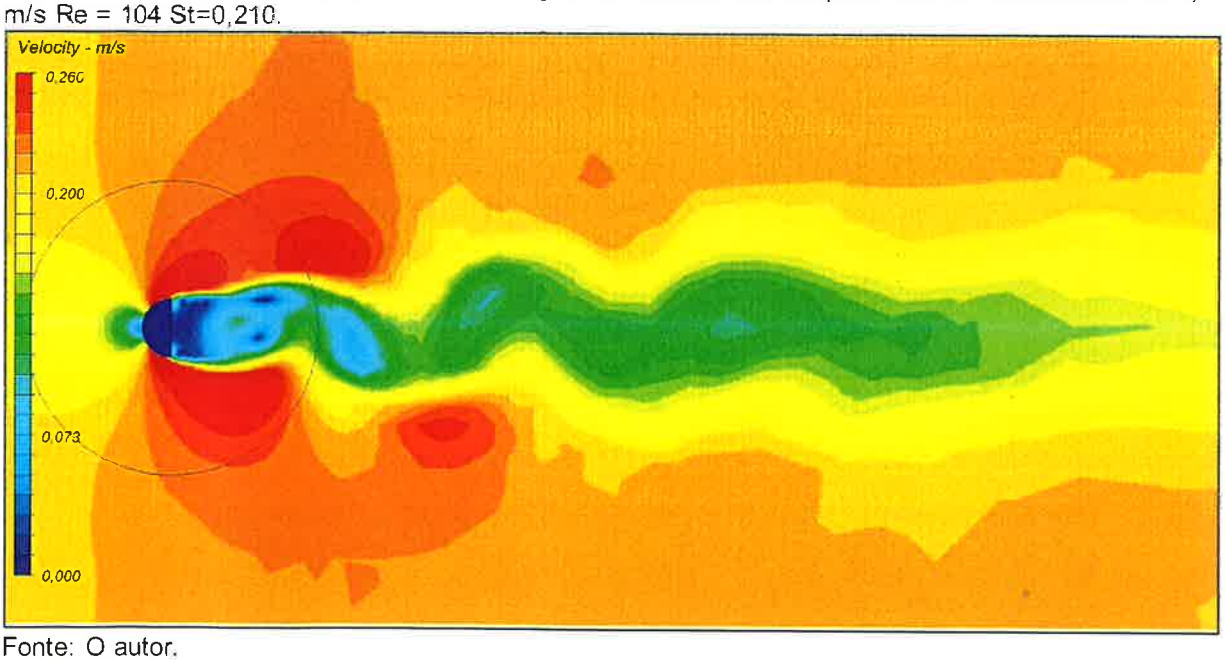
Fonte: O autor.

Figura 22 – Campos de velocidade na formação de vórtices em um perfil em "D" e velocidade u=0,02 m/s Re = 10^3 St=0,210.



Fonte: O autor.

Figura 23 – Campos de velocidade na formação de vórtices em um perfil em "D" e velocidade u=0,2 m/s Re = 104 St=0,210.



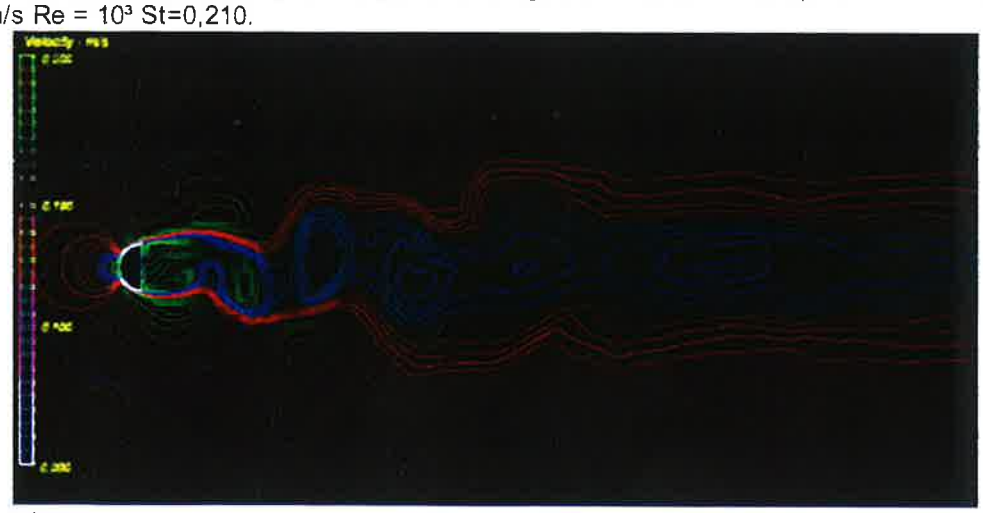
Fonte: O autor.

Nas figuras 24, 25 e 26, a seguir, destaca-se o limite dos campos de velocidade, onde é possível observar, dentro da faixa vermelha, a formação da esteira de vórtices.

Figura 24 – Limite dos campos de velocidade na formação de vórtices em um perfil em "D" e velocidade u=0,002 m/s Re = 10^2 St=0,165.

Fonte: O autor.

Figura 25 – Limite dos campos de velocidade na formação de vórtices em um perfil em "D" e velocidade u=0,02 m/s Re = 10^3 St=0,210.



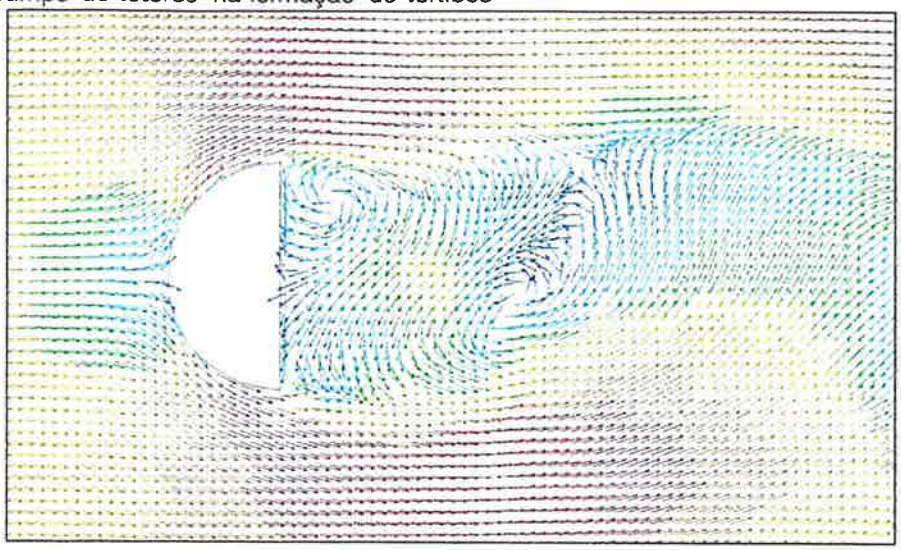
Fonte: O autor.

Figura 26 – Limite dos campos de velocidade na formação de vórtices em um perfil em "D" e velocidade u=0,2 m/s Re = 10^4 St=0,210.

Fonte: O autor.

Pode-se observar na figura 27, o momento em que no campo de vetores formam-se os vórtices.

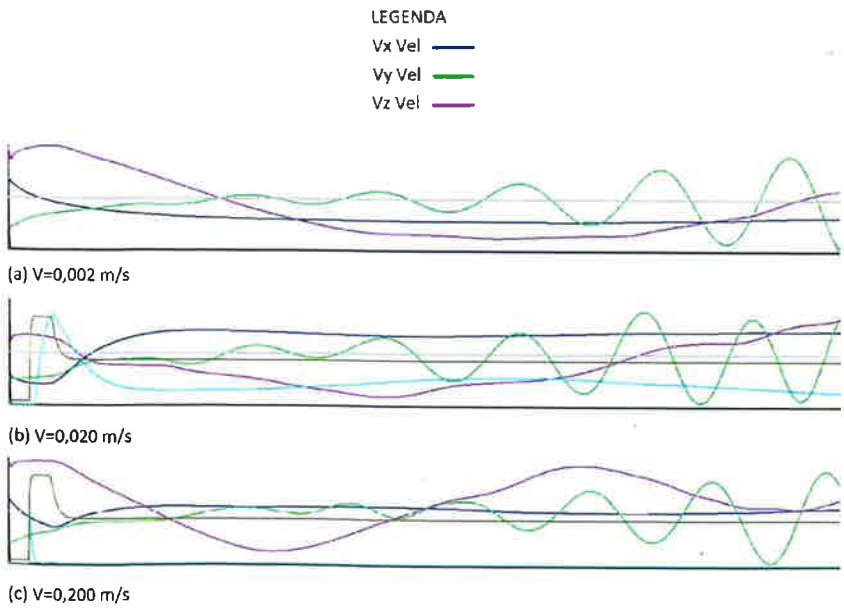
Figura 27 – Campo de vetores na formação de vórtices



Fonte: O autor.

Na figura 28 é possível perceber uma oscilação padrão no eixo y das velocidades que marca o início da formação da esteira de vórtices, enquanto que no eixo x temos uma velocidade de aproximação constante. No eixo z a oscilação é menos frequente que a no eixo y.

Figura 28 – Gráficos de velocidade.

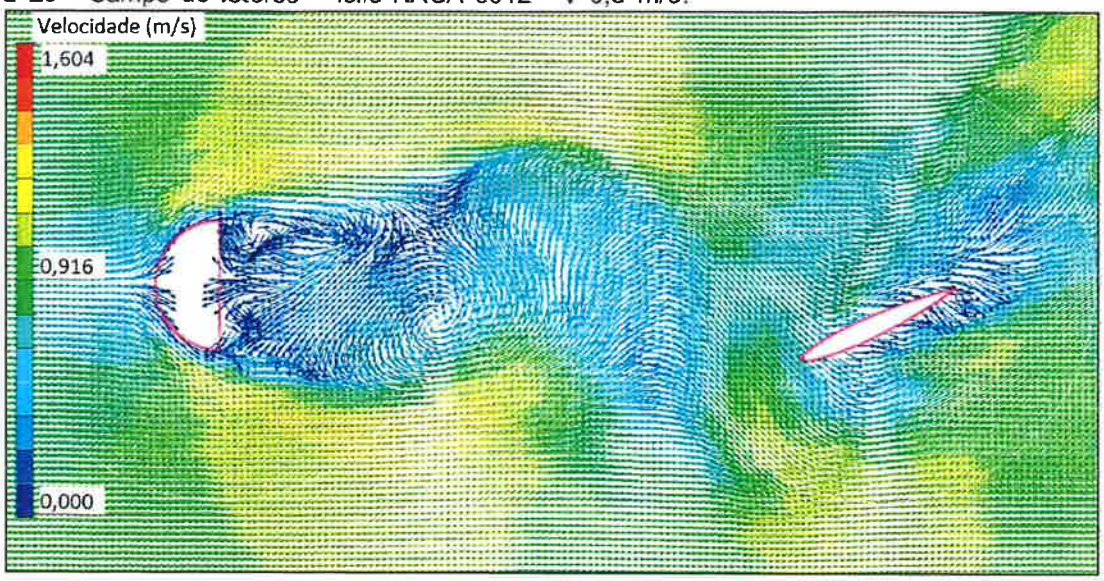


Fonte: O autor.

6.1.1 Comportamento do fólio NACA 0012

Observa-se na figura 29 a formação de vórtices no cilindro em "D", indo em direção ao fólio NACA 0012, que acaba por dar movimento ao fólio.

Figura 29 – Campo de vetores – fólio NACA 0012 – v=0,8 m/s.



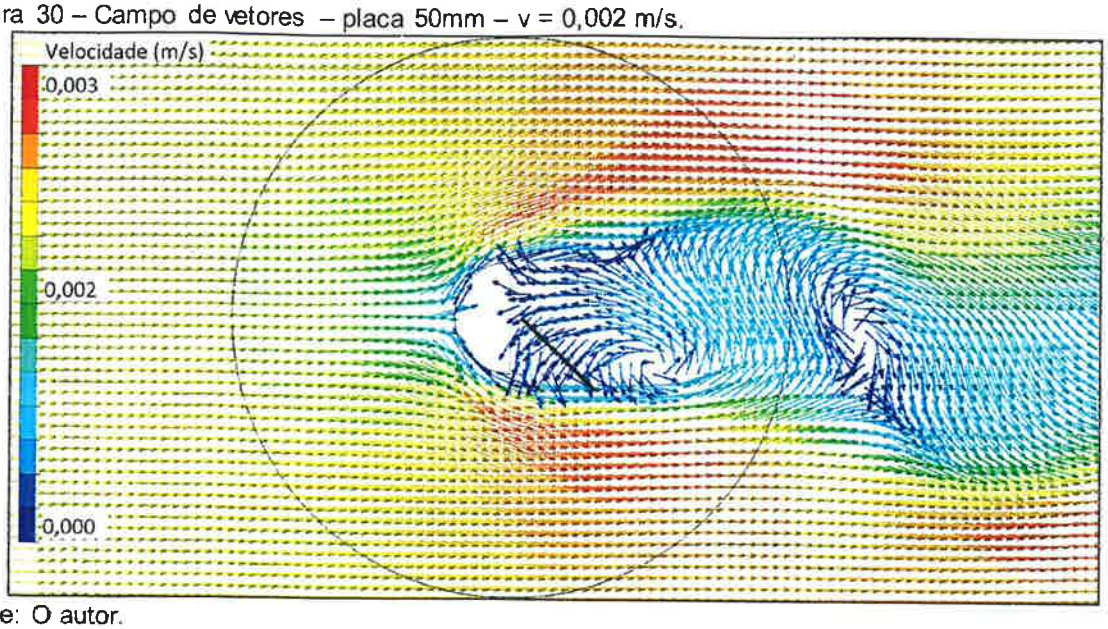
Fonte: O autor.

O fólio realizou movimentos completos na vertical, completando o ciclo indo de uma extremidade a outra do diâmetro do cilindro, e realizando pequenos movimentos rotacionais em seu eixo, no momento em que houve uma inversão de sentido no movimento.

6.1.2 Comportamento da placa de 50mm

Estudo do comportamento da placa de 50mm sob velocidades v=0,002 m/s, v=0,020 m/s e v=0,200 m/s.

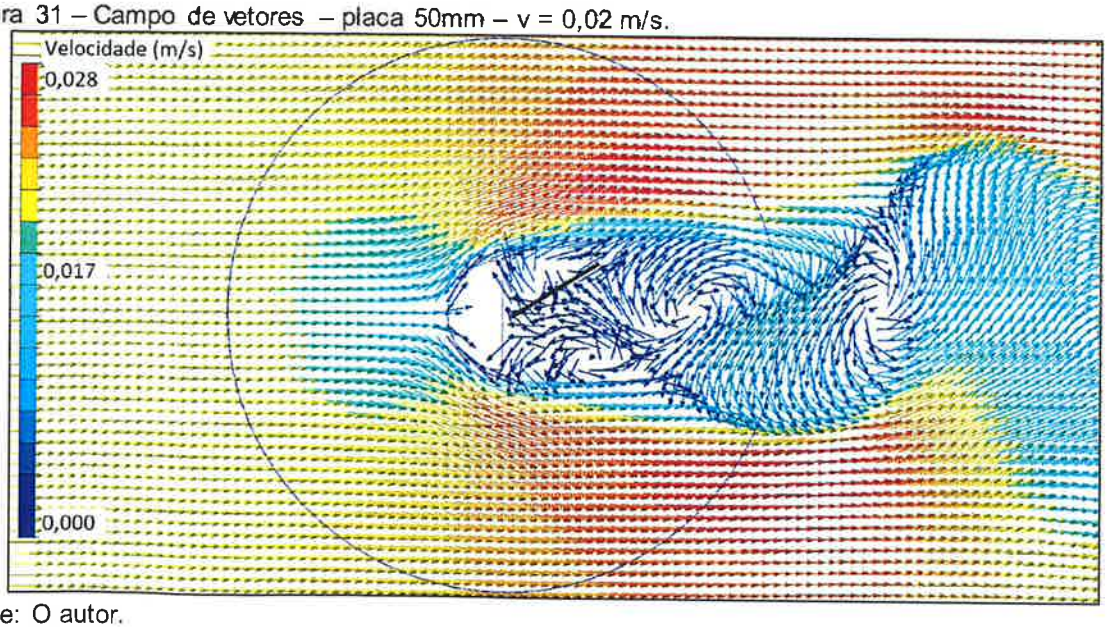
Figura 30 – Campo de vetores – placa 50mm – v = 0,002 m/s.



Fonte: O autor.

A placa realizou uma deflexão de aproximadamente 45°, com oscilações de aproximadamente 2,5°, em um intervalo de tempo de aproximadamente 126 segundos, fazendo com que a frequência seja em torno de f=0,0079 Hz.

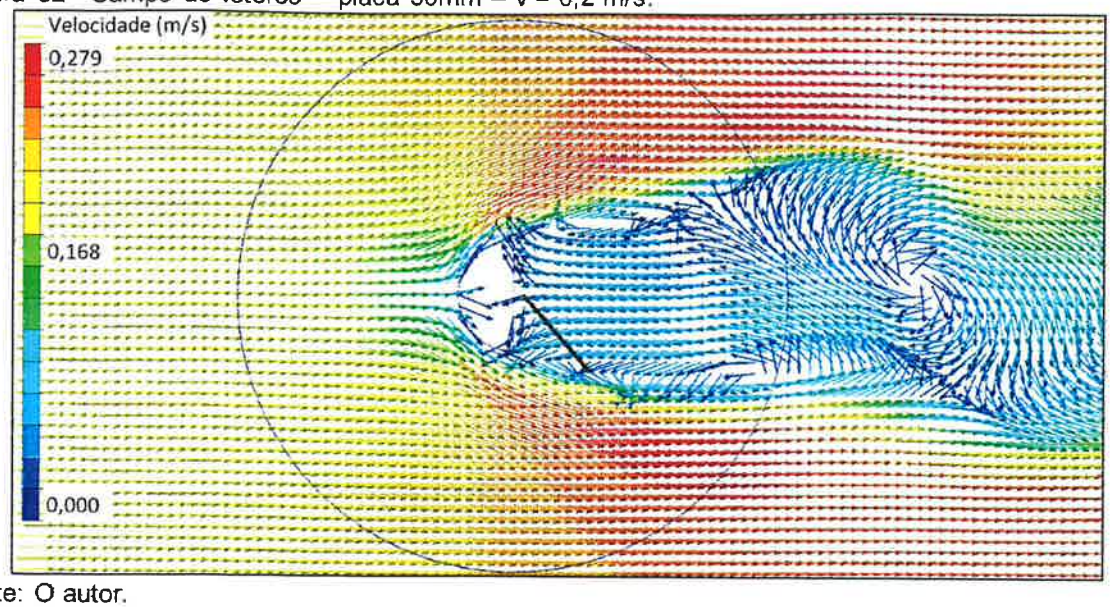
Figura 31 – Campo de vetores – placa 50mm – v = 0,02 m/s.



Fonte: O autor.

A placa realizou uma deflexão de aproximadamente 40°, com oscilações de aproximadamente 1°, em um intervalo de tempo de aproximadamente 6,75 segundos, fazendo com que a frequência seja em torno de f=0,148 Hz.

Figura 32 - Campo de vetores – placa 50mm – v = 0,2 m/s.



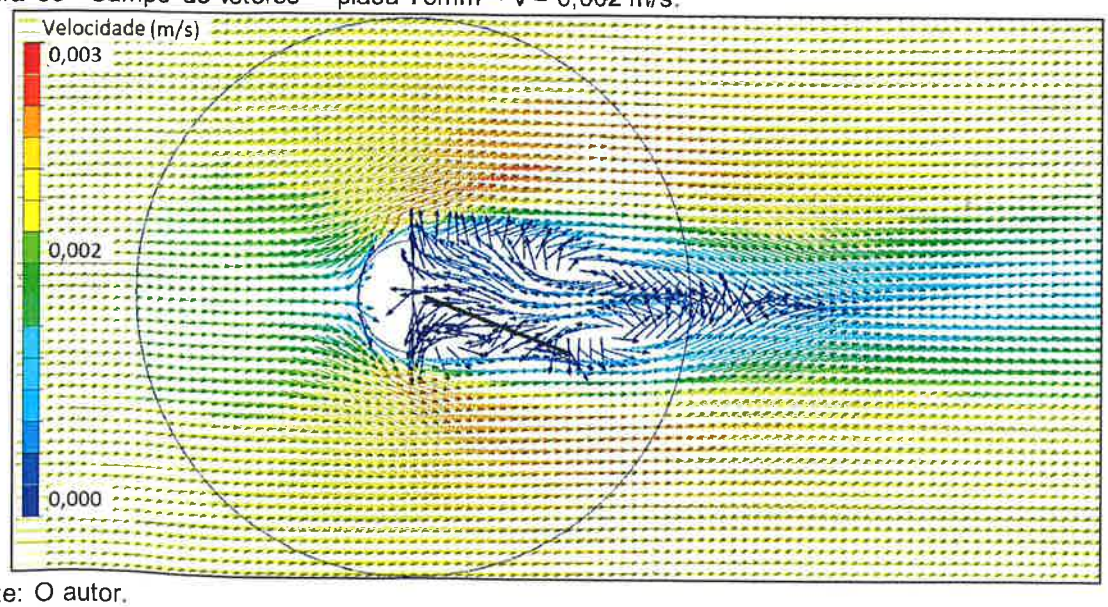
Fonte: O autor.

A placa realizou uma deflexão de aproximadamente 45°, com oscilações de aproximadamente 2,5°, em um intervalo de tempo de aproximadamente 2 segundos, fazendo com que a frequência seja em torno de f=0,050 Hz.

6.1.3 Comportamento da placa de 75mm

Estudo do comportamento da placa de 75mm sob velocidades v=0,002 m/s, v=0,020 m/s e v=0,200 m/s.

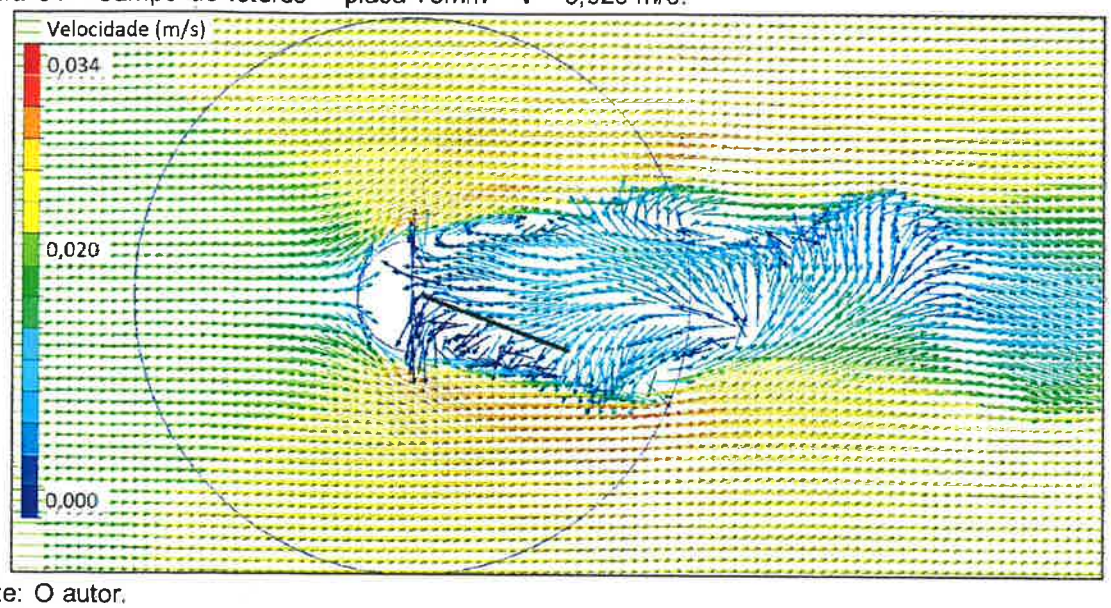
Figura 33 - Campo de vetores – placa 75mm – v = 0,002 m/s.



Fonte: O autor.

A placa realizou uma deflexão de aproximadamente 21°, com oscilações de aproximadamente 2°, em um intervalo de tempo de aproximadamente 83,125 segundos, fazendo com que a frequência seja em torno de f=0,012 Hz.

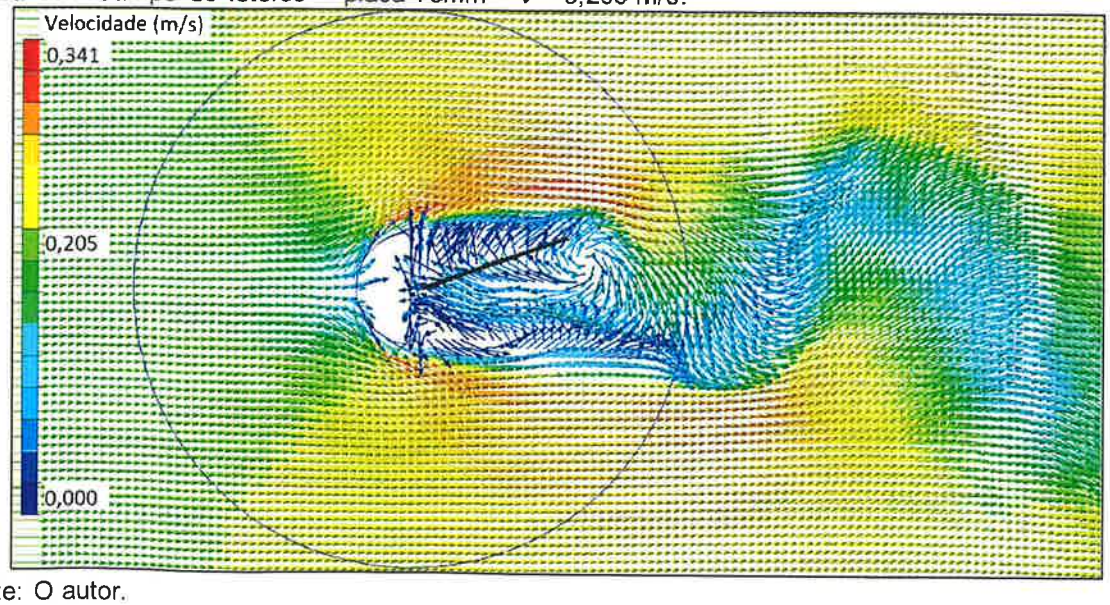
Figura 34 – Campo de vetores – placa 75mm – v = 0,020 m/s.



Fonte: O autor.

A placa realizou uma deflexão de aproximadamente 19°, com oscilações de aproximadamente 3°, em um intervalo de tempo de aproximadamente 10,625 segundos, fazendo com que a frequência seja em torno de f=0,094 Hz.

Figura 35 – Campo de vetores – placa 75mm – v = 0,200 m/s.



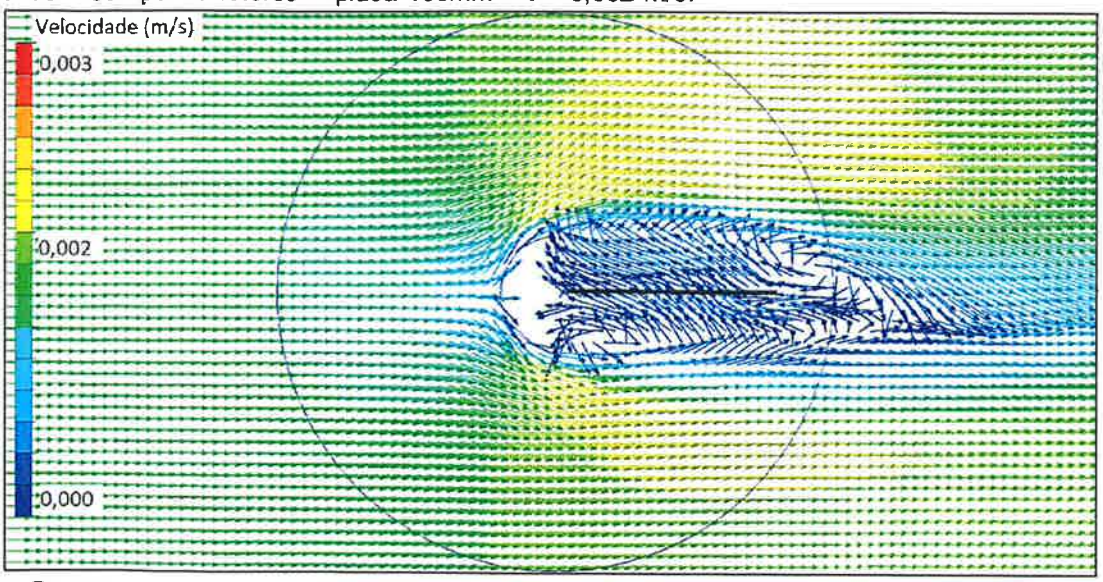
Fonte: O autor.

A placa realizou uma deflexão de aproximadamente 25°, com oscilações de aproximadamente 6°, em um intervalo de tempo de aproximadamente 1,625 segundos, fazendo com que a frequência seja em torno de f=0,61 Hz.

6.1.4 Comportamento da placa de 100mm

Estudo do comportamento da placa de 100mm sob velocidades v=0,002 m/s, v=0,020 m/s e v=0,200 m/s.

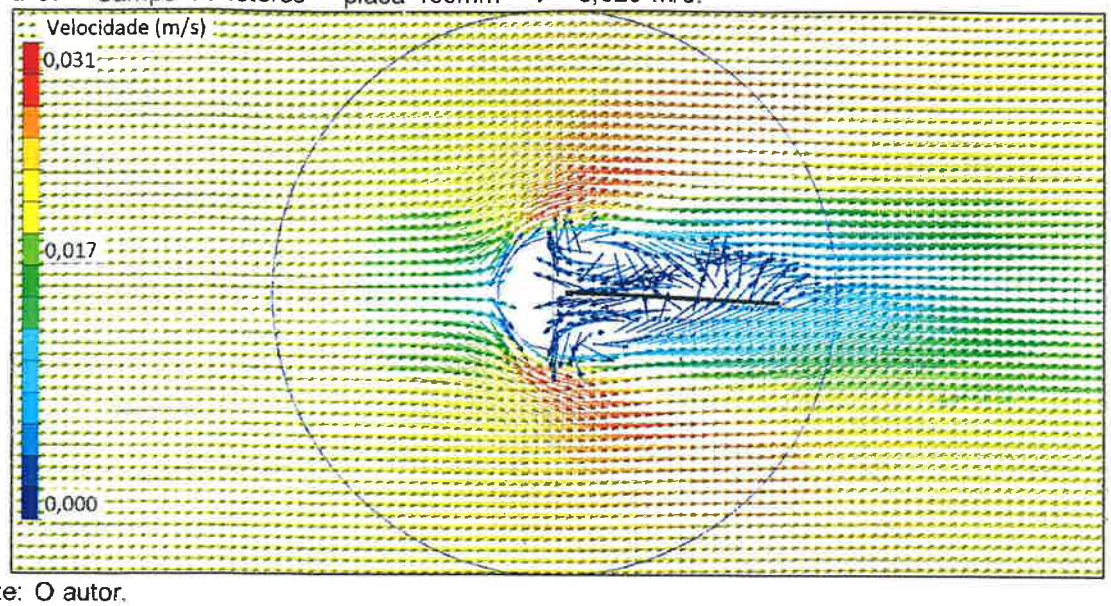
Figura 36 – Campo de vetores – placa 100mm – v = 0,002 m/s.



Fonte: O autor.

A placa realizou uma deflexão de aproximadamente 0°, com oscilações de aproximadamente 2,5°, em um intervalo de tempo de aproximadamente 52,5 segundos, fazendo com que a frequência seja em torno de f=0,019 Hz.

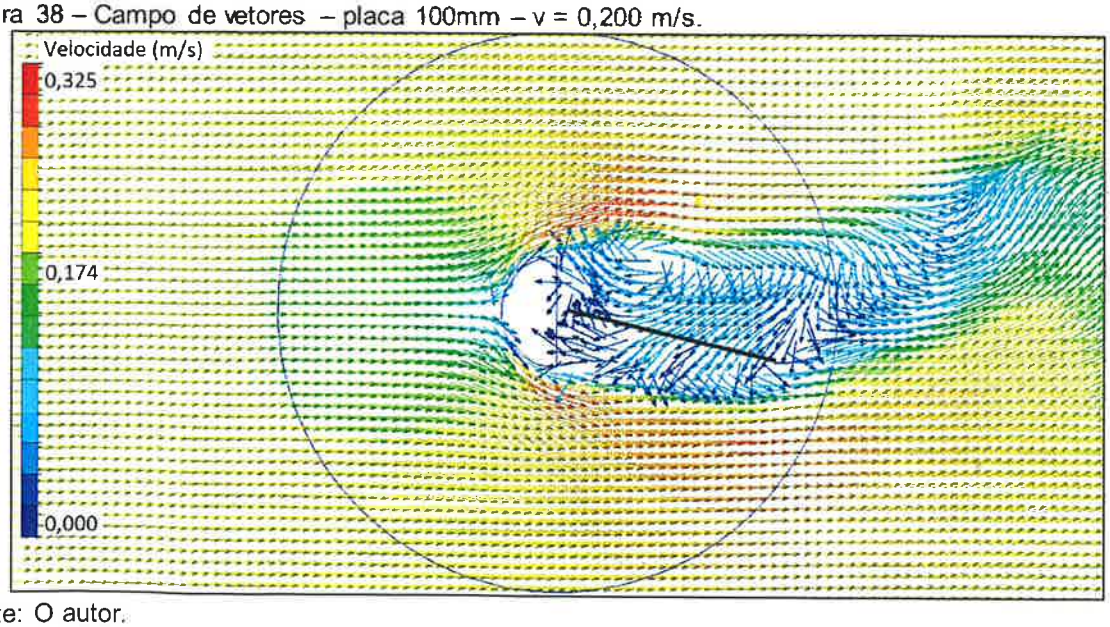
Figura 37 – Campo de vetores – placa 100mm – v = 0,020 m/s.



Fonte: O autor.

A placa realizou uma deflexão de aproximadamente 1,5°, com oscilações de aproximadamente 2,5°, em um intervalo de tempo de aproximadamente 18,75 segundos, fazendo com que a frequência seja em torno de f=0,0533 Hz.

Figura 38 – Campo de vetores – placa 100mm – v = 0,200 m/s.



Fonte: O autor.

A placa realizou uma deflexão de aproximadamente 1°, com oscilações de aproximadamente 15°, em um intervalo de tempo de aproximadamente 2,125 segundos, fazendo com que a frequência seja em torno de f=0,4706 Hz.

Na tabela a seguir, apresenta-se o resumo e cálculo do número de Strouhal.

Tabela 1 - Cálculo do número de Strouhal – cilindro e fólio NACA 0012.

NUMERO DE STROUHAL								
Fólio	Reynolds	Velocidade de aproximação (m/s)	Oscilação L (m)	Tempo (segundos)	Tempo ciclo (segundos)	Frequência (Hz)	Circunferência do cilindro (mm)	STROUHAL
NACA 0012	60.000	0,80	0,075	0,43	0,72	1,3888	75	0,13

Fonte: O autor.

Tabela 2 - Cálculo do número de Strouhal – cilindro e placa.

NUMERO DE STROUHAL								
Placa plana (mm)	Reynolds	Velocidade de aproximação (m/s)	Oscilação (θ°)	Tempo (segundos)	Tempo ciclo (segundos)	Frequência (Hz)	Circunferência do cilindro (mm)	STROUHAL
50	10^2	0,002	2,50	126,00	252,00	0,0040		0,0992
50	10^3	0,020	1,00	6,75	13,50	0,0741		0,1852
50	10^4	0,200	2,50	2,00	4,00	0,2500		0,0625
75	10^2	0,002	2,00	83,13	166,25	0,0060		0,1504
75	10^3	0,020	3,00	10,63	21,25	0,0471	50	0,1176
75	10^4	0,200	6,00	1,63	3,25	0,3077		0,0769
100	10^2	0,002	2,50	52,50	105,00	0,0095		0,2381
100	10^3	0,020	2,50	18,75	37,50	0,0267		0,0667
100	10^4	0,200	15,00	2,13	4,25	0,2353		0,0588

Fonte: O autor.

7. DISCUSSÃO

O cálculo do número de Strouhal para os vórtices da cauda dos peixes se torna alto por ser um jato gerado a partir dos esforços do peixe. Os vórtices gerados a partir de um cilindro colocado de maneira transversal em um escoamento, podem gerar número de Strouhal não tão alto quanto ao dos peixes, mas consegue-se números de Strouhal satisfatórios, o que ocorreu para alguns comprimentos de placa colocadas atrás do cilindro.

Um aspecto importante a ser levado em consideração diz respeito às grandezas intervenientes na definição do número de Strouhal: frequência, uma grandeza linear e velocidade. Quanto à frequência não há dúvida, deve-se usar a frequência dos vórtices gerados; em se tratando de velocidade deve-se sempre usar a velocidade de aproximação; no tocante à dimensão linear, há divergências entre diferentes pesquisadores; uns usam o diâmetro do cilindro fixo e outros a amplitude do vórtice como grandeza linear representativa.

Não há erro em nenhuma destas adoções, apenas tem-se que adotar a grandeza correspondente para que se possa fazer comparações.

Quanto as frequências, pode-se chegar à conclusão que três das nove placas atingiram números de Strouhal satisfatórios, que considerou-se ser em torno de 0,21. O que se buscou nesse trabalho, foi observar se a placa vibrava com a formação dos vórtices, mas, na maioria dos casos, onde houveram alguns tipos de combinação de comprimento de placa e velocidade, aparentemente houve uma desorganização dos vórtices de forma que o mais provável é que os vórtices não conseguiram se desenvolver de forma que pudessem gerar uma oscilação maior. Este comportamento é o mesmo das placas que são colocadas atrás de estruturas para desfazer os vórtices que causam vibração. Neste caso ocorreu que a vibração dos vórtices foi transferida para a placa, uma vez que a mesma tinha movimentos livres na horizontal.

Acredita-se que se a placa for de material flexível, haverá melhoria na eficiência, já que não haverá desorganização dos vórtices. É recomendável, que se coloque a placa a uma distância mínima, que deverá ser verificada, para que se possa preservar a região de separação dos vórtices, pois é essa região que entra em desequilíbrio e produz a esteira de vórtices.

Os resultados destas simulações computacionais, em que as placas não oscilam com frequências próximas às frequências dos vórtices livres, e também por apresentarem amplitudes reduzidas, corroboram com as experiências dos irmãos Triantafyllou, que para conseguirem frequências e amplitudes maiores, ensaiaram com placas afastadas do cilindro gerador de vórtice, o que difere do arranjo destas simulações, que utilizou placas que estavam articuladas ao cilindro.

8. CONCLUSÕES

Com a observação das imagens anteriores e das oscilações descritas pelas imagens dinâmicas do software, pode-se concluir que o movimento oscilatório, uma vez constatado, pode ser adotado como ferramenta computacional para orientar o projeto de um modelo físico.

Com este modelo matemático-computacional é possível simular resultados a partir de diferentes dimensões do cilindro, com seção em "D", e com diferentes comprimentos de placa.

Outro ponto importante da simulação foi, a conclusão de que, quanto maior é o comprimento da placa, menor é a interferência na organização dos vórtices, e como a placa oscila livremente, a jusante pode-se visualizar a formação da esteira de vórtices.

Quando analisados os movimentos de todas as placas em velocidades diferentes, conclui-se que a placa poderá apresentar maior eficiência quando seu comprimento for maior ou igual a duas vezes o diâmetro do cilindro.

Impressiona positivamente a capacidade do aplicativo CFD em simular configurações de esteiras de vórtices; mesmo assim não se tem garantia de que as configurações de vórtices geradas representem ocorrências físicas reais. O aumento da confiabilidade destas simulações precisa ser acompanhado de experimento físico com a mesma geometria, com as mesmas propriedades físicas e com as mesmas condições de contorno.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADG-STANFORD. adg.stanford.edu. **adg.stanford.edu**, 2007. Disponivel em: <http://adg.stanford.edu/aa200b/lecturenotes/lecture14.pdf>. Acesso em: 08 Fevereiro 2015.

ASSY, T. M. **Mecânica dos fluidos fundamentos e aplicações**. 7ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 710 p.

AUTODESK. Autodesk knowledge Network. **Autodesk**, 2015. Disponivel em: <http://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore#?sort=score>. Acesso em: 02 Junho 2015.

BEAL, D. N.; HOVER, F. S.; TRIANTAFYLLOU, M. S. Lauder Laboratory Harvard University. **Lauder Laboratory Harvard University**, Disponivel em: <http://www.people.fas.harvard.edu/~glauder/reprints_unzipped/BealEtAl2006.pdf>. Acesso em: 20 Fevereiro 2015.

BISTAFA, S. R. **Mecânica dos fluidos:** noções e aplicações. 1ª. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **FLUID MECHANICS:** FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS. 1ª. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

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

DAILY, J. W.; HARLEMAN, D. R. F. **Fluid Dynamics**. Massachusetts: Addison-Wesley, 1966.

DOUGLAS, J. F. et al. **Fluid Mechanics**. Londres: Pearson Education, 2005.

ELOY, C. Optimal Strouhal number for swimming animals. **Cornell University Library**, 2011. Disponivel em: <http://arxiv.org/abs/1102.0223>. Acesso em: 08 Fevereiro 2015.

FALKOVICH, G. **Fluid Mechanics**. 1ª. ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

KEMP, M. **Leonardo da Vinci:** the marvellous works of nature and man. New York: Oxford university press, 2006.

MARTUFI, G. matematicamente. **matematicamente**, 1999. Disponivel em: <http://www.matematicamente.it/staticfiles/approfondimenti/ingegneria/ponte_Tacoma.pdf>. Acesso em: 15 Janeiro 2012.

MCDONALD'S, F. E. **Introduction to fluid mechanics**. 8ª. ed. Danvers: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

MUNSON, B. R.; YOUNG, O. H. **Fundamentals of Fluid Mechanics**. Danvers: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

TRIANTAFYLLOU, M. S.; TRIANTAFYLLOU, G. S. An efficient swimming machine. **Scientific American**, n. 272, p. 40-45, 1995.

UNIVERSITY OF WASHINGTON. University of Washington. **University of Washington**, 2014. Disponivel em: <http://www.lib.washington.edu/specialcollections/collections/exhibits/tnb>. Acesso em: 28 Junho 2015.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. 7ª. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.