UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA

FÁBIO ALVES DE OLIVEIRA

# ESTUDO E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES EM UM CILINDRO CIRCULAR

SÃO JOÃO DA BOA VISTA
2024

FÁBIO ALVES DE OLIVEIRA

# ESTUDO E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES EM UM CILINDRO CIRCULAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Aeronáutica.

Orientador: Prof. Dr. Elmer Mateus Gennaro.

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2024

O48e

Oliveira, Fábio Alves de
Estudo e análise de vibração induzida por vórtices em um cilindro circular / Fábio Alves de Oliveira. -- São João da Boa Vista, 2024
60 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista
Orientador: Elmer Mateus Gennaro

1. Dinâmica dos fluídos;. 2. Reynolds, Numero de. 3. Navier-Stokes, Equações de. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**
**FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA**
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

# ESTUDO E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICE EM UM CILINDRO CIRCULAR

Aluno: Fabio Alves de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Elmer Mateus Gennaro

Banca Examinadora:

- Elmer Mateus Gennaro (Orientador)
- Murilo Sartorato (Examinador)
- Renan Trevizan de Melo (Examinador)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 06 de dezembro de 2024

## RESUMO

A vibração de estruturas induzidas por vórtices é de interesse tecnológico em diversos campos da engenharia. É um caso típico de interação fluido-estrutura observados principalmente em escoamentos ao redor de corpos rombudos. Até hoje, sabe-se muito pouco da interação fluido-estrutura, e as regras de concepção e projeto dessas estruturas são baseadas em um conjunto limitado de resultados experimentais. O objetivo da proposta é estudar, através de simulações numéricas da dinâmica dos fluidos, o comportamento do problema de vibração induzida por vórtices em um cilindro rígido em condição de escoamento livre para vibrar na direção transversal ao escoamento. Para tanto, utilizou-se o Nek5000, um código de dinâmica de fluidos computacional de elementos espectrais altamente escalável para resolver as equações de Navier-Stokes e calcular os coeficientes aerodinâmicos em um cilindro circular para diferentes números de Reynolds.



**Palavras-chave:** dinâmica dos fluídos; reynolds, numero de; navier-stokes, equações de.

## ABSTRACT

Vortex-induced vibration of structures is of technological interest in several engineering fields. It is a typical case of fluid-structure interaction observed mainly in flows around blunt bodies. Until today, not much is known about fluid-structure interaction, and the conception and design rules of these structures are based on a limited set of experimental results. The aim of this proposal is to study, through numerical fluid dynamics simulations, the behavior of the vortex-induced vibration problem in a rigid cylinder under free-flow conditions vibrating in the direction transverse to the flow. For this purpose, Nek5000, a highly scalable spectral element computational fluid dynamics code, was used to solve the Navier-Stokes equations and calculate the aerodynamic coefficients in a circular cylinder for different Reynolds number.



**Keywords:** fluid dynamics; reynolds number; navier-stokes equations.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de um cilindro livre para oscilar sob a incidência de um escoamento. ..... 14
Figura 2 – Descrição dos regimes de escoamento ..... 17
Figura 3 – Perfil de distribuição de pressão sobre a superfície do cilindro (a) sem desprendimento de vórtices. (b) com desprendimento de vórtices na parte inferior. ..... 19
Figura 4 – Escoamento transversal sobre um cilindro. ..... 20
Figura 5 – Modelo de formação de vórtices. ..... 21
Figura 6 – Esteira para Reynolds = 105. ..... 22
Figura 7 – Modos A (Reynolds=200) e B (Reynolds=270). ..... 23
Figura 8 – Imagem de esteira com Reynolds=5000. ..... 24
Figura 9 – Esteiras evidenciando o padrão 2S. ..... 24
Figura 10 – Modos de emissão de vórtices. ..... 25
Figura 11 – Padrão 2P emitido de um cilindro com movimentação forçada. ..... 26
Figura 12 – Imagens obtidas experimentalmente na parte superior e numericamente na parte inferior. Modo 2S na esquerda (a) e P+S na direita (b) ..... 26
Figura 13 – Exemplo de malha estruturada. ..... 29
Figura 14 – Exemplo de malha não estruturada. ..... 30
Figura 15 – Malha e geometria computacional usando 1004 elementos 10x10 e polinômio interpolador de grau 10. ..... 36
Figura 16 – Coeficiente de arrasto para Re=100. ..... 41
Figura 17 – Coeficiente de arrasto para Re=150. ..... 42
Figura 18 – Coeficiente de arrasto para Re=200. ..... 42
Figura 19 – Coeficiente de arrasto para Re=250. ..... 43
Figura 20 – Coeficiente de arrasto para Re=300. ..... 43
Figura 21 – Coeficiente de arrasto para Re=300 e A=0.3. ..... 44
Figura 22 – Coeficiente de sustentação para Re=100. ..... 45
Figura 23 – Coeficiente de sustentação para Re=150. ..... 45
Figura 24 – Coeficiente de sustentação para Re=200. ..... 46
Figura 25 – Coeficiente de sustentação para Re=250. ..... 46
Figura 26 – Coeficiente de sustentação para Re=300. ..... 47
Figura 27 – Coeficiente de arrasto experimental. ..... 48
Figura 28 – Campo de velocidade para time step=1000. ..... 50

Figura 29 – Campo de velocidade para time step=10000. .....51
Figura 30 – Campo de velocidade para time step=10200. .....52
Figura 31 – Campo de velocidade para time step=10400. .....53
Figura 32 – Campo de velocidade para time step=10600. .....54
Figura 33 – Campo de velocidade para time step=10800. .....55
Figura 34 – Campo de velocidade para time step=11000.....56
Figura 35 – Campo de velocidade para time step=11200.....57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definição dos parâmetros de simulação. .....40
Tabela 2 – $C_{D,rms}$ e $C_{L,rms}$ de acordo com o número de Reynolds.....48
Tabela 3 – Resultados experimentais para diferentes níveis de rugosidade do cilindro.....49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| RMS | Root Mean Square |
| PIV | Particle Image Velocimetry |
| Re | Número de Reynolds |
| VIV | Vibração Induzida por Vórtices |

## LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---|---|
| $A$ | Amplite de oscilação do cilindro |
| $f$ | Frequência de oscilação do cilindro |
| $m$ | Massa do cilindro |
| $k$ | Constante elástica |
| $c$ | Constante de amortecimento |
| $U_\infty$ | Velocidade do escoamento livre |
| $U_x$ | Componente da velocidade na direção $x$ |
| $F$ | Força de sustentação |
| $C_L$ | Coeficiente de sustentação |
| $C_D$ | Coeficiente de arrasto |
| $C_{L,rms}$ | Valor quadrático médio do coeficiente de sustentação |
| $C_{D,rms}$ | Valor quadrático médio do coeficiente de arrasto |
| $\rho$ | Densidade do fluido |
| $P$ | Pressão do fluido |
| μ | Viscosidade dinâmica do fluido |
| $\lambda$ | Coeficiente de viscosidade volumétrica |
| $\boldsymbol{u}$ | Vetor velocidade do fluido |
| $\boldsymbol{\tau}$ | Tensor de tensões viscosas |
| $\boldsymbol{g}$ | Vetor de aceleração gravitacional |
| $\boldsymbol{I}$ | Matriz identidade |

**SUMÁRIO**

**1 INTRODUÇÃO** ..... **12**

1.1 Contexto do trabalho ..... 12

1.2 Objetivo do trabalho ..... 12

1.3 Objetivos específicos ..... 13

**2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** ..... **14**

2.1 Vibração induzida por vórtices ..... 14

2.2 O Número do Reynolds ..... 16

2.3 Forças de sustentação e arrasto ..... 18

2.4 Mecanismo de desprendimento de vórtices ..... 21

2.5 Padrões de emissão de vórtices ..... 22

*2.5.1 Esteira desenvolvida para cilindro fixo* ..... 22

*2.5.2 Esteira desenvolvida para cilindro oscilando* ..... 25

2.6 Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) ..... 26

*2.6.1 Pré-processamento* ..... 28

*2.6.2 Solução* ..... 30

*2.6.3 Pós-processamento* ..... 31

2.7 Método de Solução das Equações de Navier-Stokes ..... 32

**3 METODOLOGIA** ..... **34**

3.1 Geração da geometria e malha ..... 35

*3.1.1 Geração da malha no Gmsh* ..... 36

*3.1.2 Preparação da malha para o Nek5000* ..... 37

*3.1.3 Configurar o Nek5000 para usar a malha* ..... 37

3.2 Condições de contorno ..... 38

*3.2.1 Velocidade do Fluido* ..... 38

*3.2.2 Temperatura e Escalares Passivos* ..... 39

*3.2.3 Condições de Contorno Internas* ..... 39

3.3 Definição dos parâmetros ..... 39

**4 RESULTADOS** ..... **41**

**5 CONCLUSÕES** ..... **58**

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** ..... **59**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto do trabalho

A vibração induzida por vórtices (VIV) de cilindros circulares tem sido objeto de estudo em pesquisas, abordando questões fundamentais de interesse na dinâmica dos fluidos, motivado por aplicações fluido-estruturais, sobretudo em água.

O escoamento em torno de cilindros circulares é afetado por uma séries de parâmetros, como número de Reynolds, rugosidade da superfície, nível de turbulência do fluxo livre, etc. O número de Reynolds é talvez o parâmetro mais importante no estudo da dinâmica dos fluidos. É um parâmetro adimensional que relaciona as forças viscosas e de inércia e permite avaliar o tipo do escoamento e pode indicar se flui de forma laminar ou turbulenta.

A revisão bibliográfica deste trabalho aborda os conceitos sobre VIV, o mecanismo de desprendimento de vórtices e seus padrões de emissão em um cilindro circular, as equações de Navier-Stokes, bem como um breve estudo da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e um resumo do método dos elementos espectrais, que é empregado pelo código de CFD Nek5000.

Na metodologia (etapa de pré-processamento de uma simulação CFD), serão definidos os parâmetros, o domínio computacional, geometria e malha do problema.

Na última seção serão mostrados os resultados, discussão e conclusão do trabalho, comparando com a literatura os resultados do coeficiente de sustentação para diferentes números de Reynolds.

## 1.2 Objetivo geral

Realizar simulações numéricas da dinâmica dos fluidos de vibrações induzidas por vórtices de um cilindro rígido sujeito a um escoamento externo e livre para vibrar na direção transversal.

## 1.3 Objetivos específicos

- Gerar uma base de dados sobre o comportamento observado experimentalmente do problema de vibração induzida por vórtices;
- Identificar padrões da emissão de vórtices na esteira.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

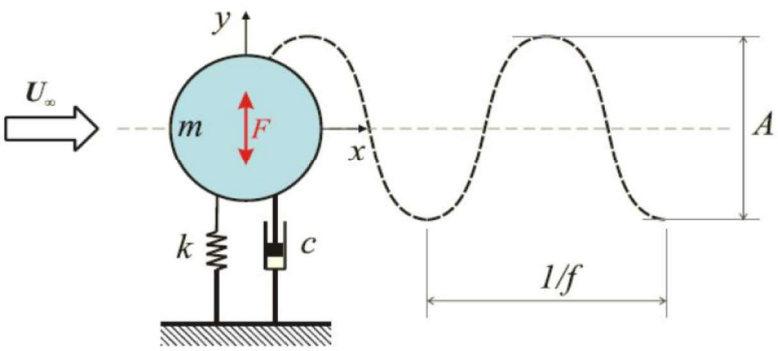
## 2.1 Vibração induzida por vórtices

O fenômeno de vibrações induzidas por vórtices (VIV) é caracterizado por oscilações verificadas em corpos esbeltos e de seção transversal rombuda, quando imersos em escoamento fluido com velocidade acima de determinado valor crítico. Estas oscilações tem sua origem na emissão alternada de vórtices que geram forças periódicas devido a flutuações do campo de pressões próximos.

Apesar de sua aparente simplicidade, esse fenômeno ainda não se encontra completamente compreendido graças à particular dificuldade de entendimento do seu mecanismo de acoplamento fluido-estrutural, especialmente caracterizado por oscilações auto-excitadas e auto-controladas (FUJARRA, 2002). Segundo esse mecanismo, o corpo absorve energia do meio e entra em oscilação devido à sincronização entre a frequência de emissão de vórtices e a frequência natural do corpo. Dessa forma, configura-se um quadro de ressonância, no qual toda energia absorvida do meio é dissipada e, portanto, é onde a dinâmica do sistema encontra-se sob controle (FUJARRA, 1997).

A maneira mais intuitiva de se compreender as VIV é esboçando uma situação em que se está presente um cilindro rígido montado sobre um conjunto de molas e amortecedores sujeito a um escoamento. O único grau de liberdade deste cilindro é na direção transversal ao fluxo e o conjunto amortecedor-mola resiste ao movimento nesta direção. A Figura 1 a seguir exemplifica a montagem do cilindro sobre o sistema, onde $A$ representa a amplitude, $f$ a frequência, $m$ a massa do cilindro, $k$ a constante elástica da mola, $c$ a constante de amortecimento, $U_\infty$ a velocidade do escoamento e $F$ a força de sustentação.

Figura 1 – Sistema de um cilindro livre para oscilar sob a incidência de um escoamento.




Fonte: ASSI, 2005.

Portanto, dado o cilindro da Figura 1 sujeito ao escoamento incidente, pode-se variar a velocidade deste escoamento de forma que a frequência de emissão de vórtices também varie e, consequentemente, a flutuação do campo de pressões ao redor do cilindro. Como as forças resultantes no corpo nada mais são do que a integração do campo de pressões na sua superfície, esta variação temporal da força de sustentação causará uma excitação com uma frequência definida e idêntica a de emissão de vórtices.

O efeito do fenômeno da VIV em *risers* (tubulações que conduzem o petróleo do fundo do mar até a plataforma na superfície) é uma das preocupações no projeto de sistemas marítimos de petróleo devido à sua tendência de, sob certas condições, ter o potencial de aumentar o nível de tensões presentes nas estruturas. O aumento das tensões impacta na redução da vida operacional do sistema, causada pelos danos de fadiga. Nesse sentido, a correta predição dos deslocamentos e tensões geradas devido à VIV é de grande importância no projeto de sistemas de *risers*.

A necessidade de se prever a existência de problemas causados pela VIV foi reconhecida pelas indústrias de petróleo no início da década de 1960 (PANTAZOULOS, 1994). Desde então, a vibração induzida por vórtices em estruturas esbeltas se tornou um dos tópicos mais pesquisados no campo da hidrodinâmica e mecânica. No entanto, as tradicionais soluções analíticas e numéricas não puderam ser adaptadas à complexidade do problema. Inúmeros foram os métodos propostos para modelar aspectos específicos da resposta das estruturas devido às VIV, mas nenhum foi completamente aceito para os propósitos de projeto.

LARSEN e HALSE (1995) realizaram uma comparação entre os modelos para a vibração induzida por vórtices (VIV) em estruturas esbeltas. As suas principais motivações foram que os modelos variavam consideravelmente em termos das suas considerações gerais, formulação matemática e o método de se obter os resultados experimentais. Portanto, para problemas idênticos, são esperados resultados diferentes devido às variações nos modelos, nas suposições feitas, e nas metodologias empregadas para obter os resultados experimentais. No entando, os resultados apresentaram grandes discrepâncias, o que levou os autores a concluírem que os aspectos relacionados às VIV ainda não haviam sido compreendidas, principalmente a atenuação espacial das vibrações e o processo de desprendimento de vórtices.

CHAPLIN *et al* (2005a) realizaram uma nova comparação entre os diferentes métodos para o cálculo da resposta de estruturas esbeltas devido à VIV, que foram divididos com base na técnica utilizada: CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics* (técnica que utiliza

simulações numéricas para estudar e prever o comportamento de fluidos em movimento ao redor de objetos, resolvendo as equações governantes do fluxo.), *Strip Theory* e empírico (baseado em medições). A técnica de *Strip Theory* trata a estrutura como uma série de "tiras" ou seções bidimensionais discretizadas ao longo do comprimento, permitindo a análise hidrodinâmica de cada seção individualmente. Neste caso, os resultados foram comparados com dados experimentais de um modelo de *riser* vertical tracionado pelo topo. Detalhes sobre o experimento podem ser encontrados em (CHAPLIN et al., 2005b). Neste ponto, deve-se salientar que as predições através dos métodos de cálculos foram conduzidas às "cegas", isto é, sem prévio conhecimento dos resultados experimentais. Os resultados apresentaram um grande progresso em relação à concordância quando comparados aos resultados por (LARSEN; HALSE, 1995).

Os parâmetros são de grande importância para o entendimento da VIV. No entanto, este fenômeno depende de vários parâmetros relacionados às características do escoamento e do modelo (FUJARRA, 1997), de forma que a investigação simultânea de todos os parâmetros se torna complexa, justificando o fato de que os experimentos investiguem apenas uma parcela dos parâmetros envolvidos. Sendo assim, vários são os arranjos experimentais para o estudo da VIV, cada qual com sua peculiaridade.

## 2.2 O número de Reynolds

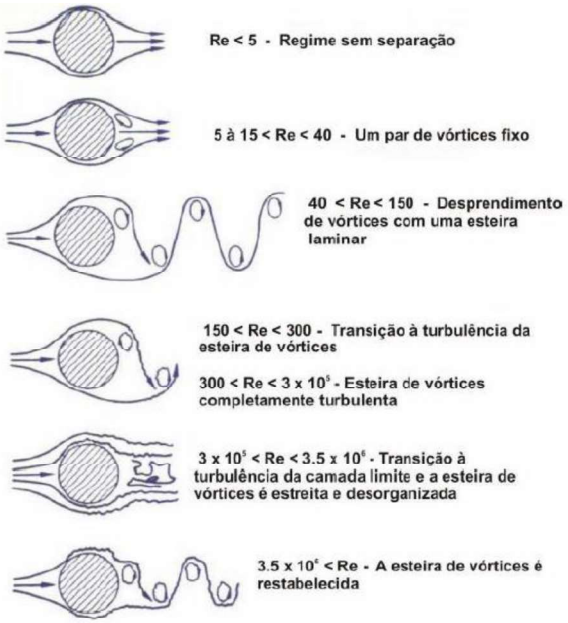
Um obstáculo quando imerso em um escoamento, gera a separação do escoamento próximo à sua superfície. Dependendo da relação entre as forças viscosas e de inércia atuantes neste escoamento, instabilidades podem ocorrer, causando a formação e o desprendimento de vórtices a jusante deste corpo (BLEVINS, 1986). O parâmetro adimensional que relaciona tais forças viscosas e de inércia é denominado número de Reynolds e é dado pela expressão a seguir:

$$Re = \frac{U_\infty D}{\nu} \tag{1}$$

onde $U_\infty$ é a velocidade do escoamento livre, que é a condição de fluxo antes da interferência causada pelo cilindro, $D$ é o diâmetro do cilindro e $\nu$ é a viscosidade cinemática do fluido.

O escoamento ao redor de cilindros pode experimentar diferentes regimes, dependendo da faixa do número de Reynolds na qual este se encontra. A Figura 2 ilustra o padrão de desprendimento para cada regime, em função do número de Reynolds.

Figura 2 – Descrição dos regimes de escoamento




Fonte: BLEVINS, 1986.

A descrição de cada regime pode ser feita da seguinte forma:

- $Re < 5$: Não ocorre separação do escoamento e, portanto, não há formação de vórtices;
- $5 < Re < 40$: Surge um par de vórtices que tende a aumentar de comprimento em função do acréscimo no valor do número de Reynolds;
- $40 < Re < 150$: Início do desprendimento com vórtices se movendo alternadamente em sentido horário e anti-horário. Este padrão de esteira é conhecido como esteira de Von Kármán, a qual, nesta faixa de Reynolds, é laminar;
- $150 < Re < 300$: Ocorre a transição à turbulência da esteira de vórtices de Kármán e o surgimento das primeiras instabilidades tridimensionais denominadas por "modo A" e "modo B";
- $300 < Re < 3.10^5$: Esteira completamente turbulenta, sendo que a camada limite sobre a superfície do cilindro permanece laminar;

- $3.10^5 < Re < 3{,}5.10^6$: Início da transição à turbulência da camada limite e a esteira de vórtices torna-se mais estreita e desorganizada;
- $3{,}5.10^6 \leq Re$: Reestabelecimento de uma esteira de vórtices turbulenta.

## 2.3 Forças de sustentação e arrasto

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 $F_L$ oscilatória sobre o cilindro, perpendicular ao movimento da corrente. A sustentação é definida como a componente da força do fluido perpendicular ao movimento do fluido. A razão dessa força e o produto da pressão dinâmica $0{,}5\rho u^2$ pela área frontal $LD$ do cilindro é definido como coeficiente de sustentação $C_L$ (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2001):

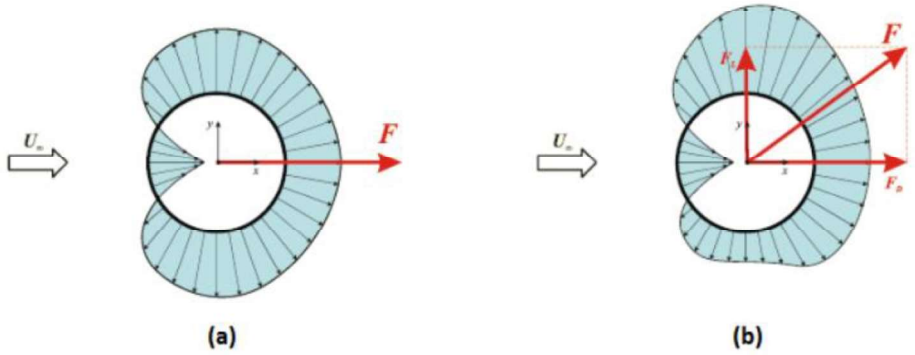
$$C_L = \frac{F_L}{0{,}5\rho u^2 LD} \tag{2}$$

onde $\rho$ é a densidade do fluido e $L$ o comprimento do cilindro.

Para entender melhor o porquê do aparecimento de uma força de sustentação e arrasto na superfície do cilindro deve-se saber que o desprendimento de vórtices da camada limite criam zonas de baixa pressão e elevada vorticidade. No momento em que as camadas cisalhantes, formadas por estes pequenos vórtices, interagem na região da esteira próxima, o grande vórtice que é formado influencia no campo de pressão na superfície do cilindro momentaneamente.

A Figura 3 exemplifica, através de um comparativo, a distribuição do campo de pressão em um cilindro com e sem emissão vórtices. A distribuição simétrica (à esquerda) representa o caso em que não ocorre desprendimento de vórtices e a distribuição assimétrica (à direita) o caso em que o vórtice está sendo formado na parte inferior do cilindro, gerando uma zona de baixa pressão nesta região da superfície.

Figura 3 – Perfil de distribuição de pressão sobre a superfície do cilindro (a) sem desprendimento de vórtices. (b) com desprendimento de vórtices na parte inferior.




Fonte: ASSI, 2005.

ÇENGEL e CIMBALA (2015) definem a força de arrasto $F_D$ como a força total exercida por um fluido sobre um corpo na direção do escoamento (ou seja, é a força que se opõe ao movimento) e pode ser decomposta em arrasto de atrito e arrasto de pressão, matematicamente expressa na equação a seguir:

$$F_D = F_{D_{pressao}} + F_{D_{atrito}} \tag{3}$$

O arrasto de atrito é a componente gerada pelos efeitos do cisalhamento da parede na direção do escoamento, logo depende muito da viscosidade. Esse efeito resulta em uma resistência tangencial à direção do escoamento, causada pela desaceleração das camadas de fluido próximas à parede, enquanto as camadas mais afastadas mantêm maior velocidade. O arrasto de pressão, por sua vez, é proporcional à área frontal e à diferença entre as pressões que agem na frente e atrás do corpo imerso. Portanto, o arrasto de pressão é usualmente dominante para corpos rombudos, pequeno para corpos carenados e zero para placas planas e finas paralelas ao escoamento (SOARES, 2021).

Devido à forma convergente na parte traseira de qualquer objeto (uma característica inevitável de todos os corpos de comprimento finito), as linhas de corrente irão divergir. Isso resulta em uma diminuição da velocidade do fluido e, de acordo com a equação de Bernoulli (aplicável na região de corrente livre), um consequente aumento da pressão. Portanto, nós temos, inicialmente, um gradiente de pressão adverso na parte de trás do corpo que leva a separação da camada-limite (camada de fluido próxima à superfície do corpo onde ocorre uma desaceleração do escoamento devido ao atrito com a parede) e, por fim, a uma esteira de baixa

pressão que, por sua vez, provoca um grande arrasto de pressão. Um gradiente de pressão adverso ocorre quando a pressão aumenta na direção em que o fluido está se movendo. Isso desacelera o fluido e pode causar a separação do fluxo da superfície (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2001).

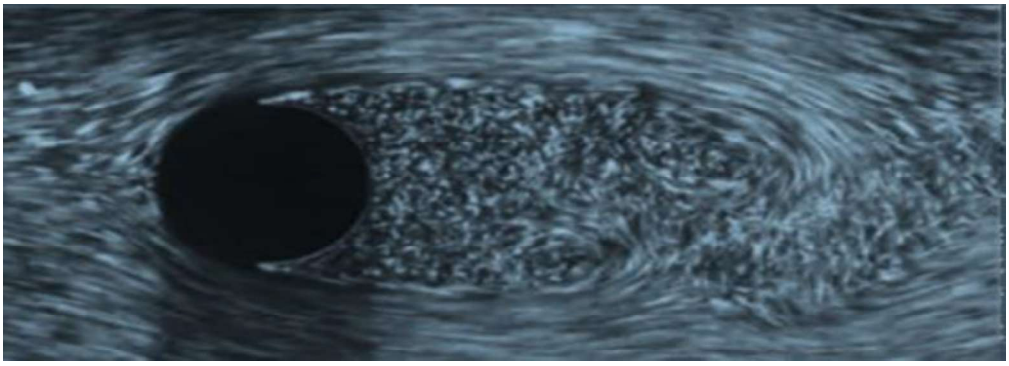
O coeficiente de arrasto é dado pela equação a seguir:

$$C_D = \frac{F_D}{0{,}5\rho u^2 LD} \tag{4}$$

Por ter essa relação de proporcionalidade inversa com a viscosidade (medida de resistência ao escoamento) do fluido, a contribuição do arrasto de atrito para o arrasto total de corpos rombudos pode chegar a ser desprezível quando se trabalha com elevados números de Reynolds, fazendo com que o arrasto total seja composto principalmente pelo arrasto de pressão. Consequentemente, com baixos números de Reynolds o arrasto total será composto principalmente pelo arrasto de atrito, tal ocorrência é vista em corpos carenados (SOARES, 2021).

Em um escoamento em torno de um cilindro, o número de Reynolds crítico é, aproximadamente, $2.10^5$ ,sendo o escoamento laminar para valores menores e turbulento para valores maiores. A Figura 4 mostra o escoamento transversal sobre um cilindro. O fluido se aproxima, se divide e envolve o cilindro formando uma camada limite que o engloba. As partículas de fluido no plano médio atingem o cilindro no ponto de estagnação, fazendo o fluido parar completamente, aumentando assim a pressão nesse ponto. A pressão diminui na direção do escoamento enquanto a velocidade do fluido aumenta (SOARES, 2021).

Figura 4 – Escoamento transversal sobre um cilindro.



Fonte: SOARES, 2021.

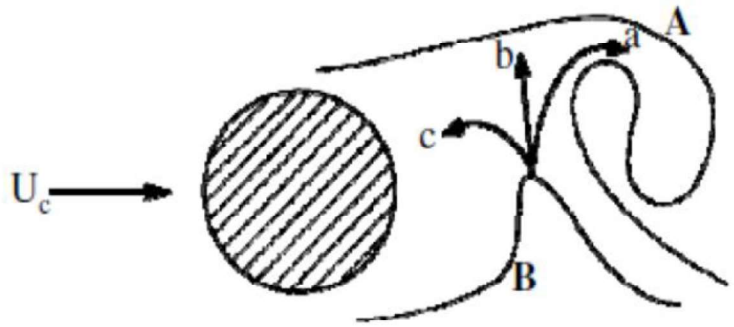
## 2.4 Mecanismo de desprendimento de vórtices

Segundo a mecânica dos fluidos, o fenômeno do desprendimento de vórtices em cilindros está relacionado ao estudo do escoamento de fluidos viscosos, que pode ser modelado pelas equações de Navier-Stokes (WHITE, 1991). Segundo a teoria da camada limite, formulada por Prandtl, quando o escoamento viscoso em torno de um corpo rombudo atingir certa velocidade, ocorrerá o deslocamento da camada limite causado pelo campo de pressão existente na porção traseira do corpo, que dará origem às camadas cisalhantes do fluido. A camada cisalhante é a região do fluido próxima a uma superfície sólida onde ocorre atrito, resultando em um gradiente de velocidade, com as partículas mais próximas da superfície movendo-se mais devagar que as mais distantes.

GERRARD (1966) descreve o mecanismo físico envolvido no fenômeno de formação de vórtices no escoamento ao redor de um cilindro. Ele apontou que o principal elemento no processo de formação de vórtices da esteira deve ser a interação mútua entre as duas camadas cisalhantes geradas pelo desprendimento da camada limite.

Um vórtice irá crescer devido à circulação da camada cisalhante a qual ele está conectado. Num dado instante, o vórtice se tornará suficientemente grande para atrair a camada cisalhante oposta, que apresenta vorticidade com sinal oposto. Esta interação do vórtice em formação com a camada cisalhante irá interromper a alimentação de circulação do vórtice em crescimento e, consequentemente, o seu desprendimento da camada cisalhante para a esteira (GERRARD, 1966).

Figura 5 – Modelo de formação de vórtices.




Fonte: GERRARD, 1966.

A Figura 5 ilustra a interação das camadas fluidas desprendidas. As setas (a), (b) e (c) indicam parcelas do fluido da camada cisalhante oposta (B) interagindo com o vórtice em formação (A).

A parcela do escoamento com direção à seta (a) é incorporada ao vórtice em formação (A). Como esta parcela possui vorticidade de sinal contrário ao fluido do vórtice em formação (A), ela colabora para a diminuição da circulação total deste último;

A parcela do escoamento que segue o caminho indicado pela seta (b) causa a interrupção da alimentação de circulação para o vórtice em formação (A);

A parcela do escoamento que segue o caminho indicado pela seta (c) colabora para a formação de um novo vórtice (B), fechando dessa maneira o ciclo de geração e desprendimento de vórtices.

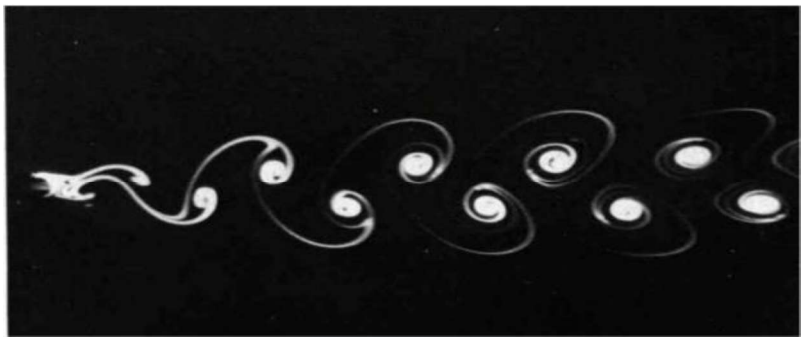
O balanço da quantidade de fluido que segue cada um destes caminhos controla a intensidade e a frequência de desprendimento de vórtices e a pressão à jusante do cilindro.

## 2.5 Padrões de emissão de vórtices

### *2.5.1 Esteira desenvolvida para cilindro fixo*

Para números de Reynolds (eq. (1)) menores que 180, pode-se dizer que a esteira é laminar e bidimensional, conforme Figura 6. A partir deste valor, instabilidades na direção do comprimento do cilindro começam a tornar a esteira tridimensional, iniciando o seu processo de transição.

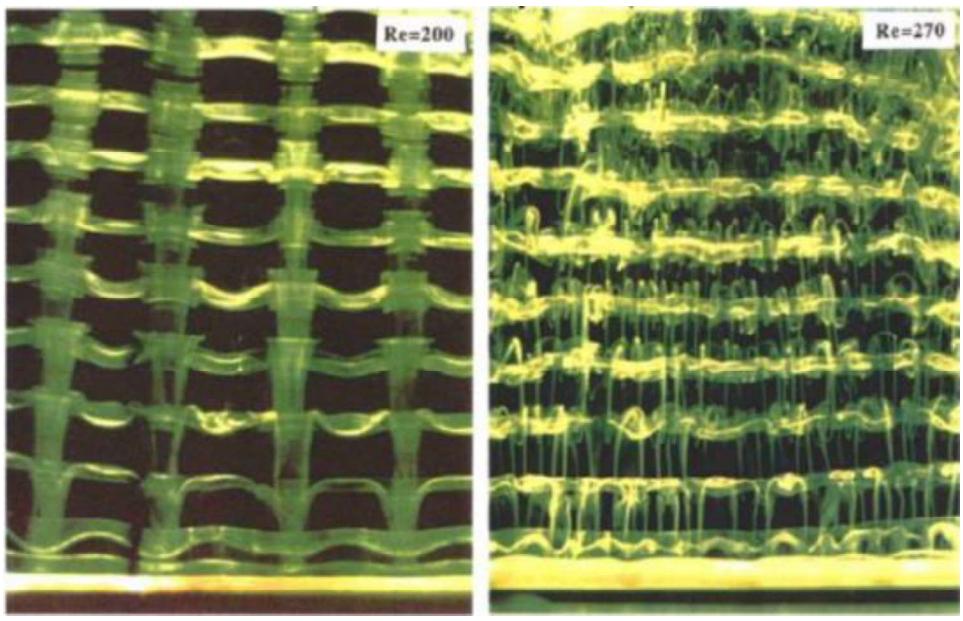
Figura 6 – Esteira para Reynolds = 105.



Fonte: VAN DYKE, 1982.

WILLIAMSON (1996) classifica laços de vórtices como Modo A, aqueles vórtices de grande escala que levam vorticidade da direção transversal (direção do eixo do cilindro) para a direção do escoamento. Com o número de Reynolds ligeiramente mais alto (aproximadamente 270), outras estruturas também alinhadas com a direção transversal do escoamento aparecem, porém mais próximas umas das outras, e ele as classifica como Modo B (Figura 7).

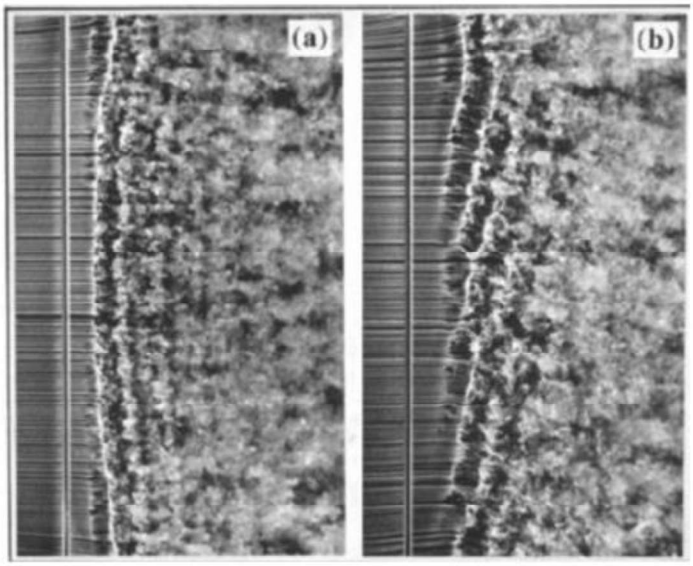
Figura 7 – Modos A (Reynolds=200) e B (Reynolds=270).




Fonte: WILLIAMSON, 1996.

A Figura 8 mostra exatamente como a tridimensionalidade da esteira é muito mais evidente em números de Reynolds mais elevados, fazendo com que não seja possível definir modos transversais ao escoamento, da mesma forma que ocorre com os escoamentos em baixos números de Reynolds.

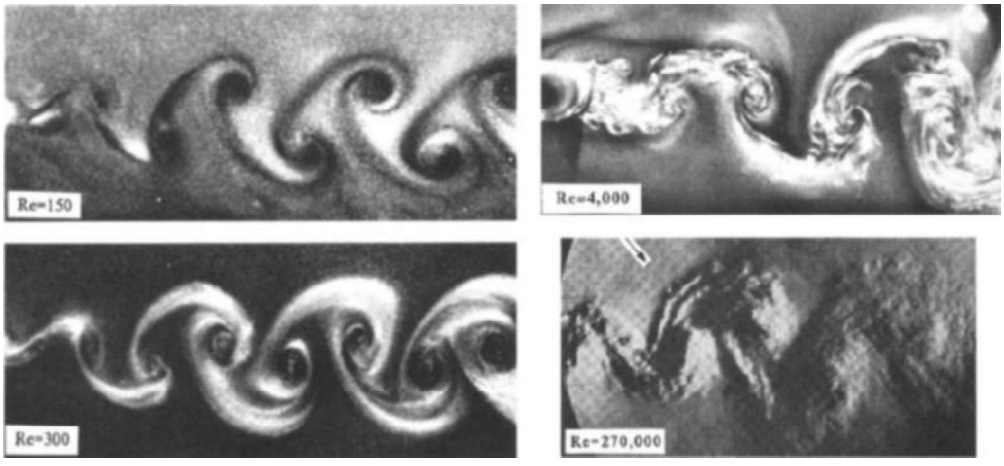
Figura 8 – Imagem de esteira com Reynolds=5000.




Fonte: WILLIAMSON, 1996.

O único padrão de vórtices que é comum a todas as faixas de Reynolds que possuem uma esteira estável é o chamado padrão 2S, do inglês “two-single”, e significa que a cada instante um vórtice proveniente de um lado do cilindro e com vorticidade contrária ao anterior é emitido, conforme Figura 9.

Figura 9 – Esteiras evidenciando o padrão 2S.

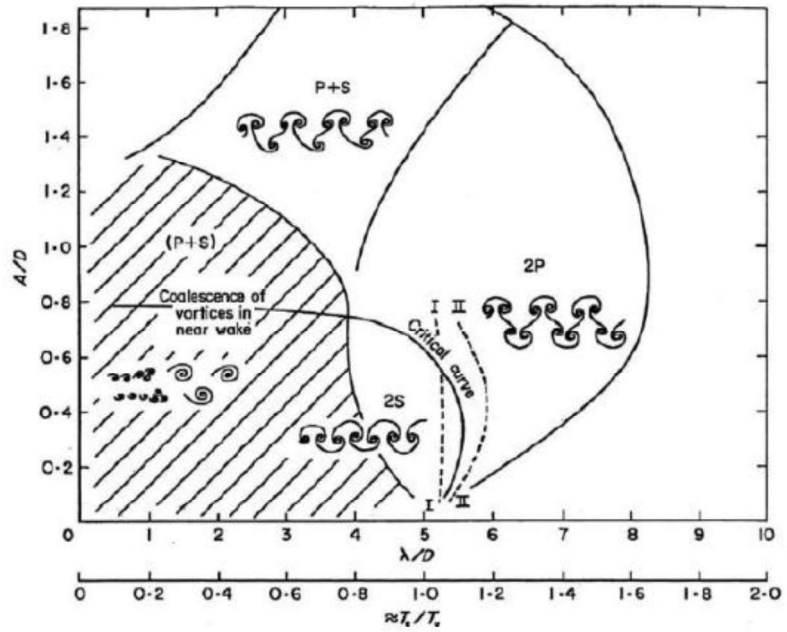



Fonte: WILLIAMSON, 1996.

*2.5.2 Esteira desenvolvida para cilindro oscilando*

WILLIAMSON e ROSKO (1988) mapearam os padrões de emissão de vórtices em função da amplitude e frequência de vibração do cilindro e resumiram grande parte do seu trabalho em um gráfico de amplitude por frequência, mostrando os padrões e as regiões em que elas ocorrem, conforme Figura 10.

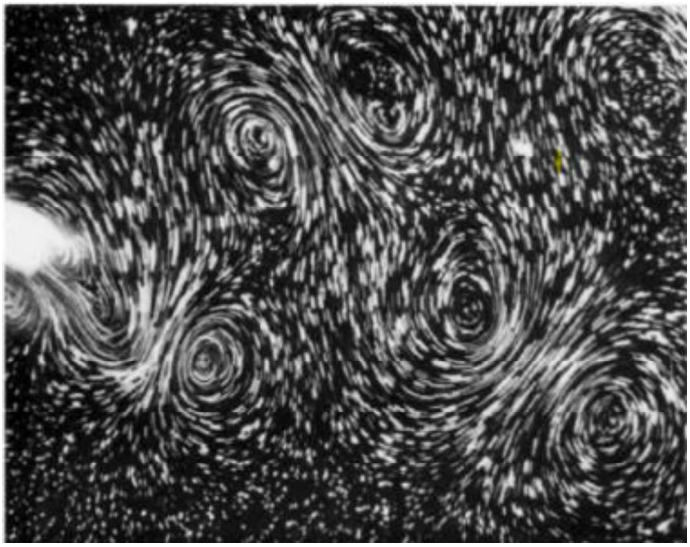
Figura 10 – Modos de emissão de vórtices.




Fonte: WILLIAMSON; ROSHKO, 1988.

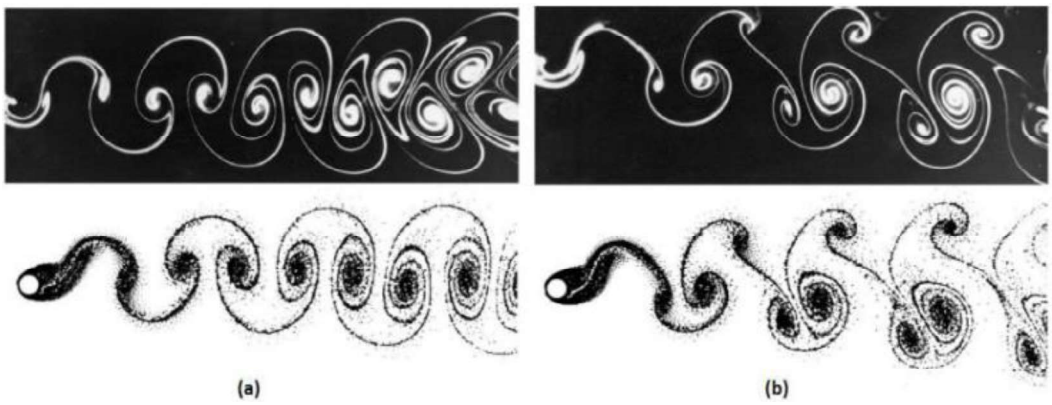
Diferente do modelo anterior, além do padrão 2S (“two-single”), tem-se ainda o padrão 2P (“two-pairs”) onde dois pares de vórtices são emitidos a cada ciclo e o modo P+S (“pair+single”) em que se alternam um par e um vórtice isolado por ciclo de emissão.

Figura 11 – Padrão 2P emitido de um cilindro com movimentação forçada.



Fonte: WILLIAMSON; GOVARDHAN, 2004.

Figura 12 – Imagens obtidas experimentalmente na parte superior e numericamente na parte inferior. Modo 2S na esquerda (a) e P+S na direita (b)




Fonte: WILLIAMSON; GOVARDHAN, 2004.

Na Figura 12, as imagens na parte superior foram obtidas experimentalmente por meio de visualização por partículas (PIV).

## 2.6 Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) consiste em um conjunto de ferramentas e técnicas usadas na análise de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e massa e fenômenos associados, como reações químicas, através de simulação numérica. Trata-se de uma técnica abrangente que pode ser aplicada a áreas industriais e acadêmicas,

como a análise aerodinâmica de espaçonaves e veículos, otimização de reatores e bombas, distribuição de poluentes e efluentes, combustão em motores e turbinas a gás e em engenharia biomédica para avaliação do fluxo sanguíneo em artérias e veias (VERSTEEG; MALALASKERA, 2007).

A CFD é um ramo da engenharia que emprega conceitos relacionados às disciplinas de fenômenos de transporte, matemática e tecnologia computacional. A primeira estuda os fluidos em movimento, como eles se comportam durante o escoamento e respondem a influências como reações químicas e transferência de calor. As características dos fluidos podem ser representadas por equações matemáticas fundamentais, geralmente na forma diferencial, chamadas equações governantes. A informática atua no âmbito de facilitar a resolução dessas equações através de linguagens computacionais de alto nível, convertendo as equações diferenciais em algébricas (TU et al., 2023).

TU et al (2023) apresentam algumas vantagens relacionadas ao uso de CFD:

- em alguns casos, no desenvolvimento teórico, muitos termos são desprezados para que a resolução das equações seja possível. No caso da utilização de algoritmos computacionais, é possível resolver as equações diferenciais completas, tornando a análise do escoamento mais próxima da realidade;

- o estudo de um certo sistema em diversas configurações é facilitado, o que implica em um menor custo quando comparado com experimentos laboratoriais;

- diversos valores para números adimensionais podem ser avaliados durante o trabalho, fornecendo mais flexibilidade e eficiência nas primeiras etapas do projeto de um sistema de escoamento;

- torna-se possível a obtenção de dados de regiões de difícil acesso para obtenção de resultados experimentais, tais como locais onde ocorreram acidentes nucleares ou locais remotos ou geofisicamente impossíveis de atingir.

Os códigos de CDF são estruturados em torno de algoritmos que tornam possível a resolução de um problema de escoamento. De modo a facilitar a interação com o usuário, os pacotes comerciais incluem interfaces sofisticadas, nas quais os parâmetros do problema são inseridos e os resultados para análise são mostrados.

As técnicas de CFD envolvem três principais etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento.

### *2.6.1 Pré-processamento*

A etapa de pré-processamento consiste na formulação do problema através de uma interface com o usuário e a subsequente transformação dos dados fornecidos inicialmente para um código reconhecido como *solver*. As principais etapas são (VERSTEEG; MALALASKERA, 2007).

- definição da geometria da região de interesse (domínio computacional);
- Geração de malha: A subdivisão do domínio computacional em partes menores, chamadas células, elementos ou volumes de controle, que pode variar conforme o método utilizado. Esse processo é conhecido como discretização do domínio.
- definição das propriedades dos fluidos e materiais envolvidos;
- seleção dos fenômenos físicos e químicos a serem modelados;
- especificação das condições de contorno.

O domínio computacional deve ser especificado cuidadosamente, pois exerce grande influência no escoamento. Após definido o domínio computacional, é necessário gerar a malha, que consiste em subdividir todo o domínio em células menores, de forma que a solução das variáveis de interesse (velocidade, pressão, temperatura, etc.) ocorra nos nós que existem entre as células.

O Método dos Elementos Finitos (FEM) e o Método dos Volumes Finitos (FVM) são técnicas numéricas amplamente utilizadas em simulações computacionais para resolver equações diferenciais parciais que governam problemas de engenharia e física. O FEM divide o domínio do problema em pequenos elementos finitos, como triângulos ou tetraedros, e utiliza funções de interpolação para aproximar as variáveis dentro de cada elemento, enquanto o FVM subdivide o domínio em volumes de controle e integra as equações sobre esses volumes, calculando

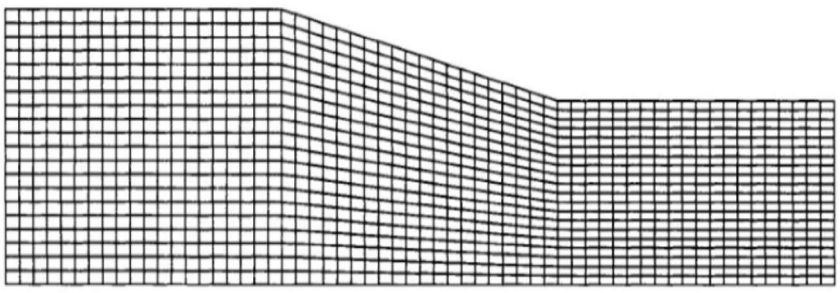
fluxos através das suas faces. A construção de malhas, que são conjuntos de elementos finitos ou volumes de controle, é essencial em ambas as técnicas, pois define a discretização do domínio e influencia diretamente a precisão e a eficiência das soluções numéricas. Uma malha bem projetada permite que tanto o FEM quanto o FVM capturem adequadamente as variações das soluções no domínio, proporcionando resultados mais precisos e confiáveis (VERSTEEG; MALALASKERA, 2007).

As Figuras 13 e 14 mostram exemplos de malhas utilizadas em simulações:

As malhas estruturadas ou regulares são constituídas por famílias de linhas de forma que os membros de uma mesma família não se cruzam entre si e se cruzam com membros de outra família apenas uma vez Figura 13 (FERZIGER; PERIC, 2002).

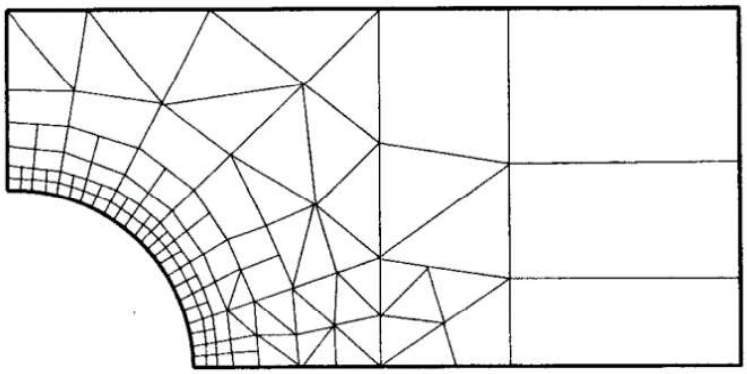
A malha não-estruturada, na maior parte dos casos, é composta por elementos triangulares e quadriláteros, em duas dimensões, ou tetraédricas e hexaédricas, em três dimensões, sendo empregada em geometrias mais complexas Figura 14. Ao contrário da malha estruturada, não há restrição para o número de vizinhos ou nós entre as células, sendo um tipo flexível que pode ser ajustado a qualquer geometria (FERZIGER; PERIC, 2002).

Figura 13 – Exemplo de malha estruturada.



Fonte: TU et al., 2023.

Figura 14 – Exemplo de malha não estruturada.



Fonte: FERZIGER; PERIC, 2002.

Depois de gerada a malha, é necessário definir as condições físicas do escoamento por meio da configuração de parâmetros no software de simulação. Primeiramente, deve-se especificar se o escoamento ocorrerá em regime transiente ou estacionário, indicando se o escoamento varia com o tempo ou permanece constante. Em seguida, define-se se o escoamento será laminar ou turbulento, o que pode ser determinado por meio do número de Reynolds ou de outras características do fluxo. A natureza do escoamento também pode ser classificável como compressível ou incompressível, dependendo se a densidade do fluido varia significativamente com a pressão. Finalmente, é necessário especificar se o fluido é viscoso ou não-viscoso, onde um fluido não-visoco é idealizado sem resistência ao escoamento e um fluido viscoso tem resistência ao escoamento. Essas definições são feitas no estágio de pré-processamento, geralmente configurando opções ou parâmetros específicos no software de simulação utilizado. A relevância da transferência de calor também deve ser avaliada, para definir sua influência no escoamento. As condições de contorno também são escolhidas na etapa de pré-processamento, na qual são fixados valores de pressão, temperatura ou velocidade, por exemplo, em regiões específicas do problema. Geralmente são definidas condições de entrada ou saída do domínio computacional e na superfície do sólido (TU et al., 2023).

### *2.6.2 Solução*

Os principais passos percorridos pelos códigos de CFD nesta etapa para a resolução de um problema são (VERSTEEG; MALALASKERA, 2007):

- integração das equações governantes do escoamento em todos os volumes de controle do domínio computacional;
- discretização, ou seja, conversão das equações integrais resultantes em um sistema de equações algébricas;
- solução do sistema de equações através de um método iterativo.

O sucesso de uma simulação em CFD depende, principalmente, da convergência do processo iterativo e do estudo de independência de malha. A convergência pode ser analisada seguindo os resíduos durante os cálculos da simulação numérica, sendo que o processo é considerado convergente quando os valores dos resíduos encontram-se abaixo de um critério de convergência ou tolerância, imposto pelo usuário. O estudo de independência de malha consiste em realizar inicialmente uma simulação em uma malha grosseira e então, progressivamente, refiná-la até que os resultados não apresentem mudanças em relação a variáveis locais e globais, indicando que a solução não depende da malha utilizada. Caso a convergência não seja atingida, é importante avaliar os parâmetros da solução ou modificar a malha (TU et al., 2023).

### *2.6.3 Pós-processamento*

A etapa de pós-processamento consiste em colocar na forma gráfica os resultados obtidos em vários pontos do domínio computacional. As ferramentas necessárias para a visualização gráfica dos dados geralmente estão incluídas nos pacotes de CFD, que podem ser comerciais, como ANSYS Fluent, ou abertos, como OpenFOAM. A solução pode ser representada por gráficos vetoriais, mapas de contorno, gráficos X-Y, gráficos de superfície bi e tridimensionais, representação em escala de cores e animações dinâmicas (VERSTEEG; MALALASKERA, 2007). A escolha da forma da representação mais apropriada depende do tipo de dados e da intenção do usuário.

## 2.7 Método de solução das equações de Navier-Stokes

Nek5000 resolve as equações de Navier-Stokes bidimensionais, axissimétricas ou tridimensionais incompressíveis instáveis com transferência de calor por convecção forçada ou natural em geometria estacionária (fixa) ou dependente do tempo (FISCHER, 2007).

As equações incompressíveis de Navier-Stokes (sem a equação da energia) são mostradas abaixo:

$$\nabla . \boldsymbol{u} = 0 \tag{5}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \boldsymbol{u}.\nabla \boldsymbol{u}\right) = -\nabla P + \nabla . \boldsymbol{\tau} + \rho \boldsymbol{g} \tag{6}$$

onde $\tau = \mu[\nabla \boldsymbol{u} + \nabla \boldsymbol{u}^T] + \lambda(\nabla . \boldsymbol{u})\boldsymbol{I}$.

No contexto deste trabalho, a simulação assume as propriedades da água a 20 ºC, correspondendo a uma densidade $\rho$ de 998 kg/$m^3$ e uma viscosidade dinâmica μ de 0,001 $Pa.s$. A simulação ignora o efeito da gravidade, uma vez que tem pouco efeito na solução.

Nas últimas décadas, na busca do desenvolvimento de esquemas numéricos eficientes, precisos e estáveis, surgiram três classes de técnicas de solução das equações incompressíveis de Navier-Stokes: as técnicas de diferenças finitas, os métodos de elementos finitos e as técnicas espectrais. Embora os métodos dos elementos finitos e os métodos espectrais estejam de fato relacionados, os praticantes dos dois métodos não exploram, em geral, esta semelhança. PATERA (1984) apresenta um método híbrido de elementos finitos e espectral que combina a generalidade do primeiro com a precisão do segundo em uma relação mais flexível do que a encontrada em qualquer uma das técnicas isoladamente.

PATERA (1984), propôs um método de elementos espectrais para solução numérica das equações incompressíveis de Navier-Stokes, que combina a generalidade do método dos elementos finitos com a precisão das técnicas espectrais. Na discretização de elementos espectrais, o domínio computacional é dividido em uma série de elementos, e a velocidade em cada elemento é representada como um interpolante Lagrangiano de alta ordem através de pontos de colocação de Chebyshev. A parte hiperbólica das equações governantes é então tratada com um esquema de colocação explícito, enquanto a pressão e as contribuições viscosas são tratadas implicitamente com um operador de projeção derivado de um princípio variacional.

PATERA (1984) demonstra a implementação da técnica em uma equação unidimensional de advecção-difusão de entrada-saída, e o método é então aplicado ao fluxo laminar bidimensional (separado) em uma expansão de canal.

Os métodos espectrais envolvem a expansão da solução para uma equação diferencial em uma expansão ortogonal de alta ordem, cujos coeficientes são determinados por uma técnica de projeção de resíduos ponderados. Os esquemas são precisos de ordem "infinita" se as funções de expansão forem escolhidas corretamente.

O procedimento de elementos finitos é, no sentido mais geral, uma técnica de resíduos ponderados aplicada a uma série de expansões, cada uma com suporte apenas em uma pequena região do espaço (um "elemento"). Quando a técnica dos resíduos ponderados é derivada diretamente de um princípio variacional associado, a continuidade das condições de contorno naturais é implicitamente satisfeita nos limites dos elementos como parte do processo de convergência.

A semelhança entre métodos de elementos finitos e métodos espectrais é, em alguns casos, exata. Por exemplo, no caso do operador Laplaciano, a aproximação variacional de elemento finito de um elemento (frequentemente utilizando o procedimento de Raleigh-Ritz) é exatamente equivalente no interior do domínio a uma aproximação espectral de Galerkin se as funções de base forem as mesmas. A principal atração das técnicas espectrais é a precisão; em geral, os problemas de fluxo complexos, que envolvem geometrias irregulares, não-linearidades e condições de contorno desafiadoras são em geral extremamente difíceis de implementar e resolver usando métodos espectrais. Já para o método dos elementos finitos, a principal atração é a generalidade; os elementos são escolhidos para serem no máximo quadráticos e, consequentemente, é difícil obter grande precisão.

Técnicas globais de decomposição de domínio foram introduzidas anteriormente na dinâmica de fluidos computacional, tanto em termos de expansões de elementos finitos de baixa ordem (a técnica de "decomposição de domínio") quanto de métodos espectrais (o "método espectral multidomínio"). Um "método de elemento global" também foi introduzido para equações elípticas, embora ainda não tenha sido implementado para equações de Navier-Stokes. A diferença entre essas técnicas e o atual método dos elementos espectrais está principalmente no tratamento das condições de continuidade nos limites dos elementos.

# 3 METODOLOGIA

O método empregado neste trabalho é o estudo da dinâmica dos fluidos computacional (CFD). As soluções numéricas das equações que governam o escoamento serão conduzidas em geometria bidimensional de um cilindro circular com movimento prescrito.

Uma das vantagens destes métodos é a grande quantidade de informação fornecida pela solução que podem ser utilizadas como ferramentas de projetos de engenharia, predição de condições críticas com o custo menor em relação a um estudo conduzido com experimentos. Os avanços dos recursos computacionais atuais permitem que o estudo seja conduzido de forma a obter um melhor entendimento da física do problema e de forma complementar a uma metodologia experimental.

A proposta neste trabalho é utilizar o software Nek5000, um código aberto, baseado em elementos espectrais (PATERA, 1984), para simular a dinâmica dos fluidos. Escolheu-se esse software pois ele é otimizado para resolver problemas com métodos espectrais de alta ordem, sendo especialmente eficaz em casos que demandam precisão elevada em geometrias simples, como escoamentos turbulentos em canais ou tubos. O Fluent e o OpenFOAM, embora versáteis, utilizam majoritariamente métodos de volume finito, que podem não alcançar a mesma precisão para problemas que exigem representações de alta ordem. Nek5000 suporta duas formulações para a discretização espacial e temporal das equações de Navier-Stokes. Em uma das formulações, que será empregado neste projeto, o domínio computacional consiste na união de elementos, cada um dos quais é mapeado parametricamente para se produzir uma malha do corpo e um conjunto dissociado de problemas elípticos para ser resolvido a cada iteração. O movimento do corpo será prescrito por uma função cossenoidal e será utilizado técnica de *moving mesh,* que consiste em ajustar dinamicamente a malha computacional para acompanhar o movimento do corpo.

A malha será gerada através do software Gmsh, um gerador de malha de elementos finitos tridimensionais de código aberto, com um mecanismo CAD embutido e pós-processador. O software funciona em torno de quatro módulos: geometria, malha, solucionador e pós-processamento. Cada módulo pode ser controlado interativamente usando a chamada GUI (interface gráfica do usuário), ou linguagem de script. As malhas geradas podem ser estruturadas ou não estruturadas. A malha estruturada refere-se a uma malha na qual os

elementos têm igual número de elementos vizinhos. Geralmente, é implementada pelo método das diferenças finitas e apresenta-se conveniente para geometrias simples, além de requerer um gasto computacional aceitável. Na malha não estruturada, não necessariamente cada elemento apresenta igual número de elementos vizinhos e geralmente é implantada pelo método dos elementos finitos. Apresenta vantagens como flexibilidade para contornos irregulares de geometrias complexas, mas sua solução requer um gasto computacional maior em comparação com o da malha estruturada.

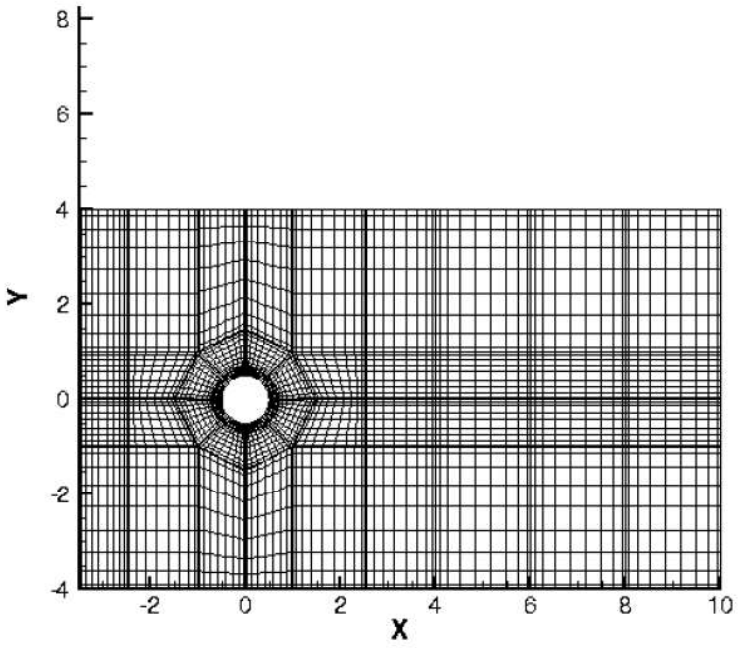
A representação comum de problemas de VIV baseiam-se na hipótese de um cilindro rígido, livre para vibrar na direção normal do escoamento, sujeito às forças hidrodinâmicas nesta direção. Neste trabalho, apenas o graus de liberdade de translação na direção normal ao escoamento será resolvido, permanecendo fixos os outros movimentos.

Para simular o movimento do cilindro, a malha é que de fato irá se mover. Para isso, pode-se usar a Formulação Lagrangeana-Euleriana arbitrária. O ponto fundamental desta formulação é que a velocidade da malha corresponda à velocidade do fluido nos limites do domínio (mais precisamente, que seu componente normal) e que a velocidade da malha seja o mais suave possível em todo o domínio. Assim, a determinação da velocidade da malha requer apenas encontrar um interpolante suave que se misture entre quaisquer duas partes do limite do domínio. Nesse sentido, existem dois casos: um que usa um solucionador de elasticidade linear para calcular a velocidade da malha em cada timestep e outro, que busca gerar uma função de interpolação. Esse último caso tem demonstrado ser mais rápido e robusto porque não há necessidade de resolver a velocidade da malha em cada timestep.

## 3.1 Geração da geometria e malha

Inicialmente, na etapa de pré-processamento, considerou-se utilizar uma malha estruturada para diminuir os custos computacionais. A Figura 15 mostra a malha gerada e o domínio computacional do problema.

Figura 15 – Malha e geometria computacional usando 1004 elementos 10x10 e polinômio interpolador de grau 10.




Fonte: Autor.

Nota-se que nas regiões mais próximas ao cilindro, que a malha é mais refinada, isto é, existem mais elementos próximos à essa região. Isso ocorre porque nessa região tem-se os efeitos da camada limite, que pode ter uma espessura muito pequena. A malha também é mais bem elaborada nas regiões à montante e à jusante do cilindro, para que os vórtices da esteira de Vón Karman (região à jusante onde os vórtices são desprendidos) sejam capturados com melhor precisão. Na direção normal ao escoamento (paralelo ao eixo y) a malha também é mais bem elaborada, pois é nessa direção que o cilindro irá oscilar.

As etapas para elaboração da malha até o seu uso no Nek5000 serão descritas a seguir:

### *3.1.1 Geração da malha no Gmsh*

- Desenho da geometria do domínio de interesse.
- Definição dos parâmetros de malha, como densidade de elementos, refinamentos locais, etc.
- Geração da malha usando as opções disponíveis no Gmsh.
- Salvar malha em um formato .msh

### *3.1.2 Preparação da malha para o Nek5000*

- Após gerar a malha no Gmsh, é necessário converter o arquivo de malha (.msh) para um formato compatível com o Nek5000, como o formato Exodus (.exo).
- É possível fazer isso usando ferramentas de conversão disponíveis, como o utilitário gmsh2nekmesh que faz parte do Nek5000.

### *3.1.3 Configurar o Nek5000 para usar a malha*

- Uma vez que a malha foi convertida em um formato compatível com o Nek5000, configura-se então o Nek5000 para usar essa malha.
- Isso geralmente envolve fornecer informações sobre a malha, que são as seguintes:
    - Número de elementos: Especifica-se o número total de elementos na malha. Isso geralmente é feito dividindo o domínio em uma grade de elementos. Foram usados 1004 elementos.
    - Ordem dos elementos: A ordem dos elementos refere-se à ordem dos polinômios usados na expansão das funções de interpolação dentro de cada elemento da malha. Por exemplo, uma ordem 1 representa polinômios de primeira ordem (lineares), ordem 2 representa polinômios de segunda ordem (quadráticos) e assim por diante. Foi utilizado um polinômio interpolador de grau 10.
    - Coordenadas nodais: Definem a posição dos nós que compõem os elementos da malha.
    - Conectividade dos elementos: A conectividade dos elementos especifica quais nós estão conectados para formar cada elemento finito na malha. Por exemplo, em um elemento tetraédrico, quatro nós estão conectados para formar uma pirâmide triangular.

- Condições de contorno: Durante a simulação, a conectividade dos elementos é usada em várias operações computacionais, incluindo a aplicação de condições de contorno. A conectividade dos elementos é usada para identificar os nós que estão localizados nas fronteiras do domínio de simulação, onde são aplicadas as condições de contorno especificadas.

- Parâmetros de movimentação da malha: Especificam o tipo de movimento que a malha pode experimentar durante a simulação, como movimento rígido, deformação elástica, movimento por rotação, etc. Define ainda a função que descreve o comportamento do movimento da malha ao longo do tempo, bem como condições de fronteira, parâmetros de amortecimento e algoritmos de atualização da malha.

Com a malha devidamente configurada no Nek5000, é possível prosseguir com a execução da simulação. Isso geralmente envolve fornecer outras informações necessárias, como condições de contorno, propriedades dos materiais, parâmetros de simulação, etc., no arquivo de entrada do Nek5000.

Uma configuração completa de uma simulação no Nek5000 requer um conjunto de arquivos que são usados para definir a geometria e a física do problema. Detalhes sobre como configurar um caso no Nek5000 são descritos nas seções a seguir:

## 3.2 Condições de contorno

### *3.2.1 Velocidade do Fluido*

A velocidade do fluido na entrada (INFLOW) do domínio será a mesma na saída (OUTFLOW) do domínio e estará implícita através do número de Reynolds. As condições de INFLOW e OUTFLOW são baseadas na suposição de que o escoamento na entrada e na saída é unidirecional e que a velocidade do escoamento está bem definida.

Foi aplicada a condição de contorno WALL (parede), usada para modelar a interação entre o fluido e uma parede sólida (no caso da presente simulação, o cilindro). A condição WALL impõe que o perfil de velocidade tangencial na parede seja nulo.

### *3.2.2 Temperatura e Escalares Passivos*

Essa condição de contorno é usada para simular a transferência de calor em um fluido onde a temperatura é uma variável importante e os escalares passivos podem representar substâncias que não afetam a dinâmica do fluxo, mas podem interagir termicamente. Como este caso não se aplica a este estudo, essa condição de contorno não será utilizada.

### *3.2.3 Condições de Contorno Internas*

Essa condição de contorno é essencial para modelar corretamente problemas que envolvem geometrias complexas, para um sistema multi-fluido e para a análise de transferência de calor com mudança de fase, ou condições variáveis dentro do domínio de simulação computacional. São necessárias condições especiais em determinadas fronteiras internas. As interfaces internas são geralmente configuradas para garantir a continuidade ou a troca apropriada das variáveis do fluxo através de regiões distintas dentro do domínio de simulação.

## 3.3 Definição dos parâmetros

Os valores dos parâmetros foram definidos para atender aos objetivos do trabalho e são encontrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Definição dos parâmetros de simulação

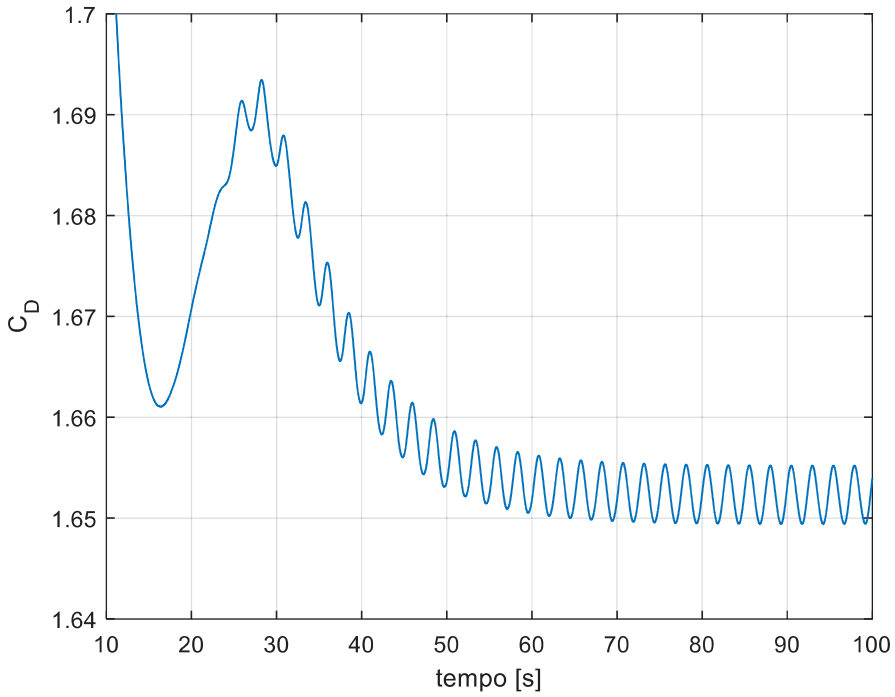
| **Parâmetro** | **Valor(es)** | **Descrição** |
|---|---|---|
| DENSITY | 1.0 | Densidade adimensional |
| Re | 100, 150, 200, 250, 300 | Número de Reynolds |
| RHOCP | 1.0 | Produto da densidade e capacidade térmica |
| CONDUCT | 1.0 | Condutividade térmica |
| FINTIME | 0.0 | Tempo final de simulação |
| NSTEPS | $4.0\text{x}10^{4}$ | Número total de passos de tempo (*time step*) |
| DT | $0.2\text{x}10^{-2}$ | Tempo de execução para cada passo de tempo |
| IOCOMM | 0.0 | Gerencia entrada, saída e comunicação paralela |
| IOTIME | 1.0 | Mede o tempo gasto em operações de entrada e saída |
| IOSTEP | 200 | Frequência de gravação de dados durante a simulação |
| GRID | 0.05 | Tamanho ou resolução da malha de simulação. |
| INTYPE | -1.0 | Especifica o formato de dados para entrada na simulação no Nek5000. |
| DIVERGENCE | $1.0\text{x}10^{-5}$ | Divergência do campo de velocidades |
| HELMHOLTZ | $1.0\text{x}10^{-6}$ | Controla a solução da equação de Helmholtz, usada em problemas de difusão e ondas |
| NPASCAL | 0.0 | Define que a pressão será expressa em pascals |
| TOLREL | $1.0\text{x}10^{-2}$ | Tolerância relativa para a convergência dos solvers |
| TOLABS | 0.1 | Tolerância absoluta para a convergência dos solvers |
| COURANT/NTAU | 0.5 | Relação entre o número de Courant e os passos de tempo |
| TORDER: mesh velocity | 2.0 | Define a ordem do esquema temporal usado na simulação |
| Frequency of oscillation | 0.1 a 0.6 | Frequência de oscilação do cilindro |
| Amplitude of oscillation | 0.3 a 0.5 | Amplitude de oscilação do cilindro |
| Dealising | 3.0 | Previne erros numéricos de termos não lineares, melhorando a precisão das simulações. |

Fonte: Autor.

## 4 RESULTADOS

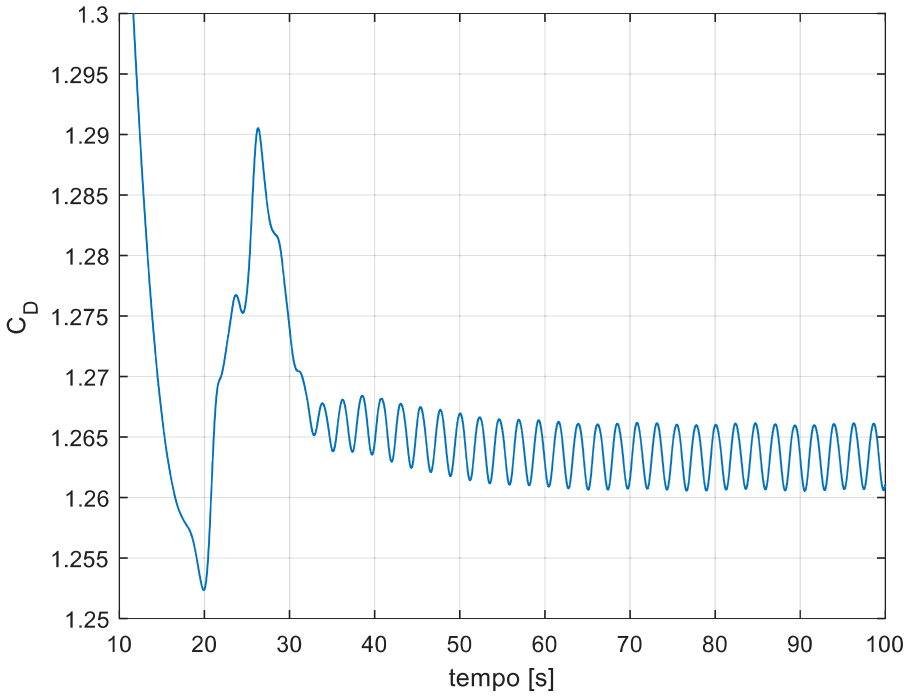
Os resultados para coeficiente de arrasto variando de Reynolds 100 a 500 são mostrados a seguir.

Figura 16 – Coeficiente de arrasto para Re=100



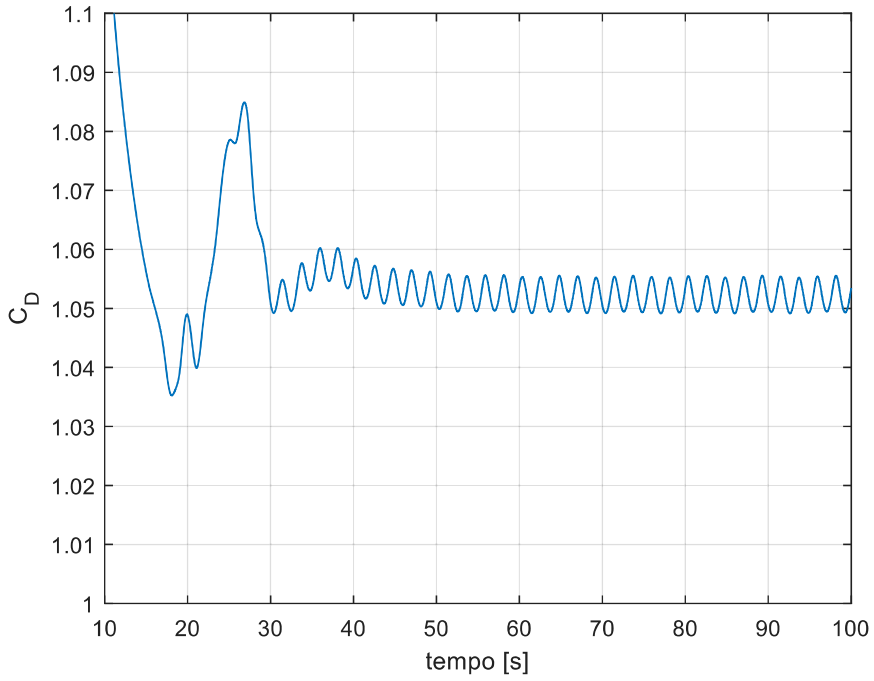

Fonte: Autor.

Figura 17 – Coeficiente de arrasto para Re=150



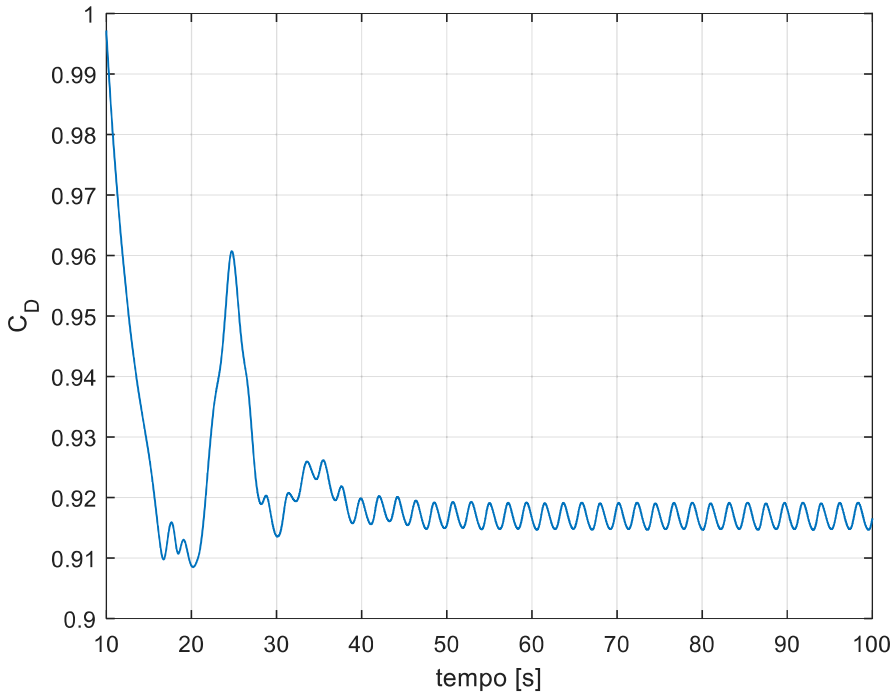

Fonte: Autor.

Figura 18 – Coeficiente de arrasto para Re=200



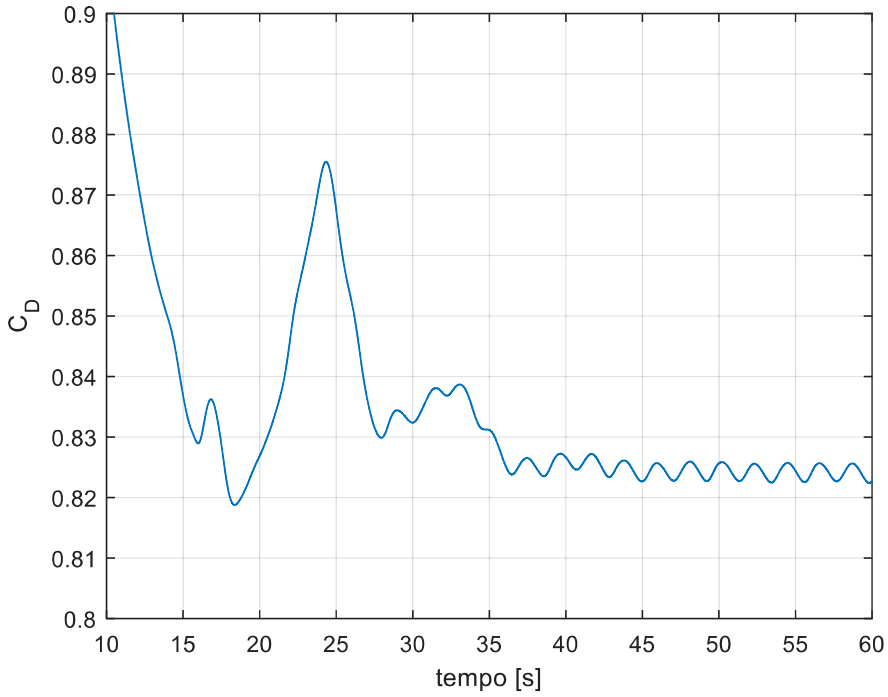

Fonte: Autor

Figura 19 – Coeficiente de arrasto para Re=250




Fonte: Autor

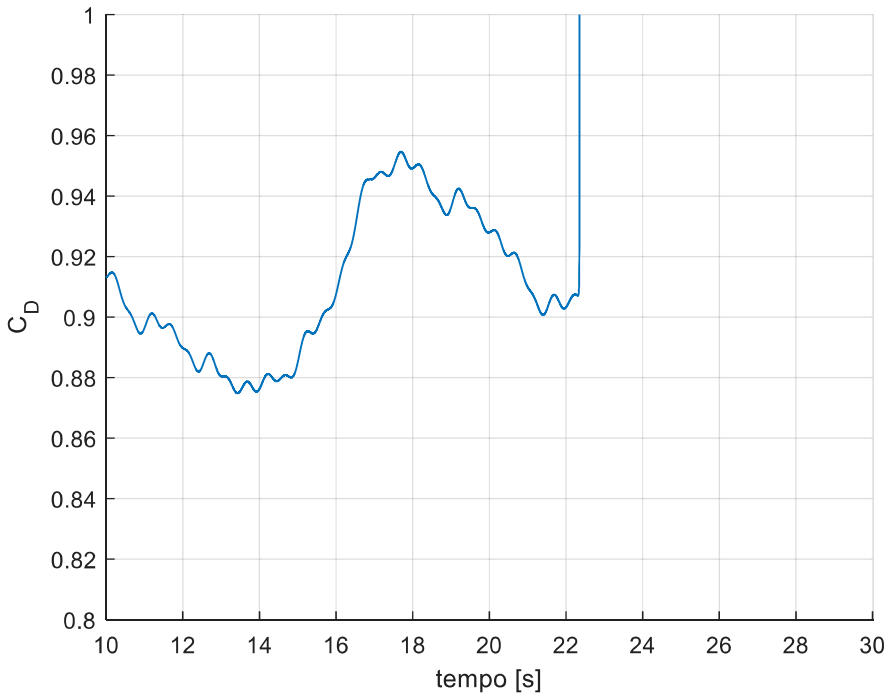
Figura 20 – Coeficiente de arrasto para Re=300




Fonte: Autor

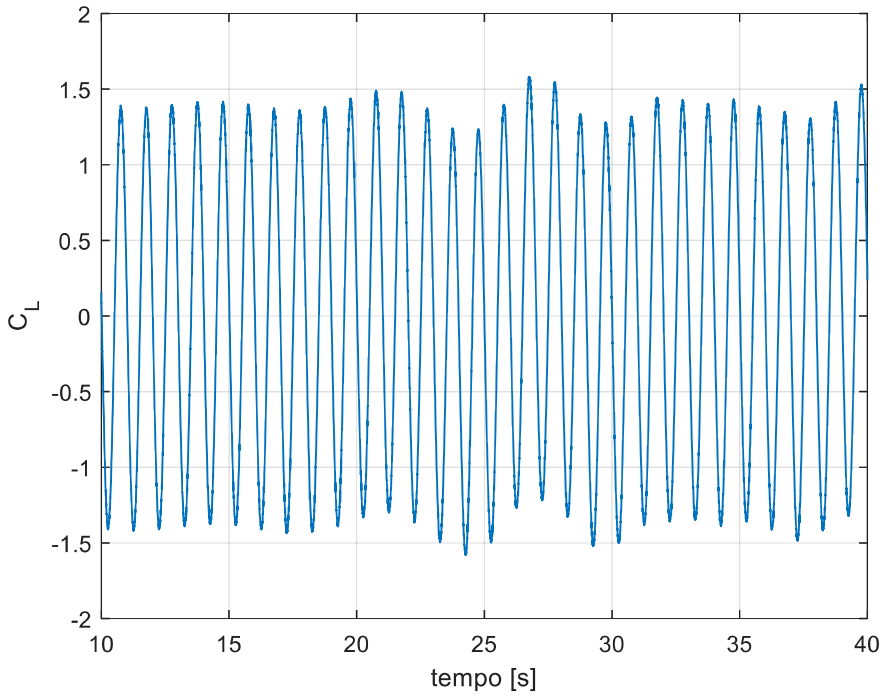
A Figura 21 mostra o comportamento do coeficiente de sustentação para Re=300 e amplitude e frequência adimensionais iguais a 0.3 e 0.2 respectivamente. Em aproximadamente 22 segundos de simulação, o coeficiente não varia mais com o tempo. Uma hipótese para esse comportamento é que a esteira pode estar entrando em ressonância com o cilindro, um fenômeno conhecido com *lock-in*. Essa hipótese se baseia na correspondência entre a frequência natural do sistema e a frequência do desprendimento de vórtices na esteira .O mesmo fenômeno ocorre com o coeficiente de sustentação nas mesmas condições.

Figura 21 – Coeficiente de arrasto para Re=300 e A=0.3



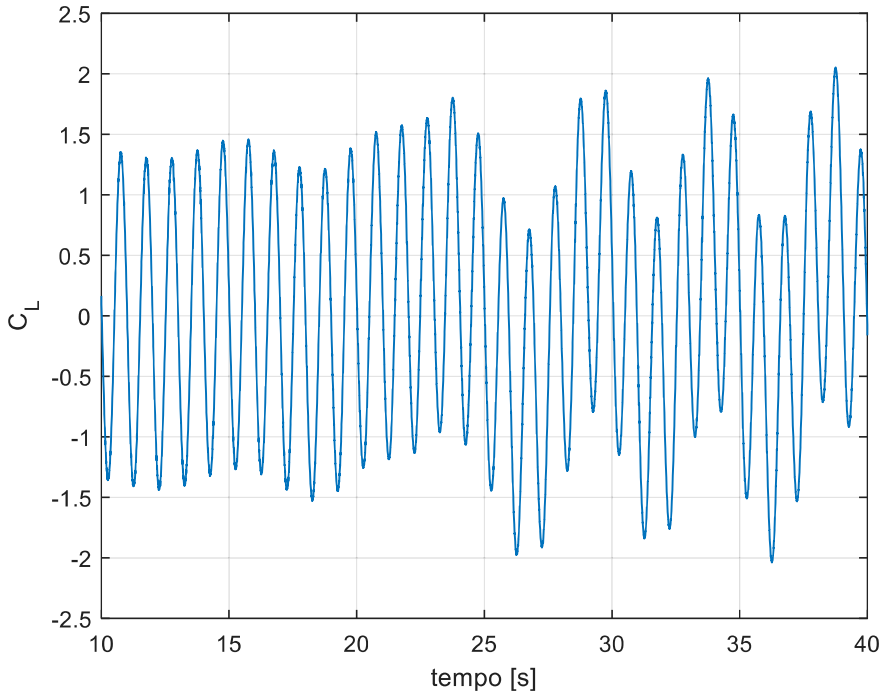

Fonte: Autor

Figura 22 – Coeficiente de sustentação para Re=100



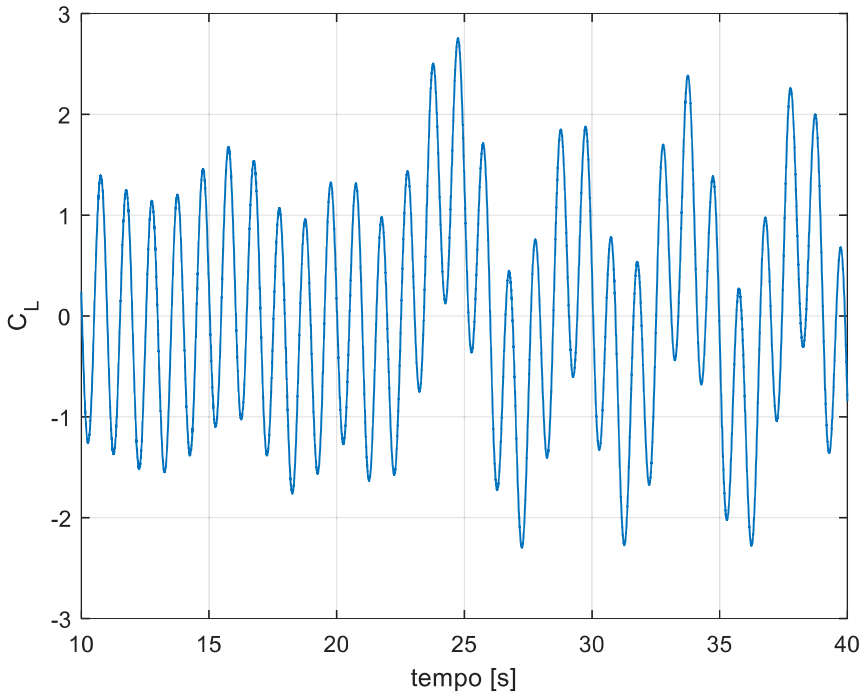

Fonte: Autor

Figura 23 – Coeficiente de sustentação para Re=150



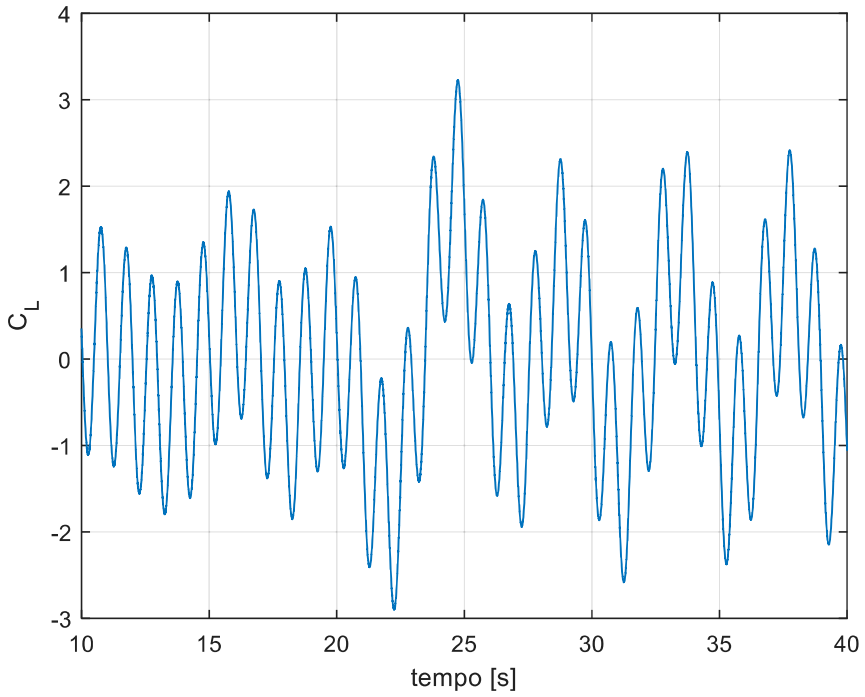

Fonte: Autor

Figura 24 – Coeficiente de sustentação para Re=200



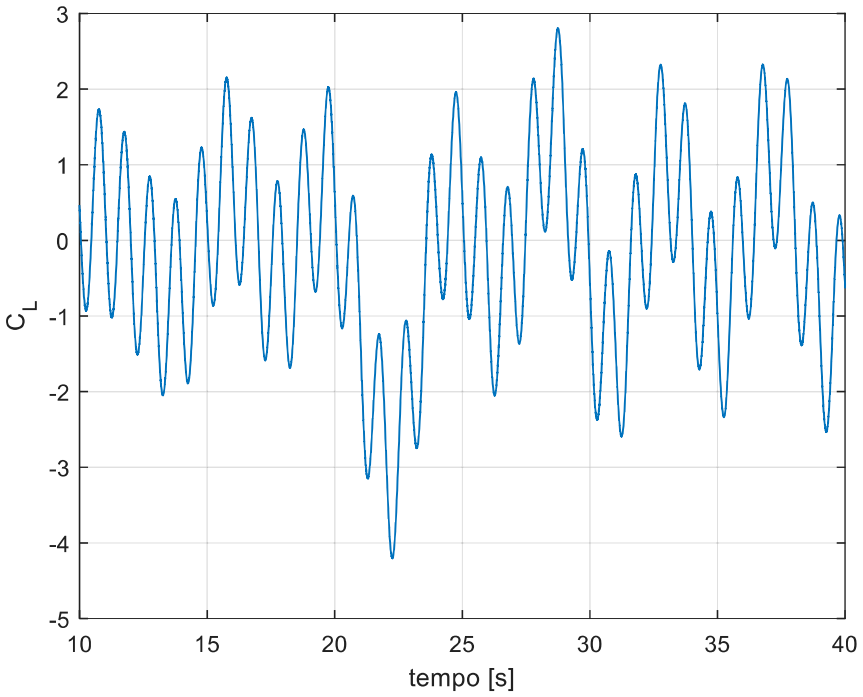

Fonte: Autor

Figura 25 – Coeficiente de sustentação para Re=250




Fonte: Autor

Figura 26 – Coeficiente de sustentação para Re=300




Fonte: Autor

O valor RMS (Root Mean Square), ou valor quadrático médio de um conjunto de dados é calculado pela eq. (7):

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} \tag{7}$$

Onde $x$ é o elemento na $i-$ésima posição do conjunto de dados e $n$ é o número total de elementos. Isso significa que $i$ varia de 1 até $n$.

A Tabela 2 mostra os valores RMS dos coeficientes de sustentação e arrasto. Para cada número de Reynolds, utilizando a eq. (7), extraindo apenas os dados dos gráficos onde os coeficientes se estabilizam em torno de um valor específico, utilizando uma fórmula no Microsoft Excel: =RAIZ(SOMAQUAD(A:A)/CONT.VALORES(A:A)).

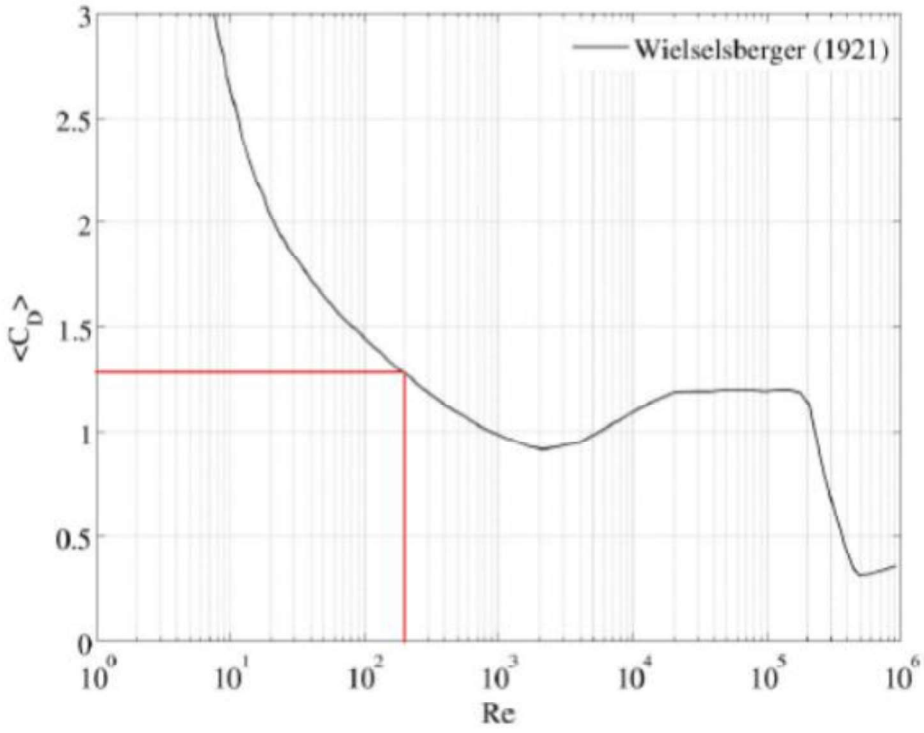
Tabela 2 - $C_{D,rms}$ e $C_{L,rms}$ de acordo com o número de Reynolds

| **Reynolds** | $C_{D,rms}$ | $C_{L,rms}$ |
|---|---|---|
| 100 | 1.65 | 0.13 |
| 150 | 1.26 | 0.19 |
| 200 | 1.05 | 0.26 |
| 250 | 0.91 | 0.33 |
| 300 | 0.82 | 0.42 |

Fonte: Autor.

A seguir temos uma comparação do coeficiente de arrasto com o arrasto experimental obtido por Wielselsberger (1921) destacando-se Reynolds igual a 200 e percebe-se que os resultados da simulação estão coerentes.

Figura 27 – Coeficiente de arrasto experimental.




Fonte: Wielselsberger (1921)

Em seguida, tem-se uma comparação com o trabalho de Chen (2022), que realizou experimentos com diferentes níveis de rugosidade do cilindro ($K_S/D$). Em relação ao nível de rugosidade ($K_S/D$), ele não foi especificamente configurado na simulação, pois o Nek5000 não inclui variações de rugosidade como parâmetro explícito. O coeficiente de arrasto se aproxima mais das simulações, porém o coeficiente de sustentação se está fora do range da simulação para os três primeiros níveis de rugosidade. No entanto, nesse trabalho, como são resultados experimentais, pode haver diversas outras particularidades para explicar a diferença, a exemplo de imprecisões nos instrumentos de medição, pequenas flutuações no escoamento durante os experimentos ou mesmo imperfeições na superfície do cilindro que afetam os coeficientes de arrasto e sustentação. Apesar dessas diferenças, os resultados não são discrepantes e considera-se aceitável, com base no fato de que os coeficientes de arrasto e sustentação permanecem dentro de uma faixa próxima à esperada na literatura.

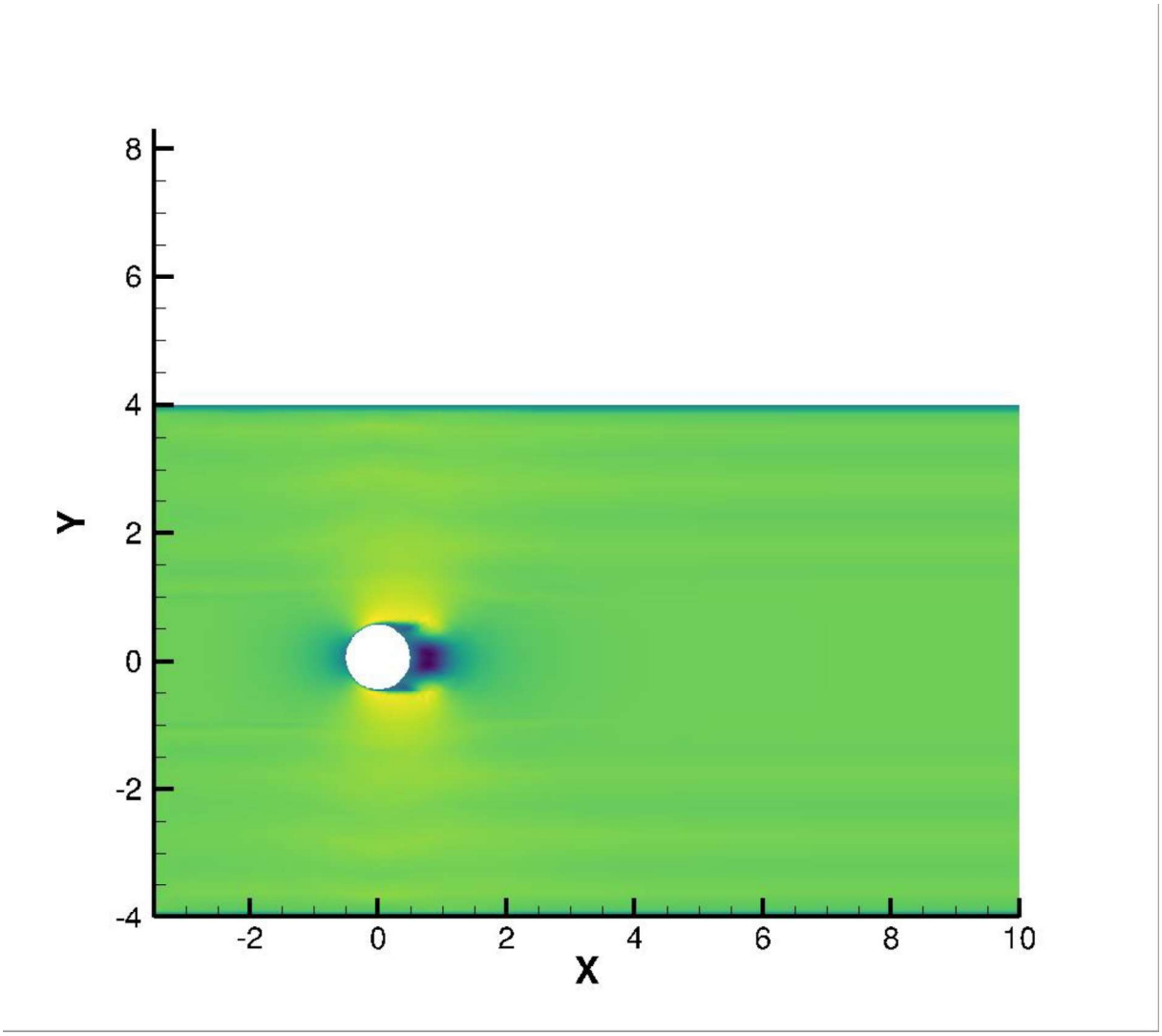
Tabela 3 – Resultados experimentais para diferentes níveis de rugosidade do cilindro

| $(K_s/D)$ | $C_{D,rms}$ | $C_{L,rms}$ |
|---|---|---|
| 0 | 1.066 | 0.608 |
| $2.5\text{x}10^{-3}$ | 1.010 | 0.561 |
| $5.0\text{x}10^{-3}$ | 0.956 | 0.510 |
| $7.5\text{x}10^{-3}$ | 0.822 | 0.430 |
| $10\text{x}10^{-3}$ | 0.779 | 0.351 |

Fonte: Chen (2022)

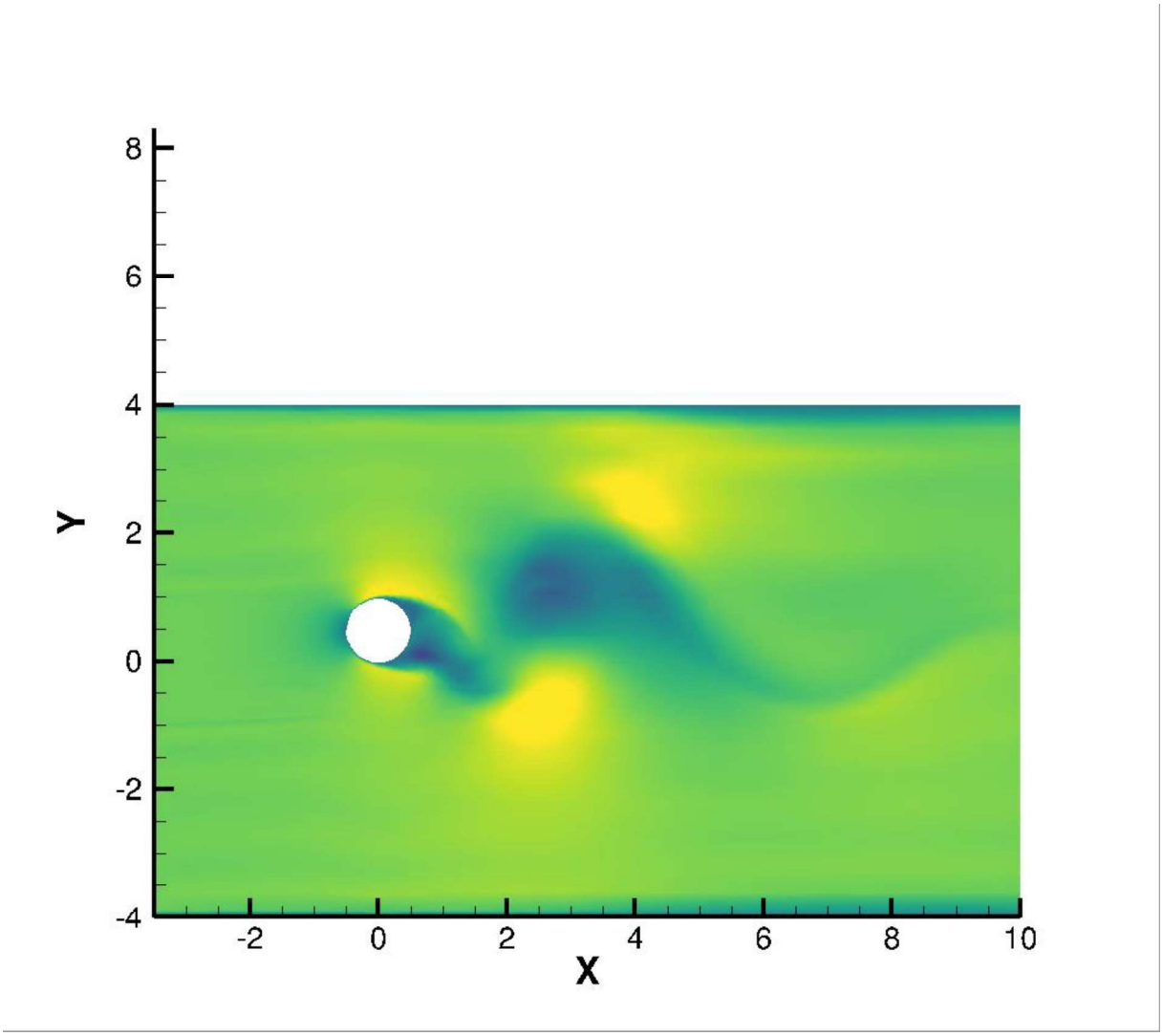
A partir da Figura 28 até a Figura 35 tem-se a evolução temporal do campo de velocidade $\boldsymbol{U_x}$ para diferentes time steps. As regiões na cor verde indicam que escoamento não está sendo afetado pela presença do cilindro. Observa-se na Figura 28 que nas regiões próxima à parede do cilindro que o escoamento já começa a ser afetado (região na cor amarela). A cor azul indica $\boldsymbol{U_x} = 0$, evidenciando o descolamento da camada limite. Na Figura 29 até a Figura 35 é possível perceber o desprendimento de vórtices, sendo que as regiões em amarelo indicam maior vorticidade.

Figura 28 – Campo de velocidade para time step=1000.



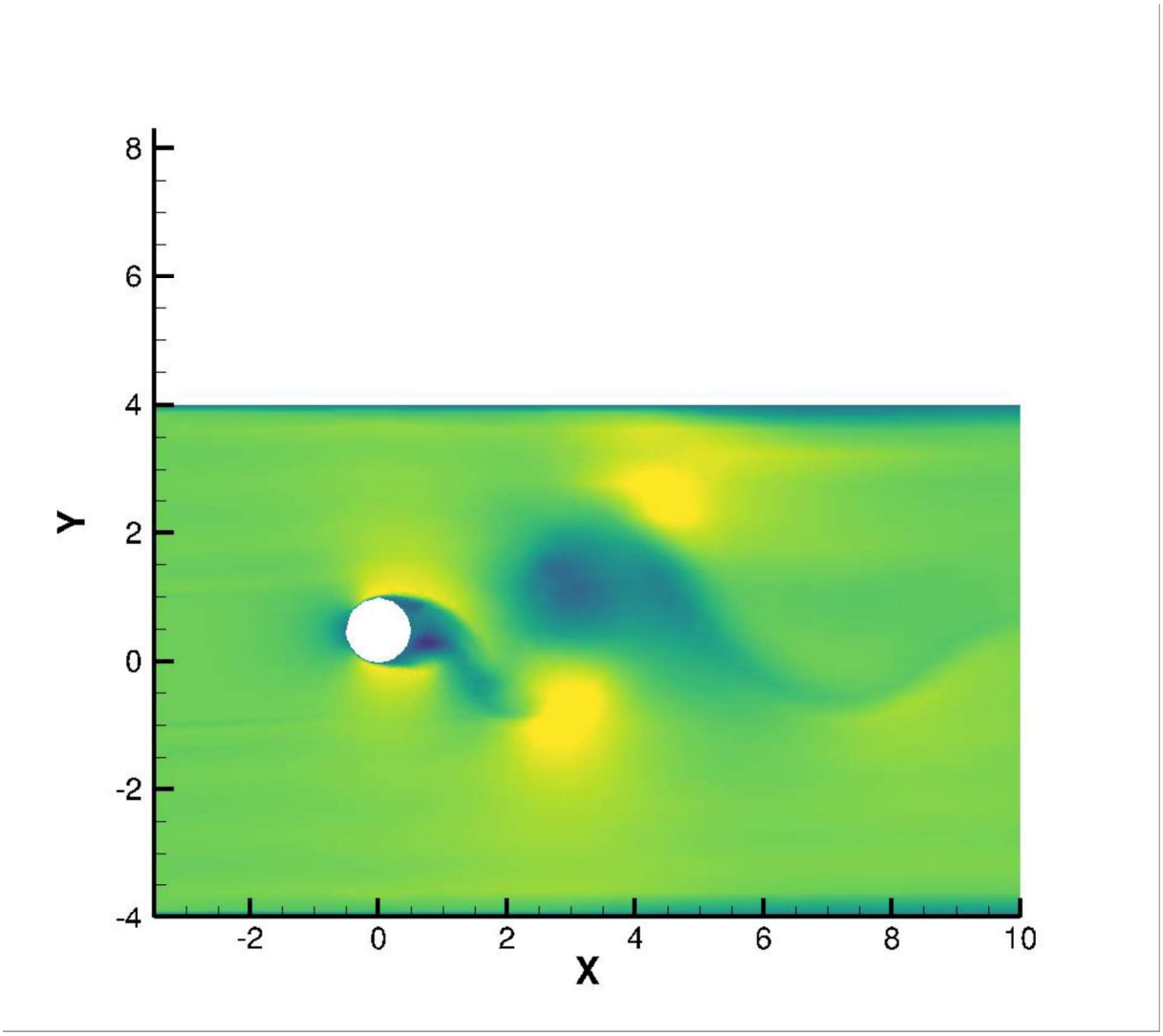

Fonte: Autor.

Figura 29 – Campo de velocidade para time step=10000.



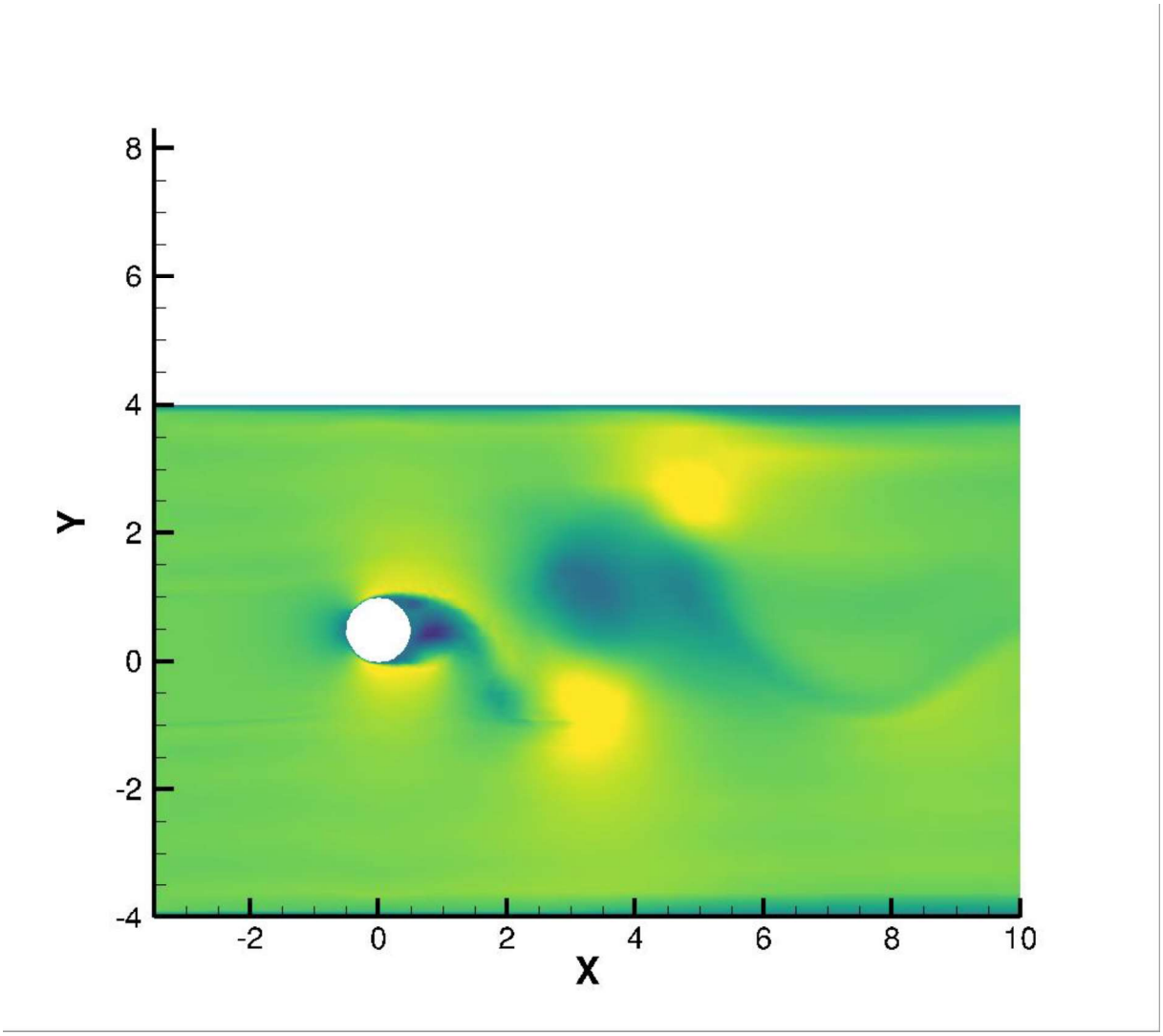

Fonte : Autor

Figura 30 – Campo de velocidade para time step=10200.



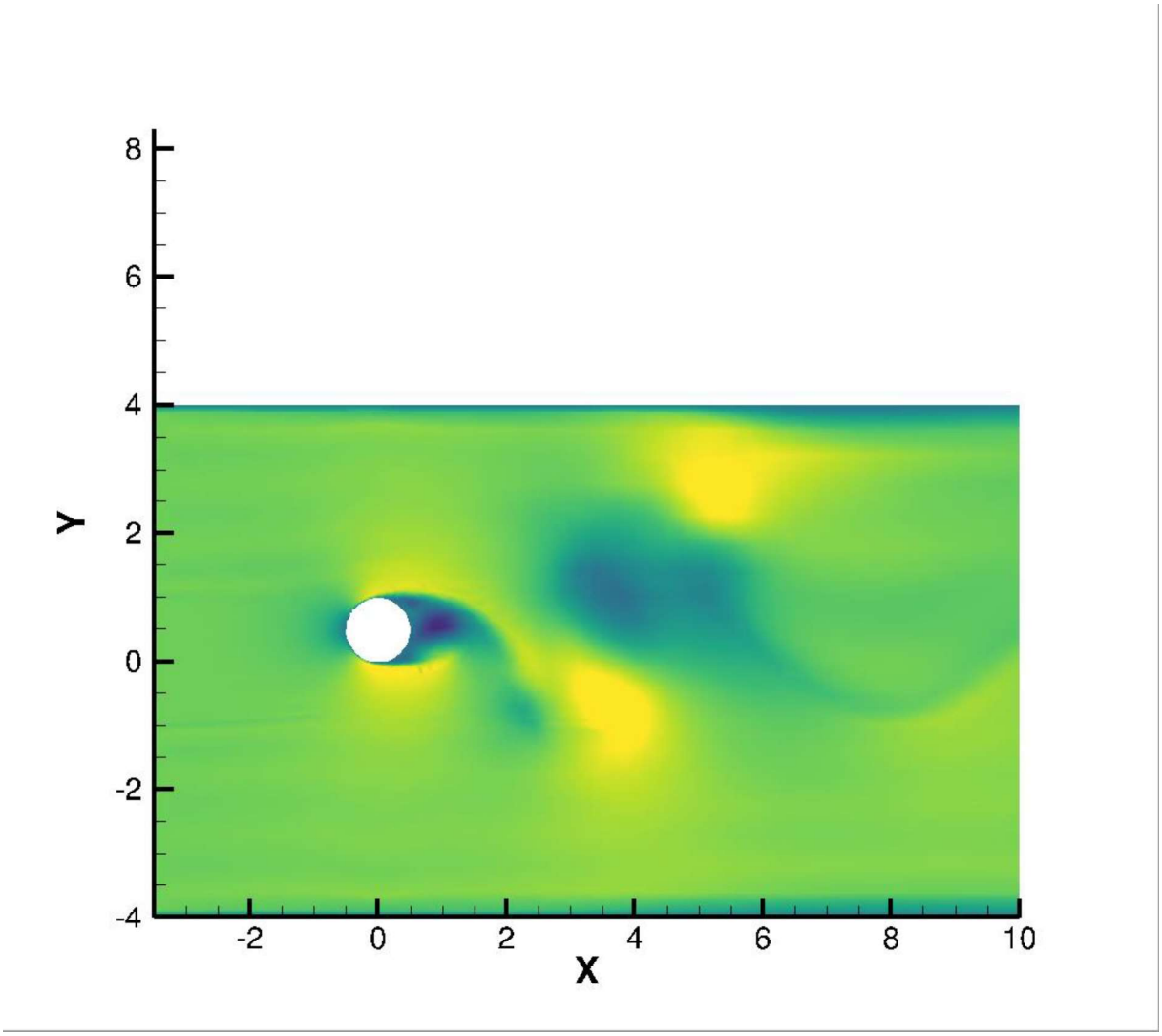

Fonte: Autor.

Figura 31 – Campo de velocidade para time step=10400.



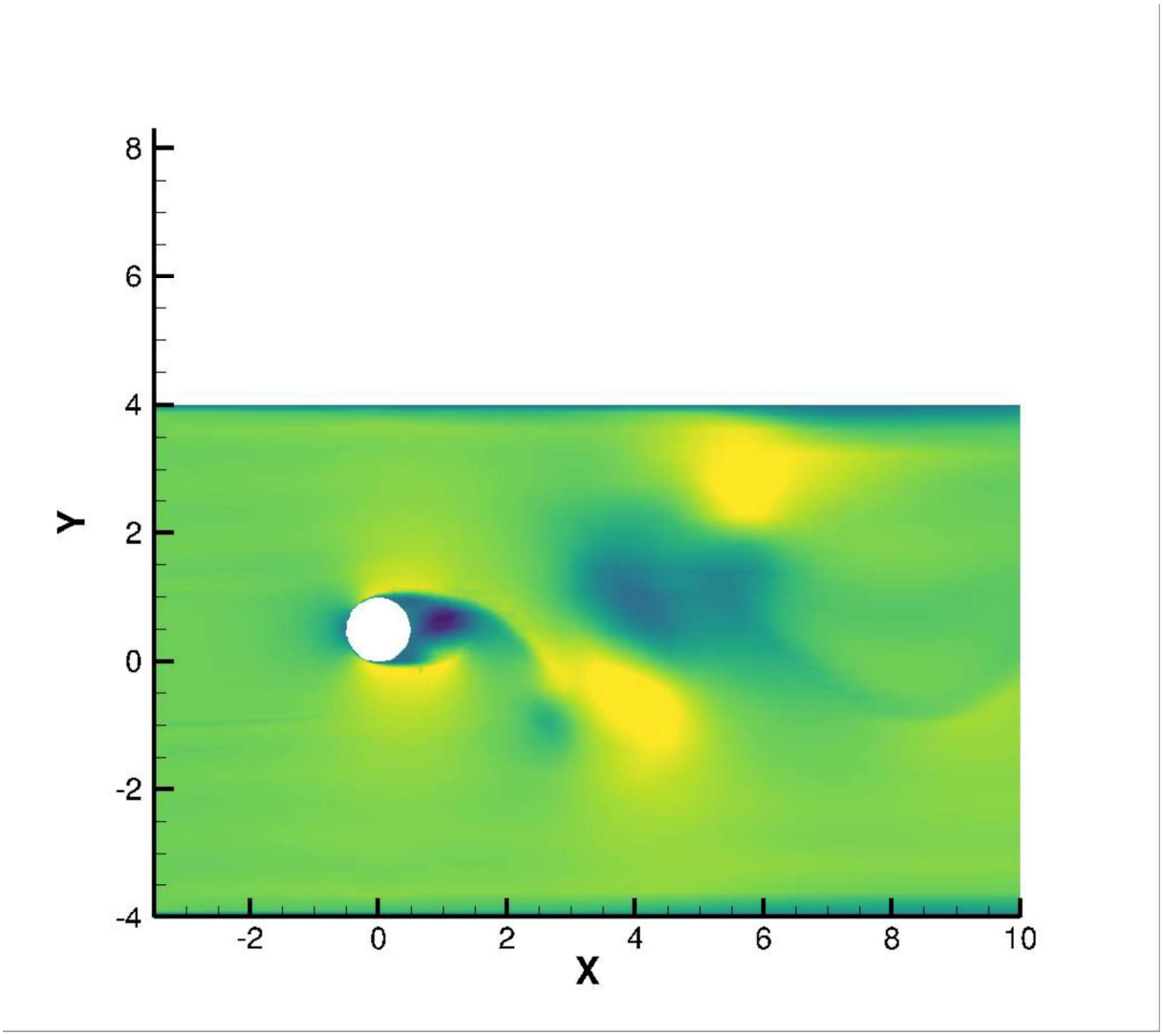

Fonte: Autor.

Figura 32 – Campo de velocidade para time step=10600



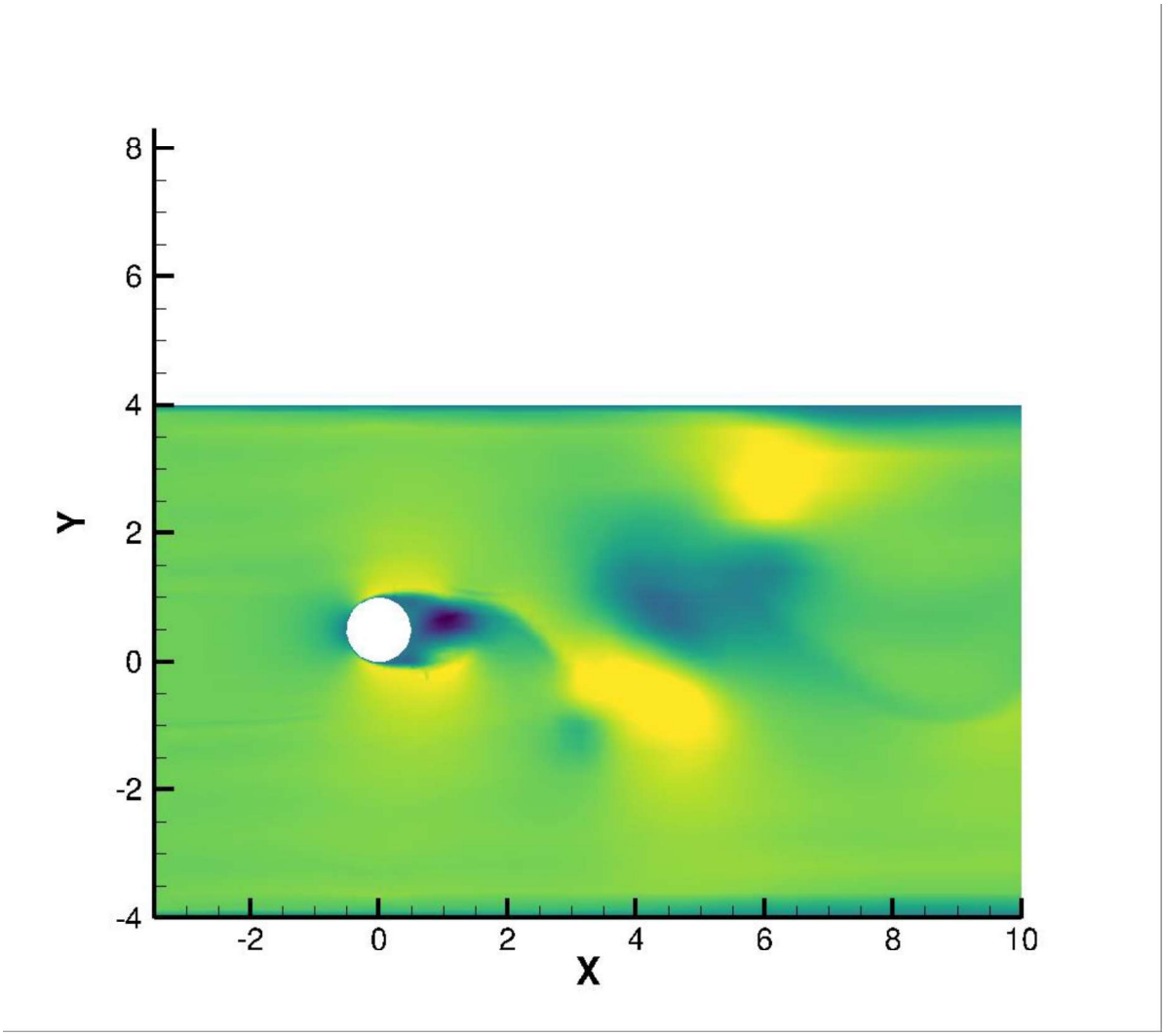

Fonte:Autor.

Figura 33 – Campo de velocidade para time step=10800



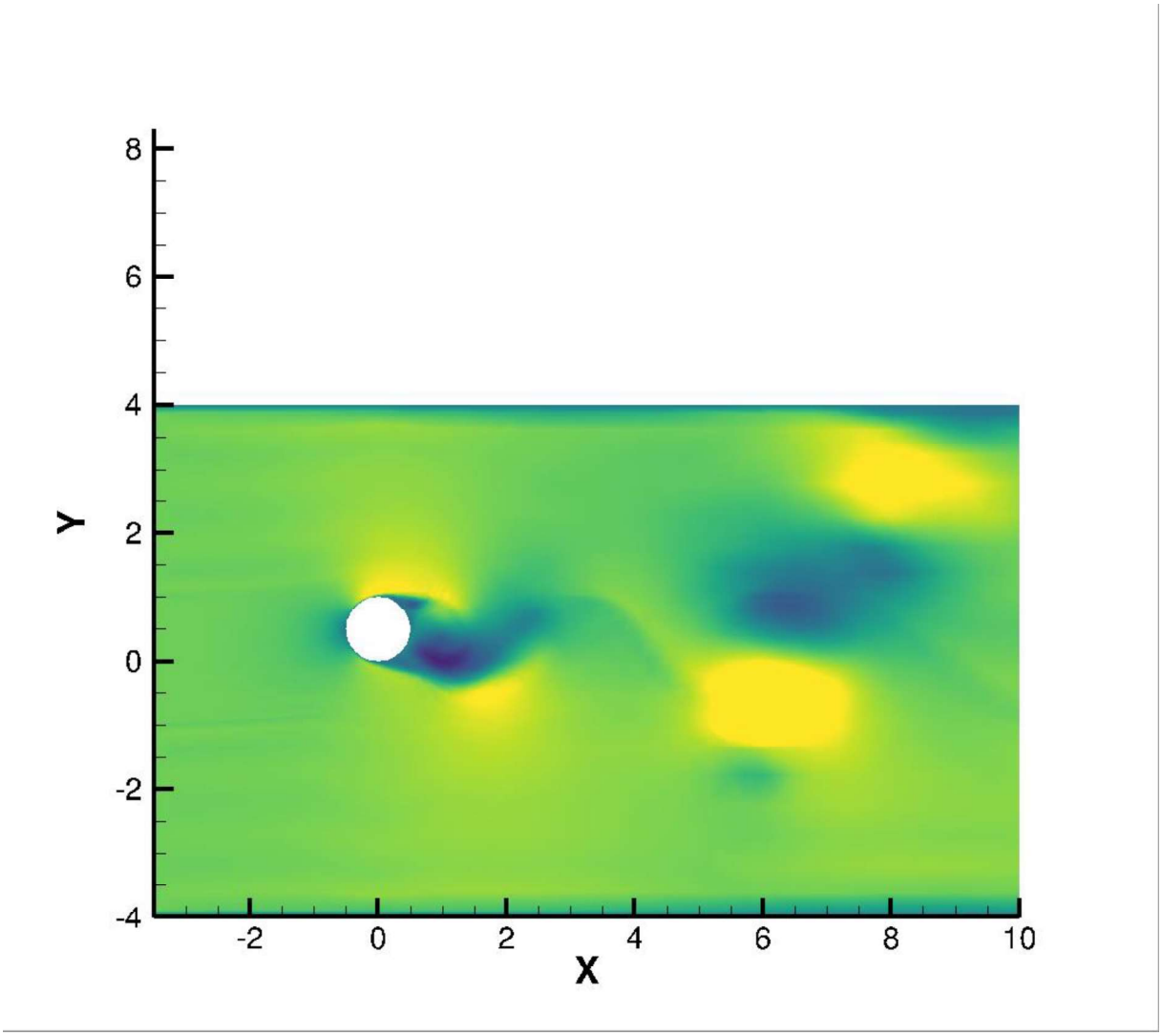

Fonte: Autor.

Figura 34 – Campo de velocidade para time step=11000




Fonte: Autor.

Figura 35 – Campo de velocidade para time step=11200




Fonte: Autor.

# 5 CONCLUSÕES

Foram realizadas simulações de alta fidelidade, com um cilindro livre para vibrar na direção transversal, utilizando moving mesh, obtendo-se os coeficientes aerodinâmicos, percorrendo um espaço paramétrico, os resultados foram apresentados e os objetivos foram atingidos.

Obteve-se uma base de dados para coeficientes de sustentação e arrasto que servirá de consulta para estimar as forças aerodinâmicas em qualquer situação em que se saiba o diâmetro do cilindro, seu comprimento, a densidade do fluido e a velocidade do escoamento. São essas variáveis que se utiliza para cálculo dessas forças (ver as equações de sustentação e arrasto discutidas no decorrer do trabalho).

O padrão identificado nas figuras do campo de velocidade foi o 2S, do inglês “two-single”, e significa que a cada instante um vórtice proveniente de um lado do cilindro e com vorticidade contrária ao anterior é emitido.

A escolha da faixa de Reynolds de 100 a 300, embora pareça limita, é aplicável a diversos problemas práticos, como tubos e estruturas submersas em escoamentos lentos (por exemplo, pipelines e plataformas), além de apresentar padrões de desprendimento de vórtices regulares e bem definidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSI, Gustavo Roque da Silva; MENEGHINI, Julio Romano. Estudo experimental do efeito de interferência no escoamento ao redor de cilindros alinhados. 2005.

BLEVINS, Robert D. Flow-induced vibration. New York, 1986.

CENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos-3**. Amgh Editora, 2015.

CHAPLIN, J. R. et al. Laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a vertical tension riser in a stepped current. **Journal of Fluids and Structures**, v. 21, n. 1, p. 3-24, 2005a.

CHAPLIN, J. R. et al. Blind predictions of laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a tension riser. **Journal of fluids and structures**, v. 21, n. 1, p. 25-40, 2005.

CHEN, Wei et al. Numerical simulation of surface roughness effects on the vortex-induced vibration of a circular cylinder at a subcritical Reynolds number. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, v. 14, p. 100430, 2022.

FERZIGER, Joel H.; PERIC, Milovan; STREET, Robert L. **Computational methods for fluid dynamics**. springer, 2019.

FISCHER, Paul; LOTTES, James; TUFO, Henry. **Nek5000**. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), 2007.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, P. J. Introdução à Mecânica dos Fluidos, 5ª edição. **LTC Editora**, 2001.

FUJARRA, André Luis Condino; PESCE, Celso Pupo. Estudo em modelo reduzido de tubo, flexível e liso, submetido ao fenômeno de Vibração Induzida pela Vorticidade (Vortex Induced Vibration). 1997.

FUJARRA, André Luis Condino. Estudos experimentais e analíticos das vibrações induzidas pela emissão de vórtices em cilindros flexíveis e rígidos. **São Paulo. Tese (Doutorado em Engenharia). USP**, 2002.

GERRARD, J. H. The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies. **Journal of fluid mechanics**, v. 25, n. 2, p. 401-413, 1966.

LARSEN, Carl M.; HALSE, Karl H. Comparison of models for vortex induced vibrations of slender marine structures. **Marine Structures**, v. 10, n. 6, p. 413-441, 1995.

PANTAZOPOULOS, Michael S. Vortex-induced vibration parameters: critical review. 1994.

PATERA, Anthony T. A spectral element method for fluid dynamics: laminar flow in a channel expansion. **Journal of computational Physics**, v. 54, n. 3, p. 468-488, 1984.

SOARES, Camilo da Silva. **Desenvolvimento de um sistema de medição para análise da força de arrasto em torno de um cilindro**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

TU, Jiyuan et al. **Computational fluid dynamics: a practical approach**. Elsevier, 2023.

VAN DYKE, Milton; VAN DYKE, Milton. **An album of fluid motion**. Stanford: Parabolic Press, 1982.

VERSTEEG, Henk Kaarle; MALALASEKERA, Weeratunge. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Pearson education, 2007.

WHITE, Frank M. **Viscous fluid flow**. New York: McGraw-Hill, 1991.

WILLIAMSON, Charles HK; ROSHKO, Anatol. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. **Journal of fluids and structures**, v. 2, n. 4, p. 355-381, 1988.

WILLIAMSON, C. H. K. Three-dimensional wake transition. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 328, p. 345-407, 1996.

WILLIAMSON, Charles HK; GOVARDHAN, R. Vortex-induced vibrations. **Annu. Rev. Fluid Mech.**, v. 36, p. 413-455, 2004.