

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM
COMPUTACIONAL

Leonardo Luiz Veiga Rodrigues

Estudo do Escoamento ao Redor de Cilindro Circular: Influência da proximidade
ao solo, efeito de vizinhança e da intensidade de turbulência

Juiz de Fora
2020

Leonardo Luiz Veiga Rodrigues

Estudo do Escoamento ao Redor de Cilindro Circular: Influência da proximidade ao solo, efeito de vizinhança e da intensidade de turbulência

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional. Área de concentração: Modelagem Computacional

Orientadora: Prof. Dr. Patrícia Habib Hallak

Juiz de Fora

2020

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Rodrigues, Leonardo Luiz Veiga.

Estudo do Escoamento ao Redor de Cilindro Circular : Influência da proximidade ao solo, efeito de vizinhança e da intensidade de turbulência / Leonardo Luiz Veiga Rodrigues. – 2020.

88 f. : il.

Orientadora: Patrícia Habib Hallak

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, 2020.

1. Dinâmica dos Fluidos Computacional. 2. Escoamento laminar. 3. Escoamento turbulento. 4. Risers de petróleo I. Habib Hallak, Patrícia, orient. II. Título.

Leonardo Luiz Veiga Rodrigues

Estudo do Escoamento ao Redor de Cilindro Circular: Influência da proximidade ao solo, efeito de vizinhança e da intensidade de turbulência

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional. Área de concentração: Modelagem Computacional

Aprovada em 03 de março de 2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Patrícia Habib Hallak - Orientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Rafael Alves Bonfim de Queiros
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Felipe dos Santos Loureiro
Universidade Federal de São João del-Rei

Dedico este trabalho a toda minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, não posso deixar de agradecer à Deus. Que me deu saúde, paz, harmonia, motivação e todos os elementos necessários para concluir este trabalho. Sem Ele, nada é possível!

Gostaria de agradecer também às pessoas que sem as quais este trabalho não existiria. São elas:

- Meus pais que tanto amo, Ailton e Silvana, que me deram todo o suporte e apoio todos estes anos. Aos meus irmãos, Sávio e Larissa, que sempre estão do meu lado em todos os momentos bons e ruins. E, é claro, à minha noiva Amanda por toda a paciência e amor comigo nos dias em que estive estressado com o trabalho;
- Não posso deixar de agradecer também à minha orientadora Patrícia Hallak, que sempre esteve disponível e solícita quando eu precisava, me orientou super bem, com paciência, inteligência e estímulo para comigo;
- Agradeço também aos meus companheiros do PGMC que não vou citar nomes para não encher essa página, vou levá-los com certeza para a vida, todos os momentos de aprendizagem, estudo, conversa e distração;
- E aos membros da banca, Professores Rafael Bonfin e Felipe Loureiro pela disponibilidade e aceite ao convite de contribuir para este trabalho.

Também agradeço às agências de fomento da UFJF, FAPEMIG e CAPES, pelo apoio financeiro ao longo desses dois anos.

Agradeço a todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para que este trabalho fosse possível, muito obrigado!

"Aquele, pois, que ouve estas minhas palavras e as põe em prática é semelhante a um homem prudente, que edificou sua casa sobre a rocha. Caiu a chuva, vieram as enchentes, sopraram os ventos e investiram contra aquela casa; ela, porém, não caiu, porque estava edificada na rocha."(MATHEUS, 7, 24-25).

RESUMO

Os risers, amplamente utilizados na engenharia offshore, são longos tubos com multicamadas projetados para transportar fluidos - como petróleo e gás natural - do fundo do mar para as plataformas marítimas. A sazonalidade e variação das correntes marítimas ao longo do tempo tornam necessário o estudo de diferentes regimes de escoamento e de condições de contorno. Este trabalho tem por objetivo estudar os efeitos do escoamento em torno da seção transversal circular de um tubo em uma análise computacional bidimensional. Portanto, é feito um estudo sobre a influência do número de Reynolds e do tipo de fluxo, obtendo-se resultados para os regimes laminar e turbulento. No escoamento ao redor de um obstáculo é interessante o estudo sobre as características do desprendimento cadenciado de vórtices e dos coeficientes de força. Esse fenômeno gera variação de pressão na superfície da estrutura, causando esforços dinâmicos que podem induzir oscilações, variar as forças de arrasto e sustentação e causar falhas estruturais se a frequência do desprendimento de vórtice se aproximar de uma das frequências naturais da estrutura. As análises foram realizadas através da modelagem computacional usando o software de dinâmica de fluidos computacional ANSYS © Fluent e, em seguida, comparados com os resultados de outros modelos na literatura. Inicialmente, foram realizadas simulações com escoamentos laminares. Nestas, foi realizado também um estudo da influência da proximidade de um riser sobre o outro. Assim, os coeficientes de força são obtidos em função da distância de um riser ao outro e da proporção da assimetria do domínio, respectivamente. Observa-se que, para baixas distâncias entre os cilindros, existe uma região de velocidade considerada nula, parecendo não serem dois corpos, mas apenas um. E, a medida que os cilindros se afastam, a região se estreita, até o segundo cilindro ter o perfil de velocidade semelhante ao primeiro. Além disso, a influência da posição vertical do riser (profundidade) em relação ao leito marítimo foi investigada. Observou-se que, quando o cilindro estava em contato com fundo do mar, os valores dos coeficientes variaram significativamente, assim como o número de Strouhal. Estudos subsequentes consideram escoamentos turbulentos. Nestas simulações, foi empregado o modelo de turbulência $k - \omega$ SST. Em muitos casos da literatura, são utilizados valores fixos de intensidade de turbulência para todos os números de Reynolds. Este trabalho varia esse parâmetro para verificar sua influência em alguns coeficientes aerodinâmicos, levando em consideração o número de Reynolds. Foi constatado que as flutuações do coeficiente de sustentação são as mais afetadas por este parâmetro.

Palavras-chave: Dinâmica dos Fluidos Computacional. Escoamento laminar. Escoamento turbulento. Efeito Solo. Efeito vizinhança. Risers de petróleo.

ABSTRACT

Risers, widely used in offshore engineering, are long multilayer tubes designed to transport fluids - such as oil and natural gas - from the seabed to offshore platforms. The seasonality and variation of sea currents over time make it necessary to study different flow regimes and boundary conditions. This work aims to study the effects of flow around the circular cross section of a tube in a two-dimensional computational analysis. Therefore, a study is made on the influence of the Reynolds number and the type of flow, obtaining results for the laminar and turbulent regimes. In the flow around an obstacle, it is interesting to study the characteristics of the vortex shedding and the force coefficient. This phenomenon generates pressure variations on the surface of the structure, causing dynamic efforts that can induce oscillations, vary the drag and lift forces and cause structural failures if the frequency of the vortex shedding approaches one of the natural frequencies of the structure. The analyzes were performed through computational modeling using the computational fluid dynamics software ANSYS © Fluent and then compared with the results of other models in the literature. Initially, simulations were carried out with laminar flows. In these, a study of the influence of the proximity of one riser on the other was also carried out. Thus, the force coefficients are obtained as a function of the distance from one riser to the other and the proportion of the domain asymmetry, respectively. It is observed that, for low distances between the cylinders, there is a region of speed considered null, appearing not to be two bodies, but only one. And, as the cylinders move away, the region narrows, until the second cylinder has a speed profile similar to the first. In addition, the influence of the vertical position of the riser (depth) in relation to the seabed was investigated. It was observed that, when the cylinder was in contact with the seabed, the values of the coefficients varied significantly, as well as the number of Strouhal. Subsequent studies consider turbulent flows. In these simulations, the $k - \omega$ SST turbulence model was used. In many cases in the literature, fixed values of turbulence intensity are used for all Reynolds numbers. This work varies this parameter to verify its influence on some aerodynamic coefficients, taking into account the Reynolds number. It was found that fluctuations in the lift coefficient are the most affected by this parameter.

Keywords: Computational Fluid Dynamics. Laminar flow. Turbulent flow. Seabed Effect. Neighborhood effect. Risers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1— Configuração geométrica de risers a)Vertical b)Catenária c)Steep-wave e d)Lazy-wave	27
Figura 2.1— Exemplo de um sinal aleatório de velocidade em um escoamento turbulento	36
Figura 2.2— Representação da evolução temporal esperada para os métodos DNS, LES e RANS	37
Figura 2.3— Grau de modelagem e custo computacional dos modelos de turbulência	38
Figura 3.1— Posições em relação a face computacional f , o sinal da velocidade v_f fornece o sentido do escoamento	44
Figura 3.2— Exemplo de malha escalonada para pressão e velocidade	45
Figura 3.3— Configuração das condições de contorno para a modelagem do caso base	46
Figura 3.4— Configuração das condições de contorno para a modelagem do estudo do efeito de vizinhança	47
Figura 3.5— Configuração das condições de contorno para a modelagem do estudo do efeito da profundidade	48
Figura 3.6— Configuração das condições de contorno para a modelagem do estudo do caso turbulento	48
Figura 3.7— Configuração da malha para a simulação do caso base deste estudo	49
Figura 3.8— Configuração da malha para a simulação do estudo sobre o efeito de vizinhança	50
Figura 3.9— Configuração da malha para a simulação do estudo sobre o efeito da profundidade	51
Figura 3.10—Configuração da malha para a simulação do estudo sobre o caso turbulento	52
Figura 4.1— Histórico no tempo dos coeficientes de arrasto e sustentação para $Re=100$	56
Figura 4.2— Histórico no tempo dos coeficientes de arrasto e sustentação para $Re=1000$	56
Figura 4.3— Visualização do perfil de velocidades horizontal para $Re=100$	58
Figura 4.4— Histórico no tempo dos coeficientes de arrasto e sustentação para o segundo cilindro e $Re=100$	59
Figura 4.5— $\bar{C}d$ e $\bar{C}l$ em função da razão de Gap (e/D) para o cilindro da esquerda	60
Figura 4.6— $\bar{C}d$ e $\bar{C}l$ em função da razão de Gap (e/D) para o cilindro da direita	60
Figura 4.7— Visualização do perfil de velocidades horizontal para (a) $e = 0$, (b) $e = 0,5$, (c) $e = 1$ e (d) $e = 10$	61

Figura 4.8– Zoom da visualização do perfil de velocidades horizontal para (a) $e = 0$, (b) $e = 0,5$, (c) $e = 1$ e (d) $e = 10$	62
Figura 4.9– \overline{Cd} , \ddot{Cl} e St em função da razão (j/D) para $Re=100$	63
Figura 4.10– \overline{Cd} , \ddot{Cl} e St em função da razão (j/D) para $Re=1000$	64
Figura 4.11–Coeficiente de arrasto em função da razão (j/D)	64
Figura 4.12–Flutuação do coeficiente de sustentação em função da razão (j/D)	65
Figura 4.13–Número de Strouhal em função da razão (j/D)	65
Figura 4.14–Comparação dos coeficientes de arrasto entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 0$	66
Figura 4.15–Comparação dos coeficientes de sustentação entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 0$	66
Figura 4.16–Comparação dos coeficientes de arrasto entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 1$	67
Figura 4.17–Comparação dos coeficientes de sustentação entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 1$	67
Figura 4.18–Comparação dos coeficientes de arrasto entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 1,5$	68
Figura 4.19–Comparação dos coeficientes de sustentação entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 1,5$	68
Figura 4.20–Comparação dos coeficientes de arrasto entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 20$	69
Figura 4.21–Comparação dos coeficientes de sustentação entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 20$	69
Figura 4.22–Visualização do perfil de velocidades horizontal para (a) $j = 0$, (b) $j = 0,25$, (c) $j = 0,5$ e (d) $j = 0,75$ para $Re=100$	70
Figura 4.23–Zoom da visualização do perfil de velocidades horizontal para (a) $j = 0$, (b) $j = 0,25$, (c) $j = 0,5$ and (d) $j = 0,75$ para $Re=100$	71
Figura 4.24–Comparação dos valores de \overline{Cd} em função do número de Reynolds com a literatura	73
Figura 4.25–Comparação dos valores de \ddot{Cl} em função do número de Reynolds com a literatura	73
Figura 4.26–Comparação dos valores de St em função do número de Reynolds com a literatura	74
Figura 4.27–Visualização do perfil de velocidade horizontal para $Re=10^4$ e $I=2,5\%$	75
Figura 4.28– \overline{Cd} como função do número de Reynolds para cada nível de intensidade de turbulência	77
Figura 4.29– \ddot{Cl} como função do número de Reynolds para cada nível de intensidade de turbulência	77

Figura 4.30—Número de Strouhal como função do número de Reynolds para cada nível de intensidade de turbulência	78
Figura 4.31— \overline{Cd} e \ddot{Cl} em função da intensidade de turbulência para $Re=10^4$.	78
Figura 4.32— \overline{Cd} e \ddot{Cl} em função da intensidade de turbulência para $Re=10^5$.	79
Figura 4.33— \overline{Cd} e \ddot{Cl} em função da intensidade de turbulência para $Re=10^6$.	79
Figura 4.34—Número de Strouhal em função da intensidade de turbulência para $Re=10^4$	80
Figura 4.35—Número de Strouhal em função da intensidade de turbulência para $Re=10^5$	80
Figura 4.36—Número de Strouhal em função da intensidade de turbulência para $Re=10^6$	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Regimes de escoamento ao redor de um cilindro circular Zdravkovich (1)	35
Tabela 2 – Número de nós e elementos para cada malha gerada no estudo sobre o efeito de vizinhança	50
Tabela 3 – Número de nós e elementos para cada malha gerada no estudo sobre o efeito da profundidade	51
Tabela 4 – Comparação dos coeficientes aerodinâmicos do estudo em questão com a literatura para $Re=100$	57
Tabela 5 – Comparação dos coeficientes aerodinâmicos do estudo em questão com a literatura para $Re=1000$	57
Tabela 6 – Comparação dos coeficientes hidrodinâmicos com a distância entre os cilindros para $Re=100$	58
Tabela 7 – Comparação dos coeficientes aerodinâmicos para $Re=100$ e $Re=1000$ com a distância à superfície plana	62
Tabela 8 – Resultado das simulações para o caso turbulento	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
DNS	Simulação Numérica Direta
FAPEMIG	Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais
LES	Simulação de Grandes Escalas
MDF	Método das diferenças finitas
MEF	Método dos elementos finitos
MVF	Método dos volumes finitos
NS	Navier-Stokes
PGMC	Pós-graduação em Modelagem Computacional
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
SIMPLE	Semi-implicit method for pressure linked Equations
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
VIV	Vibração Induzida por Vórtices

LISTA DE SÍMBOLOS

Re	Número de Reynolds
k	Viscosidade cinética
ε	Dissipação
ω	Razão específica de dissipação
ρ	Densidade do fluido
p	Pressão estática
\vec{v}	Campo de velocidades
μ	Viscosidade
U	Velocidade
L	Comprimento do tubo
D	Diâmetro
z	3ª dimensão do modelo
\vec{F}	Forças externas
$F\vec{g}$	Força gravitacional
I	Intensidade de turbulência
β	Taxa de viscosidade turbulenta
U_{avg}	Velocidade média do fluxo
U'	Quadrado médio da raiz das flutuações da velocidade
ν	Razão entre μ e ρ
Δt	Intervalo de tempo da simulação
Δx	Largura mínima da célula da malha
Cd	Coefficiente de arrasto
Cl	Coefficiente de sustentação
\overline{Cd}	Coefficiente de arrasto médio
\check{Cl}	Coefficiente de sustentação ou rms de Cl
F_D	Força de arrasto
F_L	Força de sustentação
f_v	Frequência de desprendimento de vórtice
e	Distância entre cilindros
j	Distância do cilindro ao fundo
τ	Tensão viscosa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	27
1.2	OBJETIVOS	28
1.2.1	Objetivo geral	28
1.2.2	Objetivos específicos	28
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
1.4	ESCOPO DO TRABALHO	31
2	MODELAGEM MATEMÁTICA	33
2.1	EQUAÇÕES PARA ESCOAMENTO VISCOZO E INCOMPRESSÍVEL	34
2.2	MODELO DE escoamento TURBULENTO	35
2.2.1	Modelo RANS - $k-\omega$ SST	38
2.2.1.1	Equações do modelo	40
3	MÉTODOS NUMÉRICOS, MODELAGEM GEOMÉTRICA E PARÂMETROS DE CONTROLE	43
3.1	MÉTODOS	43
3.2	ASPECTOS NUMÉRICOS	44
3.3	CASOS ANALISADOS E CONDIÇÕES DE CONTORNO	45
3.3.1	Caso base	46
3.3.2	Efeito de vizinhança	47
3.3.3	Efeito de profundidade	47
3.3.4	Caso turbulento	48
3.4	PARÂMETROS DA MALHA	49
3.4.1	Caso base	49
3.4.2	Efeito de vizinhança	50
3.4.3	Efeito de profundidade	51
3.4.4	Caso turbulento	51
3.5	PARÂMETROS DE CONTROLE DA SOLUÇÃO	52
3.6	PÓS-PROCESSAMENTO	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	LAMINAR	55
4.1.1	Caso base	55
4.1.2	Efeito de vizinhança	58
4.1.3	Efeito de profundidade	62
4.2	TURBULENTO	72
4.2.1	Caso base	72
4.2.2	Intensidade de turbulência	75
5	CONCLUSÃO	83

5.1	TRABALHOS FUTUROS	84
	REFERÊNCIAS	85

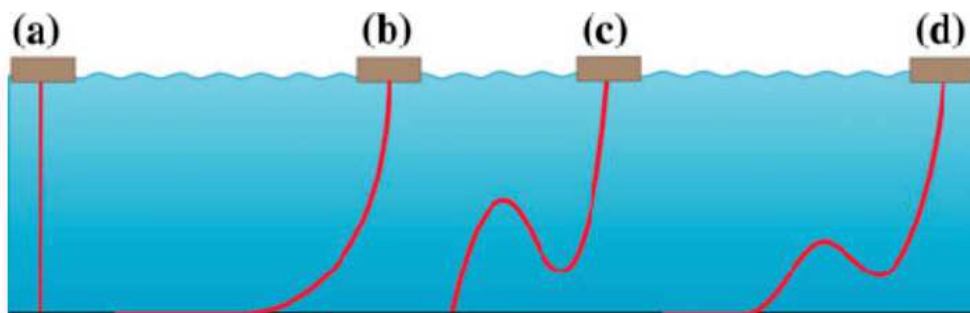
1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão descritas as principais características e finalidades deste trabalho, bem como oferecer uma base conceitual sobre o problema proposto e como, com o auxílio de modelagem matemática, pretendemos desenvolver e resolver tal problema.

1.1 MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

Os risers, amplamente utilizados na engenharia offshore, são longos tubos projetados para transportar fluidos - como petróleo e gás natural - do fundo do mar para as plataformas marítimas, podendo seguir um padrão de conformação de catenária simples ou complexa em casos em que a distância do leito marinho à superfície assim exige estruturalmente. A Figura 1.1 mostra um esquema ilustrativo com exemplos da configuração geométrica de risers.

Figura 1.1 – Configuração geométrica de risers a)Vertical b)Catenária c)Steep-wave e d)Lazy-wave



Fonte: Retirada de Pimenta (2)

Um riser é um tubo que liga uma estrutura de produção offshore flutuante, ou uma plataforma de perfuração, a um sistema submarino para fins produtivos, como a perfuração, produção, injeção e exportação, ou para perfuração, completação e workover. Eles são considerados os produtos mais críticos no desenvolvimento de uma tubulação offshore, levando em conta as cargas dinâmicas e condições de ambientes que eles precisam suportar.

Em especial, o estudo e a aceitação de um sistema de risers requerem um exaustivo número de análises, e uma definição equivocada pode freqüentemente levar um componente do sistema a alcançar ou exceder limites de viabilidade técnica e econômica, mesmo depois de ter gasto muito tempo e recursos com centenas de análises anteriores. Vieira (3)

Nesse cenário, os risers precisam suportar esforços que variam de peso próprio, pressão da coluna de água a cargas dinâmicas resultantes das correntes marítimas. Os risers são fabricados fazendo uso de camadas sobrepostas de perfis de aço intertravados,

intercalados com camadas de materiais elastoméricos. Tal conformação confere relativa flexibilidade ao riser se comparado com aqueles em cuja fabricação se faz uso de tubos metálicos rígidos.

As análises desse componente podem ser feitas considerando o escoamento ao redor de um cilindro circular. É de grande interesse investigativo o escoamento em torno de um cilindro o que tem sido objeto de estudo para muitos pesquisadores em todo o mundo. Destacam Tritton (4) e Dennis and Chang (5) em meados do século passado, com trabalhos experimentais e numéricos. Atualmente, a maioria dos estudos é realizada usando computadores, por meio de técnicas computacionais, como Stringer et al. (6), Ong et al. (7), Abdulaziz (8) e muitos outros.

O desprendimento de vórtices gera vibrações na estrutura do riser, podendo causar falhas estruturais no mesmo. Para melhor quantificar esses efeitos se utiliza os coeficientes aerodinâmicos, como o coeficiente de arrasto e de sustentação. Este trabalho visa quantificar qual é a variação desses coeficientes dependendo da conformação desses risers, ou seja, qual o impacto que a aproximação de um riser ao outro pode gerar nesses coeficientes? Qual o impacto que a profundidade pode acarretar? Qual o impacto da turbulência? Dentre outras análises. Assim podendo contribuir para uma melhor análise e projetos de risers.

1.2 OBJETIVOS

Esta sessão tem como finalidade enumerar e enunciar os objetivos geral e específicos a serem atingidos com o auxílio dos métodos, que serão melhor descritos e exemplificados no capítulo 2.

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da correntes marítimas nos coeficientes de força aerodinâmicas em risers, por meio da dinâmica dos fluidos computacional. As simulações foram realizadas para valores do número de Reynolds variando de $Re=100$ (regime laminar), passando por $Re=10^4$ (regime subcrítico), a 10^6 (regime supercrítico).

1.2.2 Objetivos específicos

- Modelagem laminar do escoamento ao redor de um cilindro;
- Modelagem turbulenta do escoamento ao redor de um cilindro;
- Estudo dos efeitos de vizinhança entre cilindros;
- Estudo do efeito da profundidade;
- Avaliação da intensidade de turbulência no escoamento.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, são apresentados alguns trabalhos correlatos ao tema desta pesquisa, ou seja, escoamento ao redor de corpos, sejam eles sob regime laminar ou turbulento, experimentais ou computacionais.

Franke and Schönung (9) em seu artigo apresenta cálculos numéricos de fluxos de desprendimento de vórtice laminar através de cilindros circulares e quadrados para uma grande variedade de número de Reynold. Os cálculos foram realizados resolvendo as equações instáveis de Navier-Stokes 2D com um método de volume finito incorporando o esquema de discretização preciso de terceira ordem denominado QUICK. A relação de dependência do número de Reynolds com o número de Strouhal e o coeficiente de arrasto são comparados com os resultados de trabalhos experimentais e com outros trabalhos numéricos, mostrando uma boa concordância para números de Reynolds mais baixos ($Re < 1000$) nos quais o escoamentos totalmente laminares são esperados. Para números de Reynolds mais altos, os cálculos se desviam das medições, e isso é atribuído à influência inicial das flutuações estocásticas. Para o cilindro circular, os instantes de tempo para o desenvolvimento do desprendimento periódico do vórtice é ilustrado por uma série de imagens de linhas de fluxo.

Pode-se chamar o trabalho de W.C.L.Shih and A.Roshko (10) como um dos clássicos da área em questão. Os dados nele contidos foram obtidos no túnel de vento pressurizado de 12 pés no Centro de Pesquisa Ames da NASA sobre escoamento suave passado através de cilindros circulares irregulares com altos números de Reynolds. As pressões superficiais constantes e instáveis foram medidas ao redor e ao longo dos cilindros. A análise dos resultados fornece coeficientes de sustentação e arrasto e números de Strouhal para vários cilindros.

Behr et al. (11) avaliaram a influência da localização dos limites laterais em um escoamento incompressível através de um cilindro circular para o caso laminar com $Re=100$. Foram obtidos resultados que caracterizam o escoamento instável para uma variedade de condições de contorno laterais. Os cálculos são realizados com duas formulações distintas em elementos finitos (Espaço-tempo e pressão-velocidade). Foi concluído que a distância entre o cilindro e os limites laterais podem ter um efeito significativo no número de Strouhal.

Mittal and Raghuvanshi (12) observaram que o desprendimento de vórtices através de um cilindro pode ser alterado e, em alguns casos, suprimido em um intervalo limitado de números de Reynolds pela colocação adequada de um segundo cilindro de controle com menor dimensão na esteira do cilindro principal. Além disso, este trabalho possui excelente concordância entre seus resultados numéricos e experimentais já realizados e divulgados na literatura. Este trabalho foi também, utilizado como fonte de comparação dos resultados do presente estudo.

Já Berthelsen and Faltinsen (13) desenvolveram um método de fronteira imerso para as equações incompressíveis de Navier-Stokes em domínios irregulares usando uma abordagem de célula fantasma local. Esse método estende a solução suavemente através do contorno na mesma direção da discretização. O método é testado e validado para uma série de problemas, incluindo escoamento uniforme através de um cilindro circular, escoamento iniciado impulsivamente através um cilindro circular e escoamento oscilatório planar através de um cilindro circular.

Stringer et al. (6) desenvolveram uma metodologia para calcular o escoamento em torno de cilindros circulares e, testada usando solvers comerciais e de código aberto de destaque, como o ANSYS® CFX e o OpenFOAM®, respectivamente. Uma variedade de diâmetros e condições de escoamento é calculada gerando soluções para números de Reynolds que variam de 40 a 106. Os dados resultantes são apresentados para forças de sustentação e arrasto e, frequência de Strouhal. Ao remover muitas variantes comuns associadas aos componentes de grade e transientes dos cálculos da URANS, a metodologia desenvolvida pode ser usada como um caso de referência para resolver ainda mais os códigos de estruturas cilíndricas.

Tawekal (14), em sua tese de mestrado, desenvolveu um trabalho com objetivo de simular um escoamento uniforme e constante que flui sobre um tubo bidimensional, que neste caso foi representado por um cilindro circular, com diferentes parâmetros, como o número de Reynolds e a altura do vão, usando o software em dinâmica fluidos computacional chamado OpenFOAM. Tawekal (14) variou o número de Reynolds e testou dois modelos de turbulência distintos.

Vieira (15) em sua dissertação de mestrado, estudou o escoamento e a transferência de calor ao redor de corpos aquecidos imersos em fluidos, tais como cilindros aquecidos da indústria de papel e celulose, entre outros. A geometria imersa é representada por uma malha lagrangiana que se sobrepõe à malha euleriana do domínio. Este procedimento favorece a simulação de fenômenos complexos como o de interação fluido-estrutura, se comparado com modelos convencionais de malhas adaptativas. A evolução temporal dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto e sustentação foram analisados. Os valores médios de C_d e C_l também foram analisados.

O trabalho de P. Mathupriya and Ooi (16) analisa o escoamento sobre um cilindro confinado por duas paredes paralelas no qual o modelo de turbulência utilizado foi o da simulação numérica direta (DNS). O escoamento estudado é tridimensional onde o cilindro circular é simetricamente alocado no domínio. A análise quantitativa do escoamento é conduzido com base nos coeficientes de sustentação C_l , coeficiente de arrasto C_d , e número de Strouhal St , investigados a medida que número de Reynolds (Re) é variado. Verificou-se ter diferentes regimes de instabilidade à medida que o Número de Reynolds do escoamento aumenta.

Foi realizada por Hongjun Zhu (17) uma simulação numérica direta para investigar o escoamento através de um cilindro com abertura para baixos valores de número de Reynolds. O entalhe do cilindro afeta a separação da camada limite, a posição de formação do vórtice, o comprimento da região de recirculação e a largura da esteira, que são determinados pelo tipo de fenda. A taxa de escoamento nas fendas flutua ao longo do tempo devido à alternância no desprendimento de vórtice e na distribuição de pressão flutuante em torno da superfície do cilindro. A tensão de cisalhamento da parede e o impacto do escoamento na parede da fenda contribuem parcialmente para as forças hidrodinâmicas que atuam no cilindro com fenda, levando em consideração a parede interna da fenda.

O trabalho de Sean Blaney and Lavoie (18) avalia o desprendimento de vórtice para uma geometria com dois cilindros não paralelos. Nele, são considerados o efeito do ângulo da guinada, espaçamento do cilindro e número de Reynolds na frequência de desprendimento. Os resultados demonstram que o ângulo de guinada e o espaçamento local têm um efeito significativo na frequência do desprendimento de vórtice. Além disso, o estudo também aponta que a região de recirculação do cilindro a montante, na folga, varia em tamanho ao longo do intervalo. Essas informações fornecem uma indicação dos tipos de regimes de descolamento que podem estar presentes em diferentes locais de abrangência, como risers de petróleo por exemplo.

1.4 ESCOPO DO TRABALHO

Neste capítulo é apresentada uma breve introdução ao tema desta pesquisa, contendo uma contextualização, motivação, objetivos e uma breve revisão bibliográfica apresentando o estado da arte sobre o tema.

Já no capítulo 2 tem-se a modelagem matemática utilizada nas simulações, contendo as equações para escoamento viscoso e incompressível, além do modelo de turbulência utilizado.

O capítulo 3 apresenta informações sobre os métodos numéricos utilizados, modelagem geométrica e a malha para cada um dos casos, além de parâmetros de controle da solução e pós-processamento.

Todos os resultados alcançados e suas respectivas discussões são apresentados no capítulo 4. As conclusões e propostas de trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 5.

Ao se investigar os resultados para os coeficientes de sustentação, arrasto e número de Strouhal para escoamentos com número de Reynolds no regime turbulento foi detectada certa variabilidade. Por conta disso, este trabalho tem por intuito e como grande diferencial a investigação deste fenômeno no que diz respeito à influência da intensidade de turbulência nesses estudos, visto também que, não se possui muitos trabalhos nesta área na literatura atual.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA

O principal objetivo deste capítulo é o de apresentar as equações do meio contínuo para escoamentos viscosos e incompressíveis. Apresenta-se, ainda, uma descrição matemática sucinta do modelo de turbulência que foi empregado na pesquisa.

Dentre os modelos em dinâmica dos fluidos computacional, pode-se mencionar os que consideram escoamentos viscosos bi ou tri-dimensionais compressíveis ou incompressíveis. Esses escoamentos são descritos pelas equações de Navier-Stokes (NS).

Na dinâmica dos fluidos computacional, CFD, essas equações são resolvidas por meio dos métodos discretos dos quais os mais tradicionais são o método dos elementos finitos (MEF), o método das diferenças finitas (MDF) ou pelo método dos volumes finitos (MVF). Em linhas gerais, esses métodos transformam as equações diferenciais parciais e suas condições iniciais e de contorno em um sistema algébrico de equações, como apresentado em Oliveira (19)

Os principais problemas inerentes aos métodos citados consistem em discretizar as equações de NS. Dentre eles, pode-se mencionar a não-linearidade do termo advectivo, o acoplamento pressão velocidade, a iteração fluido estrutura e a inserção dos modelos de turbulência.

Para isto, é requerido um alto custo computacional na realização das simulações computacionais, o que pode ser uma dificuldade para a execução deste trabalho. No entanto, a CFD possui inúmeras vantagens. Dentre elas, tem-se que alguns exemplos possuem solução analítica, outros não. Para aqueles que não possuem soluções analíticas, ferramentas como a CFD são necessárias. Por outro lado, mesmo existindo solução analítica para um dado problema, a CFD incorpora mais informações.

A CFD permite a consideração de questões inerentes ao problema que se deseja estudar, como a consideração de diferentes condições de contorno e situações não previstas em outras metodologias. Túnel de vento por exemplo é muito custoso e, em alguns casos, inacessível, assim, as ferramentas CFD se tornam bastante úteis e de interessante acesso.

Uma das principais preocupações na análise numérica é categorizar o regime do escoamento, que pode variar de laminar a turbulento, de acordo com o valor do número de Reynolds (Re). Este valor adimensional expressa a proporção de forças inerciais pela forças viscosas e é definido por:

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (2.1)$$

Nesta expressão, ρ é a massa específica do fluido, U a velocidade média do escoamento

mento, μ a viscosidade dinâmica e D uma dimensão característica do obstáculo. Quando este obstáculo for um cilindro de seção circular, D é o diâmetro do cilindro.

2.1 EQUAÇÕES PARA ESCOAMENTO VISCOZO E INCOMPRESSÍVEL

Para escoamentos incompressíveis e com viscosidade constante, o problema é regido pelas equações de Navier-Stokes apresentadas a seguir. Essas equações são apresentadas em uma descrição Euleriana, onde as propriedades características do meio são consideradas função do espaço e tempo. O problema é definido em um domínio Ω com contorno Γ contendo nde dimensões de espaço Euclidiano. Na forma não conservativa, ou seja, utilizando variáveis primitivas de pressão e velocidade em coordenadas Cartesianas e usando a convenção de somatório: $a = 1, \dots, nde$ e $b = 1, \dots, nde$ essas equações assumem a forma:

- Equação de conservação da quantidade de movimento:

$$\rho \frac{\partial v_a}{\partial t} + \rho v_b \frac{\partial v_a}{\partial x_b} - \frac{\partial \tau_{ab}}{\partial x_b} + \frac{\partial p}{\partial x_a} = f_a \quad (2.2)$$

- Equação de conservação de massa (equação de continuidade)

$$\frac{\partial v_a}{\partial x_a} = 0 \quad (2.3)$$

Onde

$$\tau_{ab} = \mu \left(\frac{\partial v_a}{\partial x_b} + \frac{\partial v_b}{\partial x_a} \right) \quad (2.4)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, τ_{ab} é a tensão viscosa, μ é a viscosidade do fluido, v são as componentes de velocidade, p é a pressão, f_a são as componentes das forças por unidade de volume.

O modelo é fechado introduzindo as condições de contorno e as velocidades iniciais. Velocidades e forças de superfície são prescritas, respectivamente, nos contornos Γ_{ua} e Γ_{ta} , tal que $\Gamma_{ua} \cup \Gamma_{ta} = \Gamma$ e $\Gamma_{ua} \cap \Gamma_{ta} = 0$, ou seja:

$$v_a = \bar{v}_a(x, t) \text{ onde } x \in \Gamma_{ua} \quad (2.5)$$

$$\bar{t}_a(x, t) = (-p\delta_{ab} + \tau_{ab})n_b \text{ onde } x \in \Gamma_{ta} \quad (2.6)$$

onde δ_{ab} é a função delta de Kronecker e n ($n_b, b = 1, nde$) é o vetor normal externo ao contorno.

As condições de contorno de pressão e de escoamento de massa estão associadas ao balanço de massa. Estas grandezas são prescritas como \bar{p} e \bar{G} nos contornos Γ_p e Γ_G , tal que $\Gamma_p \cup \Gamma_G = \Gamma$ e $\Gamma_p \cap \Gamma_G = 0$, ou seja:

$$p = \bar{p}(x, t) \text{ onde } x \in \Gamma_p \quad (2.7)$$

$$\rho v_b n_b = \bar{G}(x, t) \text{ onde } x \in \Gamma_G \quad (2.8)$$

2.2 MODELO DE escoamento TURBULENTO

Em muitos experimentos é observado que valores abaixo dos denominados Re crítico (Re_c) o escoamento é laminar e camadas adjacentes do fluido deslizam entre si de forma ordenada. Se a condição de contorno não mudar com o tempo o escoamento é estável. Esse regime é denominado de regime laminar. Escoamentos laminares são completamente descritos pela equação de Navier Stokes. Para valores do número de Reynolds maiores que Re_c , surgem eventos complexos que alteram a natureza do escoamento, tornando-o caótico e aleatório. O movimento, denominado turbulento, se torna instável mesmo que lhe sejam impostas condições de contorno constantes.

Uma pesquisa notável de Zdravkovich (1) tentou delimitar o regime de fluxo, de acordo com o número de Reynolds. Um resumo dos principais estágios do desenvolvimento do escoamento é apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Regimes de escoamento ao redor de um cilindro circular Zdravkovich (1)

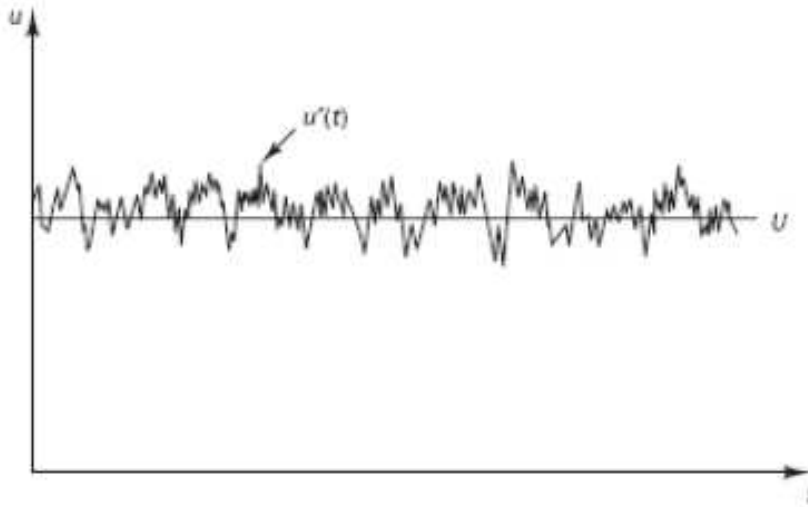
Intervalo de Número de Reynolds	Regime de escoamento
$Re < 1$	Escoamento rastejante
$3 - 5 < Re < 30 - 40$	Separação estável
$30 - 40 < Re < 150 - 300$	Desprendimento periódico laminar
$150 - 200 < Re < 1,4 \times 10^5$	Subcrítico
$1,4 \times 10^5 < Re < 1 \times 10^6$	Supercrítico
$5 \times 10^6 < Re < 8 \times 10^6$	Transcrítico
$8 \times 10^6 < Re$	Póscritico

A aleatoriedade de escoamentos turbulentos impossibilita a descrição das partículas de maneira simples e a velocidade (bem como qualquer outra variável de interesse) é decomposta em um valor médio U com flutuações $u'(t)$. A Figura 2.1 é um exemplo de um sinal aleatório que pode ser decomposto na sua média e nas flutuações em torno desta. A soma das duas parcelas é denominada decomposição de Reynolds:

$$u(t) = U + u'(t) \quad (2.9)$$

Como a turbulência corresponde a um estado caótico de movimento das partículas, e envolve uma vasta amplitude de escalas temporais e espaciais, é de se notar a complexidade em simular todas as escalas espaciais e temporais. Há diversas propostas para a modelagem da turbulência. Basicamente, estes modelos propõem a separação das variáveis nas suas médias e nas suas flutuações.

Figura 2.1 – Exemplo de um sinal aleatório de velocidade em um escoamento turbulento



Fonte: Retirada de Versteeg and Malalasekera (20)

Esta separação é feita ao se aplicar a decomposição (2.9) a todas as variáveis do conjunto de equações de Navier-Stokes apresentadas na seção 2.1 surgem termos que acumulam as informações das flutuações. O processo para obtê-los podem ser facilmente acompanhados nas referências sobre o tema (Pope (21), Wilcox et al. (22)), sendo importante destacar que estes termos adicionais resultam em um tensor de tensões adicional denominado tensor de Reynolds. Os termos deste tensor representam:

- Tensões normais:

$$\tau_{xx} = -\rho \overline{v_1'^2} \quad \tau_{yy} = -\rho \overline{v_2'^2} \quad \tau_{zz} = -\rho \overline{v_3'^2} \quad (2.10)$$

- Tensões cisalhantes

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\rho \overline{v_1' v_2'} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = -\rho \overline{v_1' v_3'} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = -\rho \overline{v_2' v_3'} \quad (2.11)$$

Os modelos de turbulência podem ser agrupados em três grandes grupos, de acordo com a forma como é feita a decomposição do escoamento e o tratamento destes termos adicionais. Em linhas gerais, Oliveira (19) classifica os modelos em três categorias, que são:

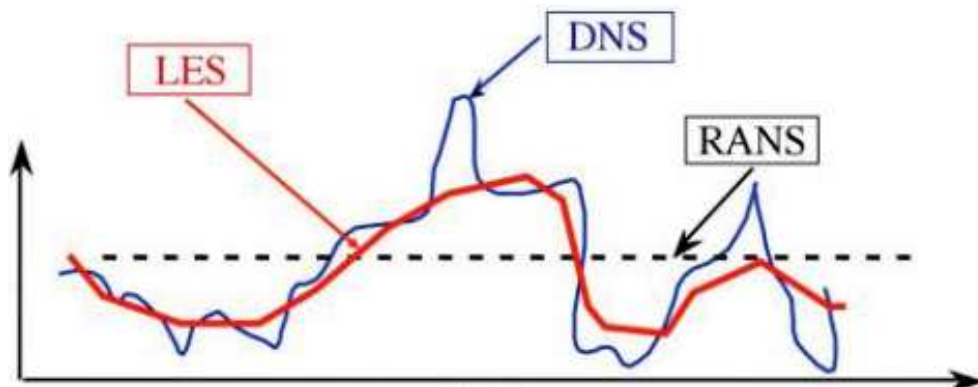
- Modelos de turbulência para as equações médias de Reynolds (*Reynolds averaged Navier Stokes* - RANS): o principal foco desses modelos é o escoamento médio e os efeitos da turbulência nas propriedades do escoamento médio. Primeiramente,

antes da aplicação de algum método numérico, é calculado as médias temporais das equações de Navier Stokes. Termos extras aparecem devido as interações entre as várias flutuações turbulentas. Esses termos extras são modelados com modelos de turbulência clássicos, como o modelo $k-\epsilon$ e $k-\omega$, dentre outros. Os recursos computacionais necessários para cálculos razoavelmente precisos são modestos, portanto, esta abordagem tem sido o principal suporte de engenharia nas últimas três décadas;

- Simulação das grandes escalas (*Large eddy simulation- LES*): forma intermediária dos modelos de turbulência que acompanha o comportamento dos maiores turbilhões. O método aplica um filtro espacialmente as equações de Navier Stokes, que passam os maiores turbilhões e rejeitam os menores. Os efeitos de escoamento "resolvido" (escoamento médio mais a solução dos maiores turbilhões) devido aos menores, que não são resolvidos são incluídos por meio dos denominados modelos de escala sub-malha. As demandas em recursos de computação em termos de armazenamento e volume de cálculos são grandes, mas esta técnica está começando a resolver problemas de CFD com geometria complexa;
- Simulação numérica direta (*Direct numerical simulation - DNS*): Estas simulações computam o escoamento médio e todas as flutuações de velocidade. Na solução espacial da equações de Navier Stokes utilizam-se malhas espaciais que são suficientemente refinadas de tal forma que resolvem as escalas de comprimento de Kolmogorov onde a dissipação de energia são resolvidas. Os passos de tempo são também suficientemente pequenos para resolver as flutuações mais rápidas. Esses cálculos são computacionalmente custosos e, por isso, não é muito utilizado.

Com base nisso, é possível perceber o comportamento mostrado na Figura 2.2, onde o modelo RANS representa o valor médio, o modelo DNS um sinal mais ramificado, e o LES como um sinal intermediário.

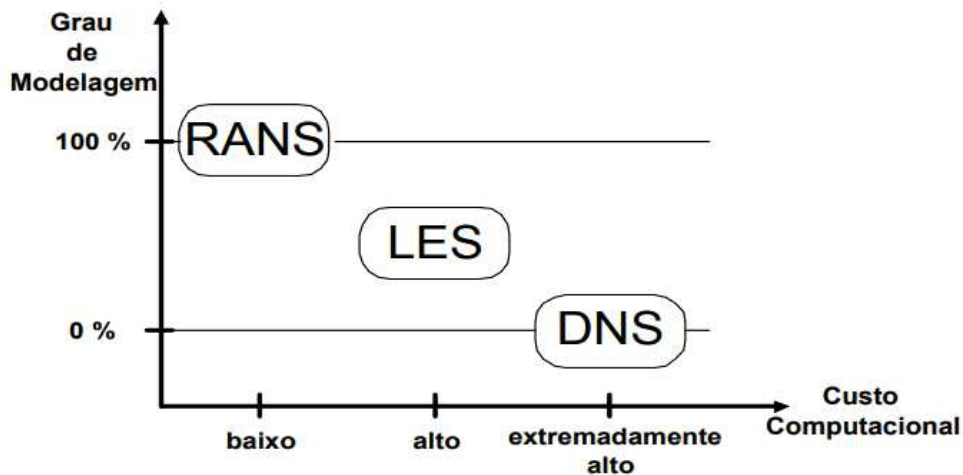
Figura 2.2 – Representação da evolução temporal esperada para os métodos DNS, LES e RANS



Fonte: Retirada de Abad (23)

A Figura 2.3 trás um esquema ilustrativo sobre o custo computacional e o grau de complexidade da modelagem de cada um dos métodos supracitados anteriormente.

Figura 2.3 – Grau de modelagem e custo computacional dos modelos de turbulência



Fonte: Retirada de Rezende (24)

2.2.1 Modelo RANS - $k-\omega$ SST

Nota-se que os métodos RANS utilizam a decomposição de Reynolds, que diz que a variável de interesse consiste em uma parte média e uma parte flutuante. Existem vários modelos dentro do RANS e os mais populares são os modelos de duas equações, conhecidos como os modelos $k-\varepsilon$ e $k-\omega$. Nesses modelos, k representa a energia cinética, ε sua dissipação e ω a taxa específica de dissipação. Todos eles contam com a aproximação de Boussinesq de 1877, onde o tensor de tensão é modelado como o termo viscoso da Navier-Stokes (Eq. 2.2). Os leitores podem encontrar nas referências originais a descrição desses modelos mais populares (21, 22).

Esta subseção tem por finalidade descrever, de forma sucinta, o modelo da classe RANS que foi utilizado neste trabalho, denominado $k-\omega$ SST. O termo SST é uma abreviação do termo em inglês *Shear Stress Transport* e foi proposto inicialmente por proposto por Menter (25) e Menter et al. (26).

O ponto de partida para o entendimento do modelo $k-\omega$ SST é saber que este é uma "mistura" dos até então tradicionais modelos $k-\varepsilon$ e $k-\omega$ e busca incorporar as melhores características de cada um deles. Um aspecto interessante no desenvolvimento do $k-\omega$ SST é a necessidade de modelar com precisão fluxos com fortes gradientes de pressão e separação (Menter (25)), o que é feito pela inclusão de efeitos de transporte na formulação da viscosidade turbulenta (Fluent (27)). Em particular, esta era uma das principais deficiências do modelo $k-\varepsilon$, que era incapaz de capturar o comportamento adequado de camadas limite turbulentas até a separação (Wilcox et al. (22)).

O modelo $k - \omega$ é substancialmente mais preciso do que o $k - \varepsilon$ em simulações nas camadas próximas à parede e, portanto, tem sido bem sucedido em escoamentos com gradientes moderados de pressão adversa. Todavia, este modelo falha para escoamentos com separação induzida por pressão (Menter (25)). Adicionalmente, o modelo ω mostra uma forte sensibilidade aos valores de ω no escoamento livre fora da camada limite (Menter (28)). A deficiência do modelo ω em acompanhar o escoamento livre impediu que este substituisse o modelo ε , apesar de seu desempenho superior na região da parede próxima.

No modelo $k - \omega$ SST, as variáveis de turbulência que precisam ser especificadas são intensidade de turbulência (I) e taxa de viscosidade turbulenta (β). A intensidade da turbulência I é definida como a razão entre o quadrado médio da raiz das flutuações da velocidade, U' e a velocidade média do fluxo, U_{avg} , como apresentado na Eq. 2.12

$$I = \frac{U'}{U_{\text{avg}}} \quad (2.12)$$

Em CFD é prática padrão selecionar uma intensidade de turbulência a partir da qual os valores automaticamente são calculados. Ao definir as condições de contorno para uma simulação CFD, muitas vezes é necessário estimar a intensidade da turbulência nas entradas. Para fazer isso com precisão, é bom ter alguma forma de medição ou experiência anterior para basear a estimativa. Alguns exemplos de estimativas comuns da intensidade de turbulência de entrada são:¹

- Caso de alta turbulência: normalmente a intensidade da turbulência está entre 5% e 20%;
- Caso de média turbulência: escoamento em dispositivos não tão complexos como tubos grandes, fluxos de ventilação etc. ou fluxos de baixa velocidade (baixo número de Reynolds). Normalmente, a intensidade da turbulência está entre 1% e 5%;
- Caso de baixa turbulência: escoamento originado de um fluido que permanece parado, como escoamento externo em carros, submarinos e aeronaves. Túneis de vento de alta qualidade também podem atingir níveis de turbulência realmente baixos. Normalmente, a intensidade da turbulência é muito baixa com valores bem abaixo de 1%.

Para configurar os valores de I , k e ω são calculados de acordo com as Eq. 2.12, Eq. 2.13 e Eq. 2.14. Sendo ν definido como a proporção entre μ e ρ .

¹ https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity

$$k = \frac{3}{2}(IU)^2; \quad (2.13)$$

$$\omega = \frac{0,09k}{\beta\nu}. \quad (2.14)$$

Sabe-se que com o baixo número de Reynolds, se tem uma maior influência do gradiente de pressão e, com este estudo, se quer saber qual faixa do número de Reynolds tem uma influência maior ou menor da intensidade da turbulência.

Este modelo de turbulência de duas equações de viscosidade por turbilhão resolve uma equação de transporte para a energia cinética turbulenta, k , e uma equação de transporte para a dissipação de energia cinética por unidade de ω , também considerada como uma escala de frequência turbulenta (Wilcox et al. (22)).

Este modelo é considerado satisfatório no tratamento da região viscosa da parede próxima e gradientes de pressão, escoamento separado moderado e as correções incluídas por Menter (25) resolve alguns problemas do modelo original em relação à escoamento livre, combinando os melhores recursos do $k - \varepsilon$ e do $k - \omega$ original.

A proposta do modelo $k - \omega$ SST é, portanto, a de utilizar a aproximação $k - \omega$ nas regiões próximas aos obstáculos e, nas regiões mais afastadas, a aproximação do modelo $k - \varepsilon$. A alternância entre esses modelos é controlada por uma função de mistura.

2.2.1.1 Equações do modelo

Nesta subseção mostram-se as equações de transporte inerentes ao modelo. Detalhes das mesmas não são apresentados, mas o leitor encontra nas referências originais informações pertinentes Menter (25, 29, 30).

A relação entre a viscosidade turbulenta ν_t com a energia cinética turbulenta k e a taxa de dissipação ω é dada por:

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (2.15)$$

onde α_1 e a_1 são constantes, F_2 é a função de "mistura" (*blend function*), S é o tensor de tensões.

As equações da energia cinética k e da taxa de dissipação ω são as equações de transporte 2.16 e 2.17 Wilcox et al. (22), Fluent (27). Observa-se que para a equação 2.17

do termo ω , o modelo utiliza a função F_1 que faz a permuta entre os modelos $k - \omega$ e $k - \varepsilon$.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.17)$$

Nestas equações, tem-se:

- $G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$: produção da energia cinética turbulente devido aos gradientes da velocidade média.
- $G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k$: produção de ω

$$\alpha = \alpha_{\text{inf}} \left(\frac{\alpha_0 + Re_t / R_\omega}{1 + Re_t / R_\omega} \right)$$

$$R_\omega = 2,95 \quad \alpha_0 = \frac{\beta_i}{3} \quad \beta_i = 0,072 \quad Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega}$$
- $\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$ e $\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}$: difusividade efetiva de k e ω , respectivamente.

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1 / \sigma_{k,1} + (1 - F_1) / \sigma_{k,2}}$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1 / \sigma_{\omega,1} + (1 - F_1) / \sigma_{\omega,2}}$$

$$F_1: \text{função "mista" de permuta entre os modelos de turbulência.}$$
- Y_k e Y_ω : dissipação de k e ω devido a turbulência.
- D_ω : termo de dissipação cruzada.
- S_k e S_ω : termos fontes.

3 MÉTODOS NUMÉRICOS, MODELAGEM GEOMÉTRICA E PARÂMETROS DE CONTROLE

Esta seção tem por finalidade apresentar os métodos utilizados nesta pesquisa, bem como as técnicas numéricas empregadas nas soluções. Na sequência, é fornecida uma descrição detalhada da configuração, incluindo limites, condições de contorno, estratégia de malha, controle do solucionador e pós-processamento, onde são apresentadas algumas equações importantes para a retirada de dados das simulações.

3.1 MÉTODOS

Como já mencionado, este estudo tem como objetivo avaliar a influência das correntes marítimas nos risers. Quanto a essa interação, a passagem do fluido é avaliada em um escoamento uniforme em torno de uma seção circular, simulando a seção transversal do tubo em uma análise bidimensional.

A compreensão do escoamento em torno de um cilindro circular tem sido historicamente um desafio fundamental para os pesquisadores, em grande parte devido à complexidade e à natureza transitória da esteira.

A ferramenta utilizada para estas análises foi o software comercial ANSYS Fluent. Esta ferramenta já é bem consolidada no mercado e já possui várias interações que propiciam o avanço do estudo para demais áreas do conhecimento como a parte de otimização e de análise estrutural, por exemplo.

O ANSYS fluent é uma plataforma em dinâmica dos fluidos computacional (CFD) que utiliza um solver avançado com capacidades de pré e pós-processamento. Pode ser aplicado a problemas transientes, estacionários, laminares ou turbulentos.

Porém, neste trabalho foi utilizado apenas sua versão acadêmica no que diz respeito à estudos em dinâmica dos fluidos computacional, estando assim limitado à um número máximo de elementos da malha.

Primeiramente foi modelado em duas dimensões um cilindro circular, representando a seção transversal de um riser de petróleo em caso laminar. Após uma eventual validação dos resultados, foi realizada a inserção no modelo de um novo cilindro para análise da influência de um em relação ao outro.

Em uma outra análise, também foi modificada a posição deste primeiro cilindro, com o intuito de estudar a influência da profundidade do riser com o leito marinho.

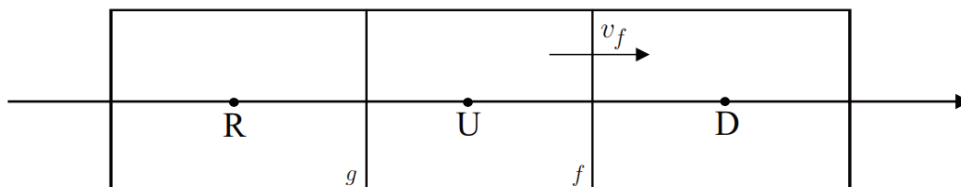
Posteriormente a isso é implementado ao modelo original de turbulência para assim realizarmos análises similares com números de Reynolds mais elevados, bem como análises sobre aspectos da turbulência. Tudo isto se encontra de forma mais detalhada na seção 3.3.

3.2 ASPECTOS NUMÉRICOS

O método de discretização utilizado pelo Ansys fluent foi o método dos volumes finitos. Este método resolve as derivadas parciais baseado na resolução de balanços de massa, energia e quantidade de movimento a um determinado volume de meio contínuo. Basicamente, há uma decomposição do domínio em volumes de controle, depois há uma formulação das equações integrais de conservação para cada volume. Passando então por uma aproximação numérica das integrais para cada volume de controle, até a montagem e solução do sistema algébrico obtido.

O tratamento do termo convectivo adotado foi o esquema *upwind* de segunda ordem que é baseado no fato de que as variáveis transportadas são convectadas na direção do escoamento, como mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Posições em relação a face computacional f , o sinal da velocidade v_f fornece o sentido do escoamento

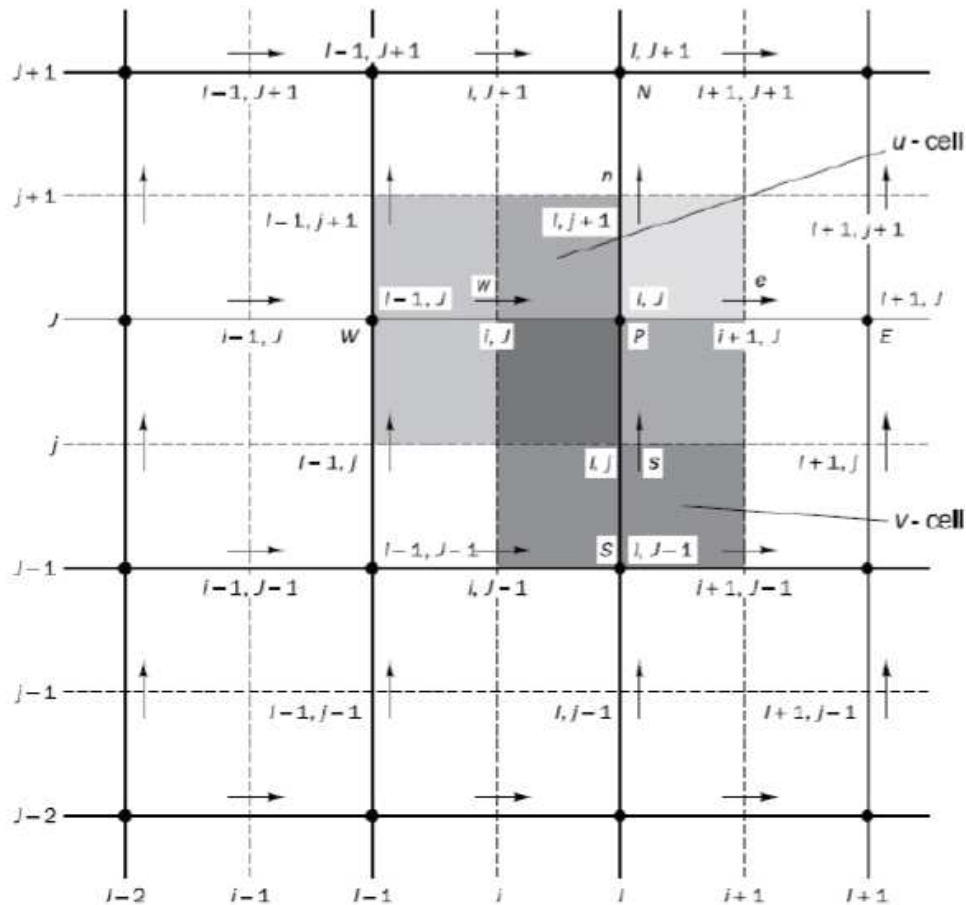


Fonte: Retirada de Queiroz (31)

As Equações 2.2 e 2.3 são intrinsecamente acopladas pois cada componente de velocidade aparece em cada equação de quantidade de movimento e também na continuidade. Para o acoplamento pressão velocidade foi utilizado o *Semi-implicit method for pressure linked Equations (SIMPLE)*.

Este algoritmo é comumente conhecido como o "tabuleiro de xadrez", por se usar uma malha escalonada para pressão e velocidade, como forma de ilustrar, é apresentado na Figura 3.2 uma malha escalonada.

Figura 3.2 – Exemplo de malha escalonada para pressão e velocidade



Fonte: Retirada de Versteeg and Malalasekera (20)

3.3 CASOS ANALISADOS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Nesta seção são apresentados os casos estudados neste trabalho. Primeiramente, foi realizado um estudo do caso base, isto é, um caso laminar com apenas um cilindro centralizado. Este caso foi simulado com $Re=100$ e $Re=1000$ para realizar uma validação do modelo com estudos passados já bem conceituados no mundo acadêmico.

Depois foram feitas duas análises permanecendo no regime laminar. Um deles com a inserção de um outro cilindro semelhante ao primeiro, para estudo do efeito de vizinhança e esteira de escoamento laminar.

Na outra análise supracitada, o cilindro foi movimentado para baixo em relação a geometria inicialmente estudada, com isso, foi possível realizar um estudo sobre o efeito da profundidade no escoamento ao redor do cilindro.

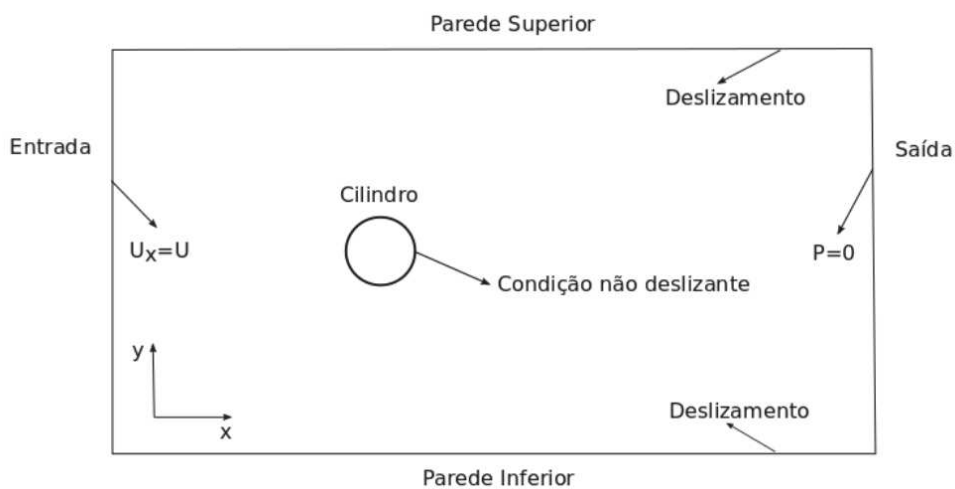
Já no regime turbulento, foi estudada uma geometria semelhante ao caso base, porém, agora em vez de escoamento laminar, ocorre-se um escoamento turbulento com o modelo $k - \omega$ SST. Neste modelo, foram utilizados $Re = 10^4, 10^5$ e 10^6 .

3.3.1 Caso base

O caso base refere-se a simulação ao redor de um cilindro, que é um exemplo de referência para as simulações em CFD. Este serviu para a validação das técnicas numéricas e da modelagem empregada na pesquisa.

O modelo geométrico e as condições de contorno são apresentados na Figura 3.3. Posteriormente será apresentada a modificação feita para o estudo da proximidade do fundo do mar e efeito de vizinhança.

Figura 3.3 – Configuração das condições de contorno para a modelagem do caso base



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a modelagem foi considerada a largura do domínio como 20m e o cilindro é centralizado, com um diâmetro igual a 0,5m. A distância a montante desde a entrada até o centro do cilindro é de 8m e a partir daí até a saída do escoamento ter uma distância de 20m. A terceira dimensão (z) foi definida como 1m. Para garantir uma análise bidimensional, não há escoamento nessa direção. Um escoamento uniforme é especificado na entrada, cujo número de Reynolds é dado pela equação 2.1.

Na superfície do cilindro é aplicada uma condição em que um fluido está em contato direto com um sólido e "gruda" na superfície, é comumente conhecida como condição de não deslizamento, como Cengel and Çimbala (32).

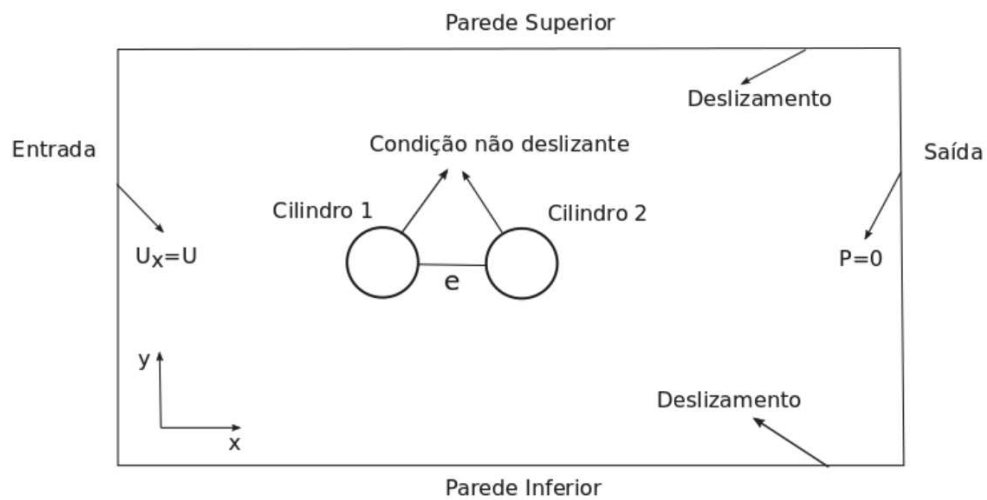
Portanto, as paredes superior e inferior atribuídas como limites de "escorregamento", mostradas em 3.3, permitem que o componente de velocidade do fluido paralelo à parede seja calculado, enquanto a velocidade normal da parede é definida como zero, $U_y = 0$.

Essas informações são de suma importância não somente para a modelagem base, mas também para a compreensão das demais modelagens deste trabalho.

3.3.2 Efeito de vizinhança

Para a análise de efeito de vizinhança foi adotada a modelagem definida e mostrada na Figura 3.4. Pode-se reparar que a única alteração em relação à modelagem anterior é a inserção de um novo cilindro idêntico ao primeiro, situado a uma distância e do cilindro original.

Figura 3.4 – Configuração das condições de contorno para a modelagem do estudo do efeito de vizinhança



Fonte: Elaborada pelo autor.

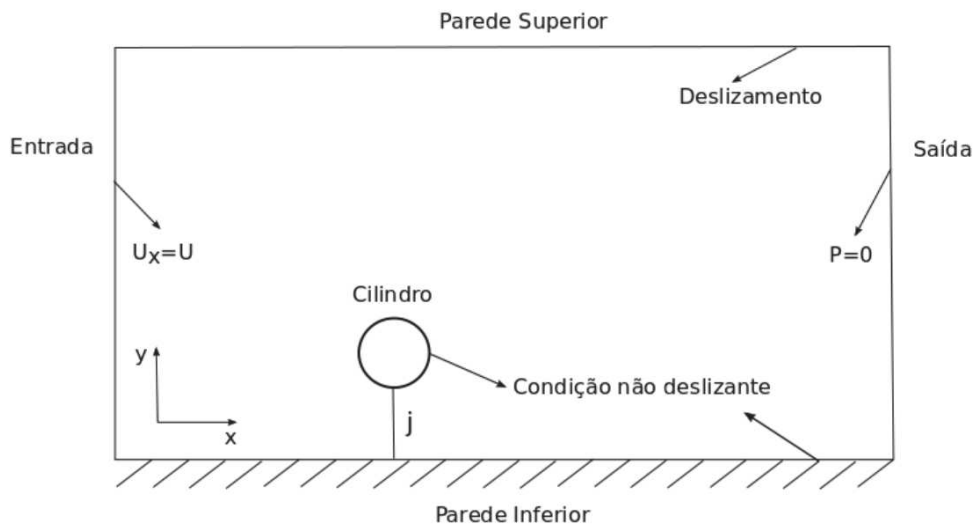
Foi utilizado o parâmetro e para variar a distância entre os cilindros e assim obter os resultados deste trabalho.

3.3.3 Efeito de profundidade

Neste caso, a influência da posição vertical do riser (profundidade) para o contorno inferior foi investigada como objeto de estudo. Assim, os coeficientes de força foram analisados através da razão da assimetria do domínio, medida pela distância j na Figura 3.5.

A mudança para o caso base é a aproximação do cilindro ao fundo do mar. Para isso, a condição da parede inferior também foi alterada para 'Condição de não deslizamento'. A Figura 3.5 mostra a nova configuração, onde j representa a distância do cilindro ao fundo do mar.

Figura 3.5 – Configuração das condições de contorno para a modelagem do estudo do efeito da profundidade



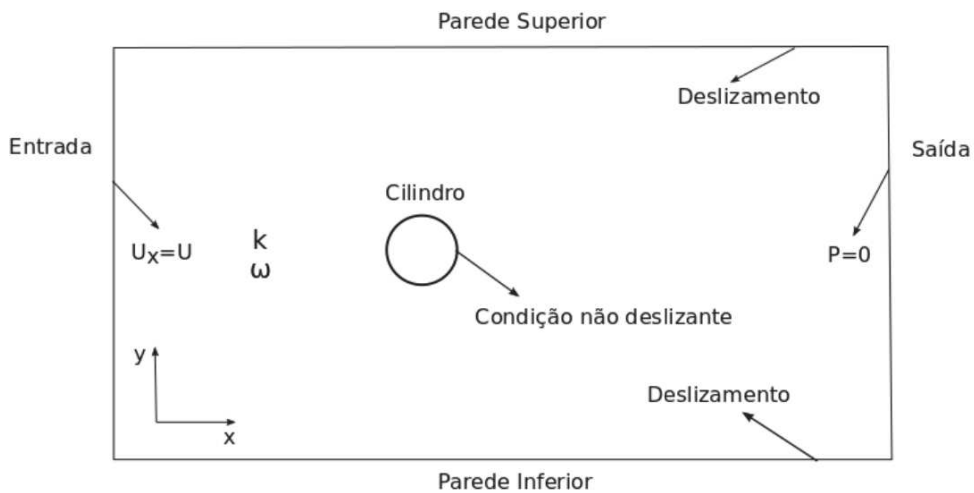
Fonte: Elaborada pelo autor.

De forma análoga ao parâmetro da seção anterior, este também foi utilizado com intuito de realizar as análises pertinentes ao estudo em questão.

3.3.4 Caso turbulento

Semelhante aos casos anteriores, a geometria de conformação do problema irá permanecer a mesma do caso base apresentado na Figura 3.3, no entanto, a diferença se dá na introdução do escoamento com alguns parâmetros de turbulência já mostrados anteriormente. Sendo assim, a Figura 3.6 apresenta tais alterações.

Figura 3.6 – Configuração das condições de contorno para a modelagem do estudo do caso turbulento



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 PARÂMETROS DA MALHA

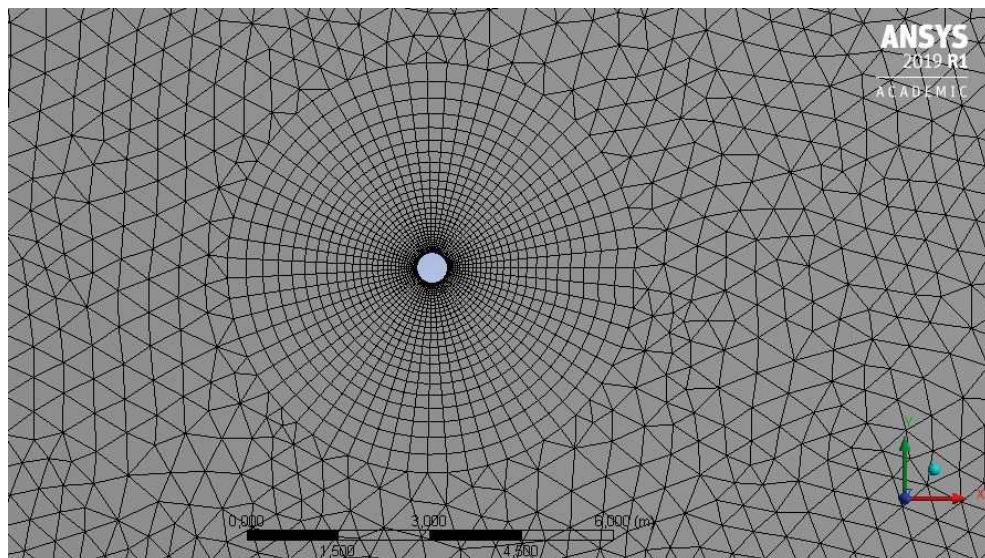
3.4.1 Caso base

A malha é desenvolvida para que a relação de aspecto seja mais alta perto dos limites do domínio externo e menor perto do cilindro. Esse arranjo é feito, pois o escoamento é previsto como sendo um escoamento desenvolvido nessa região e é a região com um forte gradiente de pressão. Portanto, a malha ao redor do cilindro deve ser mais refinada para gerar um resultado mais preciso da simulação.

O modelo consiste em uma região hexaédrica montada no corpo ao redor do cilindro com cunhas não estruturadas preenchendo o domínio restante do campo distante.

A malha/grade próxima ao cilindro é refinada modificando a escala de classificação e o tamanho do elemento no gerador de malha no ANSYS®, que utiliza o método de volumes finitos com os nós no meio do elemento, conhecendo pelo termo *cell center*. A malha pode ser vista na Figura 3.7. Essa malha possui 4220 nós e 6295 elementos.

Figura 3.7 – Configuração da malha para a simulação do caso base deste estudo



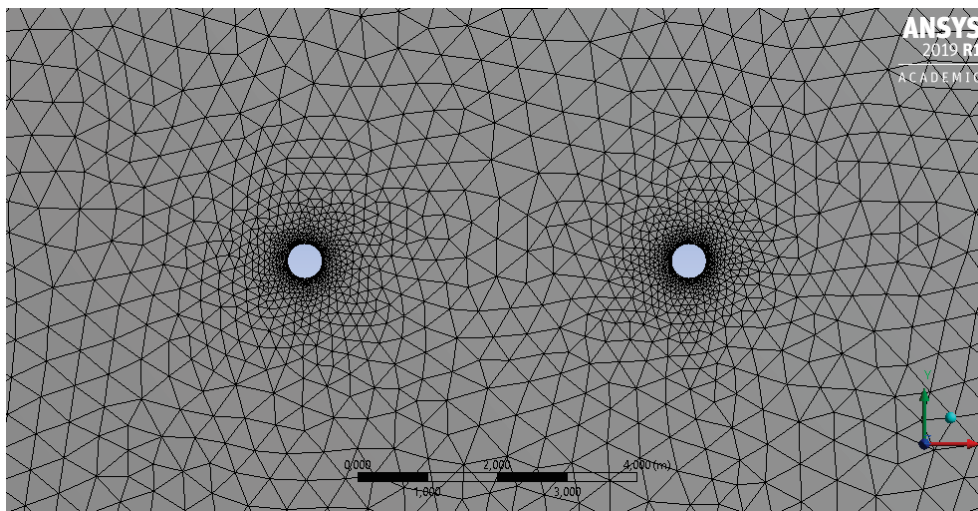
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.2 Efeito de vizinhança

A malha apresentada a seguir, segue os mesmos critérios de criação da malha anterior, porém, esta foi gerada com base na conformação do sistema com dois cilindros, representando dois risers de petróleo, por exemplo.

Com intuito de não estender muitos com a apresentação destas malhas, segue apenas como ilustração uma das malhas geradas para o estudo do efeito de fronteira, ou efeito de vizinhança. Na Figura fig. 3.8 segue a malha gerada para uma distância de 5m entre os dois cilindros em questão.

Figura 3.8 – Configuração da malha para a simulação do estudo sobre o efeito de vizinhança



Fonte: Elaborada pelo autor.

Mesmo não mostrando as malhas, os valores das distâncias e os respectivos número de nós e elementos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Número de nós e elementos para cada malha gerada no estudo sobre o efeito de vizinhança

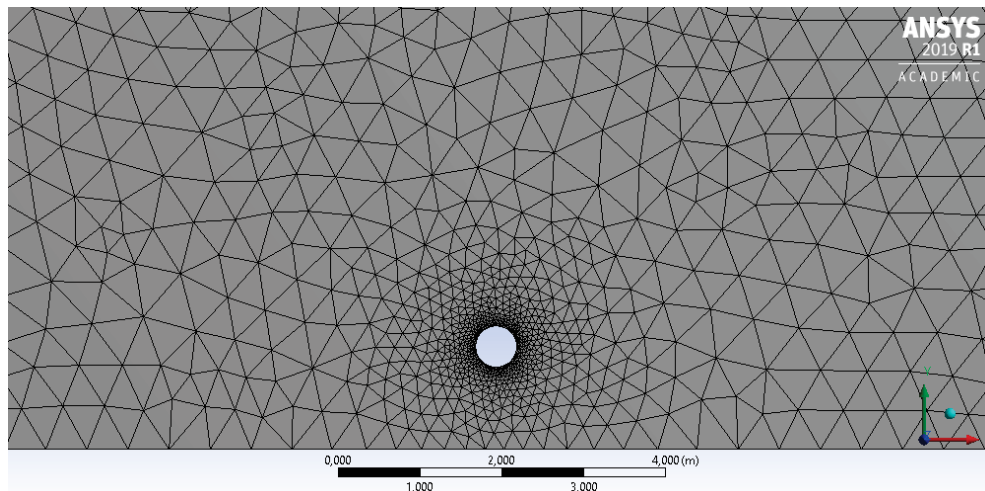
$e(m)$	e/D	Número de nós	Número de elementos
0	0	3327	6339
0,5	1	3589	6862
1	2	3688	7060
1,5	3	3704	7092
5	10	3840	7364
10	20	3798	7280
15	30	3781	7246

3.4.3 Efeito de profundidade

De forma análoga ao tópico anterior, também foram geradas inúmeras malhas com os mesmos critérios do caso base, porém, esta com uma formação do sistema com o cilindro se aproximando do leito, representando o fundo do mar, por exemplo.

Na figura fig. 3.9 segue a malha gerada para uma distância de 5m entre o cilindro e a parede inferior do domínio.

Figura 3.9 – Configuração da malha para a simulação do estudo sobre o efeito da profundidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

Mesmo não mostrando as malhas, os valores das distâncias e os respectivos número de nós e elementos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Número de nós e elementos para cada malha gerada no estudo sobre o efeito da profundidade

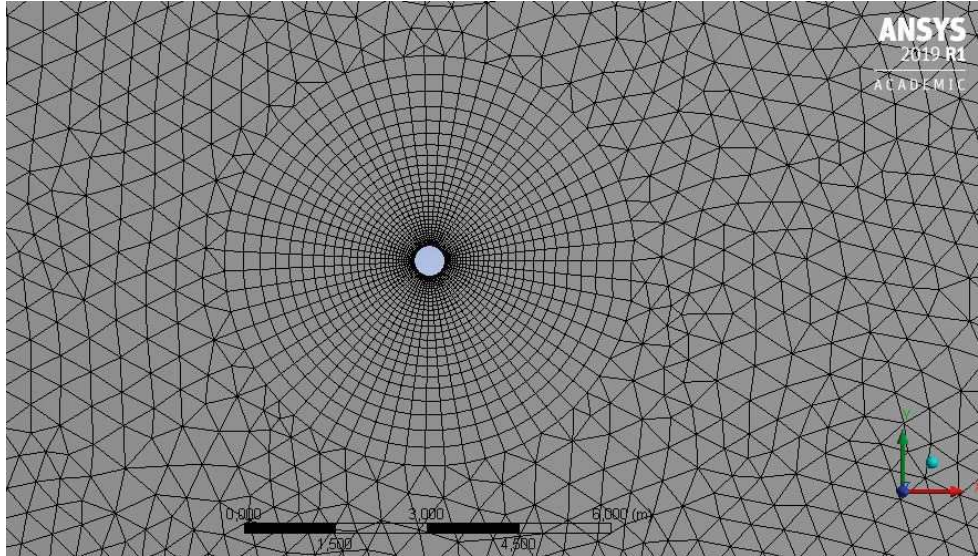
$j(m)$	j/D	Número de nós	Número de elementos
0	0	2973	5662
0,25	0,5	3093	5912
0,5	1	3182	6094
0,75	1,5	3215	6163
5	10	4246	6347
10	20	4220	6295

3.4.4 Caso turbulento

A malha utilizada para o estudo do caso que envolve os modelos de turbulência é apresentada na Figura 3.10. Pode-se observar que é semelhante à malha do apresentada

na Figura 3.7, uma vez que não foi necessário um forte refinamento da malha em questão para obtermos resultados satisfatórios neste modelo.

Figura 3.10 – Configuração da malha para a simulação do estudo sobre o caso turbulento



Fonte: Elaborada pelo autor.

A malha utilizada para as simulações do caso turbulento possui 4220 nós e 6295 elementos.

3.5 PARÂMETROS DE CONTROLE DA SOLUÇÃO

A discretização em volume finito é essencial para que todos os termos da equação possam ser resolvidos. Neste trabalho, o método de discretização utilizado para o gradiente foi baseado no método de mínimos quadrados.

O integrador temporal escolhido para a simulação de escoamento turbulento no ANSYS® Fluent é composto por uma formulação explícita de Euler. E como resultado é necessário um número baixo de Courant para manter a estabilidade numérica fornecida em 3.1, em que Δt é o intervalo de tempo e Δx é a largura mínima da célula da malha em questão. Foi utilizado Courant igual a 0,2 em todos os casos, uma vez que os parâmetros das malhas e o intervalo de tempo são iguais em todos os casos deste estudo.

$$Cr = \frac{U \Delta t}{\Delta x} \quad (3.1)$$

Quanto mais alto for a relação indicada pelo número de Courant, mais complicada fica a simulação e mais difícil se torna a sua convergência.

3.6 PÓS-PROCESSAMENTO

Em ambos modelos estudados neste trabalho, são utilizados os mesmos parâmetros de pós-processamento listados a seguir. Assim conseguimos comparar melhor os resultados obtidos.

De acordo com Blazek (33), os coeficientes de força, como o de arrasto (Cd) e sustentação (Cl) no cilindro, poderiam ser extraídos da Eq. (3.2) e da Eq. (3.3), onde L é o comprimento do tubo, z é a 3ª dimensão como já mencionado anteriormente e, F_D e F_L são forças de arrasto e sustentação, respectivamente.

$$Cd = \frac{F_D}{0,5\rho LDU^2} \quad (3.2)$$

$$Cl = \frac{F_L}{0,5\rho LDU^2} \quad (3.3)$$

O coeficiente de arrasto médio $\bar{C}d$ pode ser obtido por:

$$\bar{C}d = \frac{\bar{F}_D}{0,5\rho LDU^2} \quad (3.4)$$

Já a amplitude do coeficiente de sustentação ou rms de Cl , $\check{C}l$ pode ser obtida na Eq. 3.5, onde n é o número total de pontos.

$$\check{C}l = \frac{\sqrt{\frac{F_{L1}^2 + F_{L2}^2 + \dots + F_{Ln}^2}{n}}}{0,5\rho DU^2} \quad (3.5)$$

O número de Strouhal pode ser extraído da Eq. (3.6), onde f_v é a frequência de desprendimento de vórtice em Hz.

$$St = \frac{f_v D}{U} \quad (3.6)$$

A visualização dos resultados das simulações podem ser vistas no ANSYS® e será apresentada na próxima sessão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos da pesquisa. Primeiramente, apresentam-se os resultados para o caso laminar. Efeitos de vizinhança e da proximidade ao solo são considerados. Na sequência, é feito um estudo sobre o efeito da intensidade de turbulência nas simulações.

4.1 LAMINAR

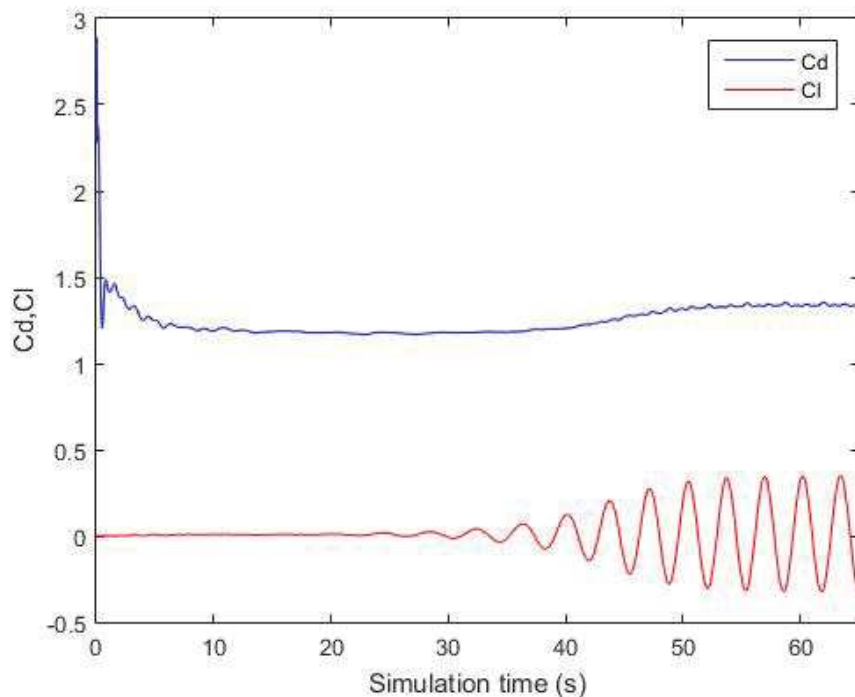
Primeiramente, um cilindro isolado foi analisado e os resultados comparados com a literatura, a fim de validar o modelo computacional.

Depois disso, foram feitas várias simulações tanto variando a distância entre o cilindro inicial e um segundo cilindro, como variando a distância do cilindro inicial para o leito inferior.

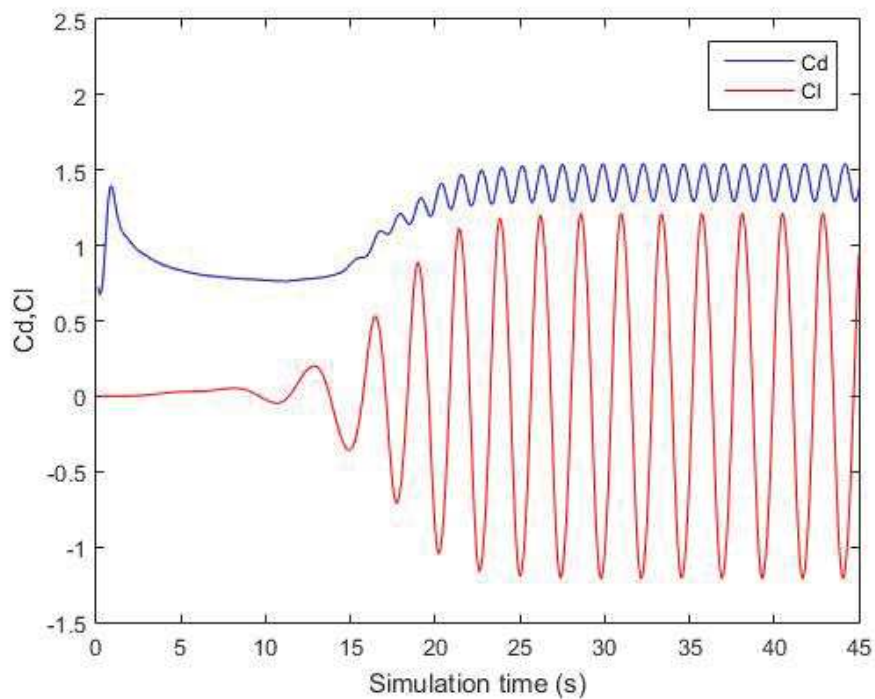
Os números de Reynolds adotados nesta parte do trabalho foram de 100 e 1000.

4.1.1 Caso base

Para validar a modelagem desenvolvida no ANSYS®, foi escolhido o caso de um escoamento laminar em um cilindro para o número de Reynolds de 100 e 1000. Os coeficientes de força C_l e C_d em função do tempo foram obtidos como resultado da simulação e são mostrados na Figura 4.1 para número de Reynolds igual a 100 e na Figura 4.2 para $Re=1000$.

Figura 4.1 – Histórico no tempo dos coeficientes de arrasto e sustentação para $Re=100$ 

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.2 – Histórico no tempo dos coeficientes de arrasto e sustentação para $Re=1000$ 

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 4 mostra o coeficiente médio de arrasto, amplitude do coeficiente de sustentação e número de Strouhal obtidos neste estudo e os resultados de outros na literatura para $Re=100$. A comparação dos parâmetros com os trabalhos de referência foi satisfatória.

Tabela 4 – Comparação dos coeficientes aerodinâmicos do estudo em questão com a literatura para $Re=100$

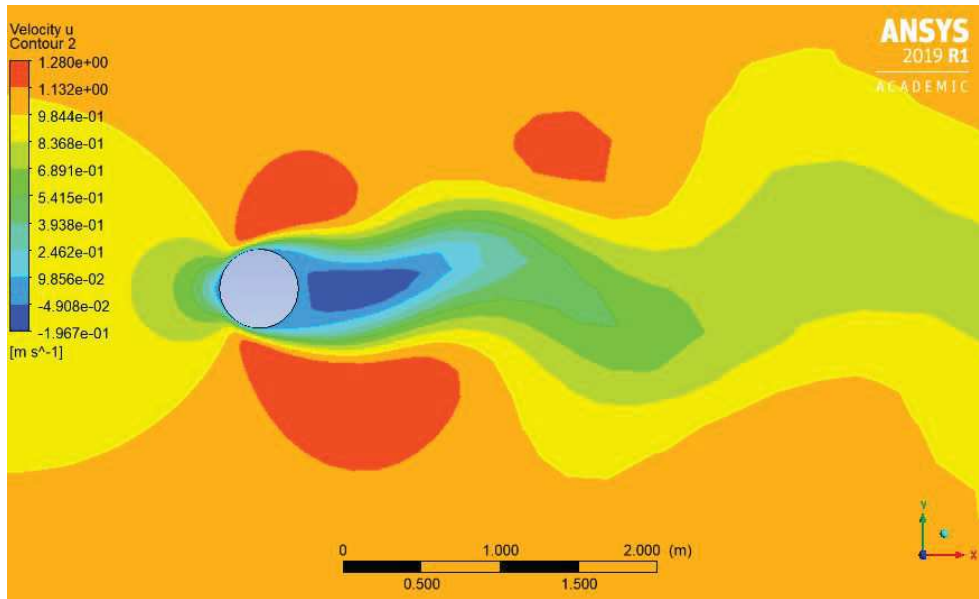
Fonte	\overline{Cd}	\overline{Cl}	Número de Strouhal
Behr et al. (11)	1,37	0,371	0,167
Mittal and Raghuvanshi (12)	1,402	0,355	0,168
Berthelsen and Faltinsen (13)	1,38	0,34	0,169
Tawekal (14)	1,361	0,338	0,163
Presente trabalho	1,339	0,345	0,167

Já a Tabela 5 mostra o coeficiente médio de arrasto, amplitude do coeficiente de sustentação e número de Strouhal obtidos neste estudo e os resultados de outros na literatura para $Re=1000$. A comparação dos parâmetros com os trabalhos de referência também foi considerada satisfatória.

Tabela 5 – Comparação dos coeficientes aerodinâmicos do estudo em questão com a literatura para $Re=1000$

Fonte	\overline{Cd}	\overline{Cl}	Número de Strouhal
Tawekal (14)	1,35	1,24	0,22
Franke and Schönung (9)	1,47	1,36	0,2
Presente trabalho	1,42	1,23	0,21

Também foi gerado o perfil de velocidade horizontal para esta simulação, como segue na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Visualização do perfil de velocidades horizontal para $Re=100$ 

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.2 Efeito de vizinhança

Sob o regime laminar com número de Reynolds igual a 100, foi realizado um estudo da influência da proximidade de um riser sobre o outro. Assim, os coeficientes de força foram obtidos e analisados em função da distância de um cilindro ao outro.

A única alteração no caso base é a inserção de um segundo cilindro no domínio estudado, com uma distância ' e ' do primeiro cilindro, conforme indicado na Figura 3.4.

Casos com diferentes valores de razão de gap (e/D) foram simulados e os resultados de Cd , Cl e St para cada cilindro podem ser observados na Tabela 6. Os subíndices 1 fazem referência ao cilindro da esquerda, já o subíndice 2 faz referência ao cilindro da direita. Nesta tabela também são mostrados os valores obtidos do caso base.

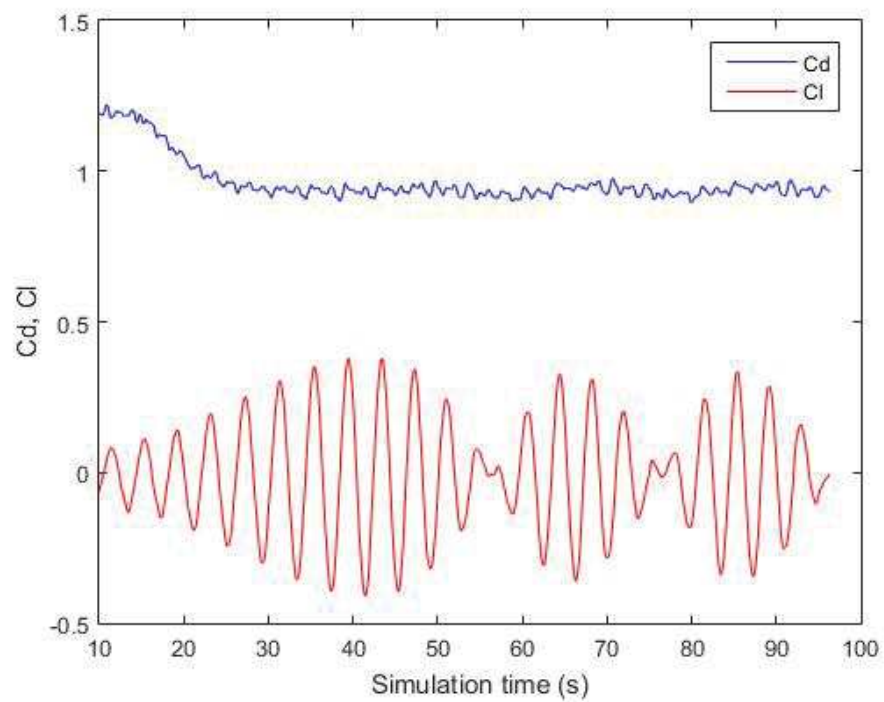
Tabela 6 – Comparação dos coeficientes hidrodinâmicos com a distância entre os cilindros para $Re=100$

$e(m)$	e/D	\overline{Cd}_1	\overline{Cl}_1	St_1	\overline{Cd}_2	\overline{Cl}_2	St_2
0	0	1,16	0,006	0,13	-0,04	0,007	0,1
0,5	1	1,18	0,02	0,07	-0,07	0,002	0,05
1	2	1,15	0,002	0,1	-0,02	0,004	0,07
1,5	3	1,23	0,36	0,13	0,53	1,14	0,13
10	20	1,27	0,28	0,13	0,84	0,33	0,13
15	30	1,27	0,32	0,14	0,93	-	-
Caso base		$\overline{Cd} = 1,339$		$\overline{Cl} = 0,345$	$St = 0,167$		

Os valores de \overline{Cl}_2 e St_2 não foram contabilizados no caso de $e/D = 30$, pois houve

a ocorrência do fenômeno de batimento como mostrado na Figura 4.4

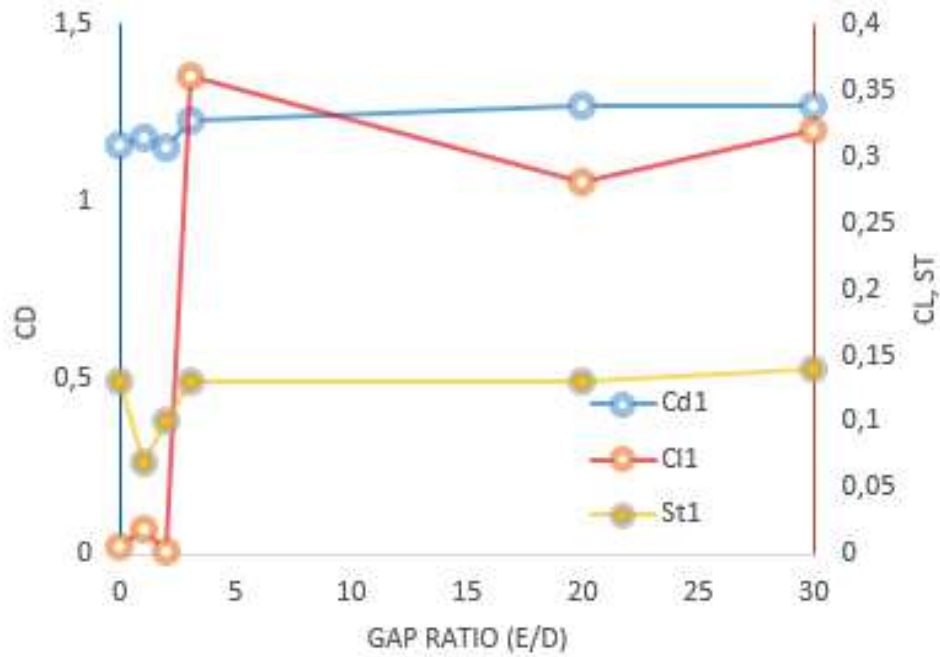
Figura 4.4 – Histórico no tempo dos coeficientes de arrasto e sustentação para o segundo cilindro e $Re=100$



Fonte: Elaborada pelo autor.

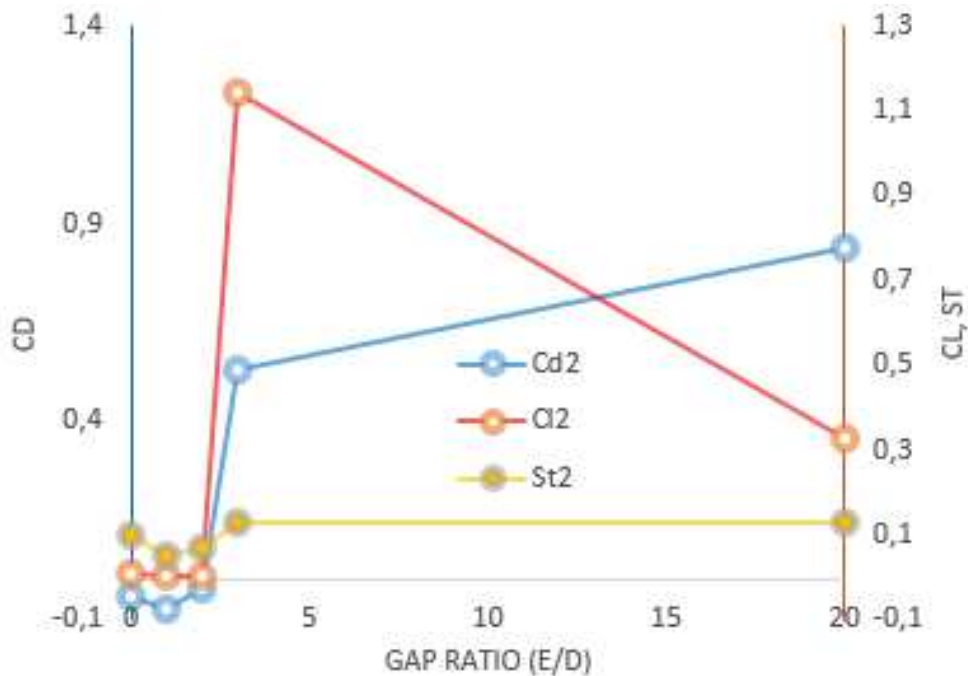
Essas informações também são apresentadas nos gráficos das Figuras 4.5 para o cilindro da esquerda e Figura 4.6 para o cilindro da direita.

Figura 4.5 – \overline{Cd} e \overline{Cl} em função da razão de Gap (e/D) para o cilindro da esquerda



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.6 – \overline{Cd} e \overline{Cl} em função da razão de Gap (e/D) para o cilindro da direita



Fonte: Elaborada pelo autor.

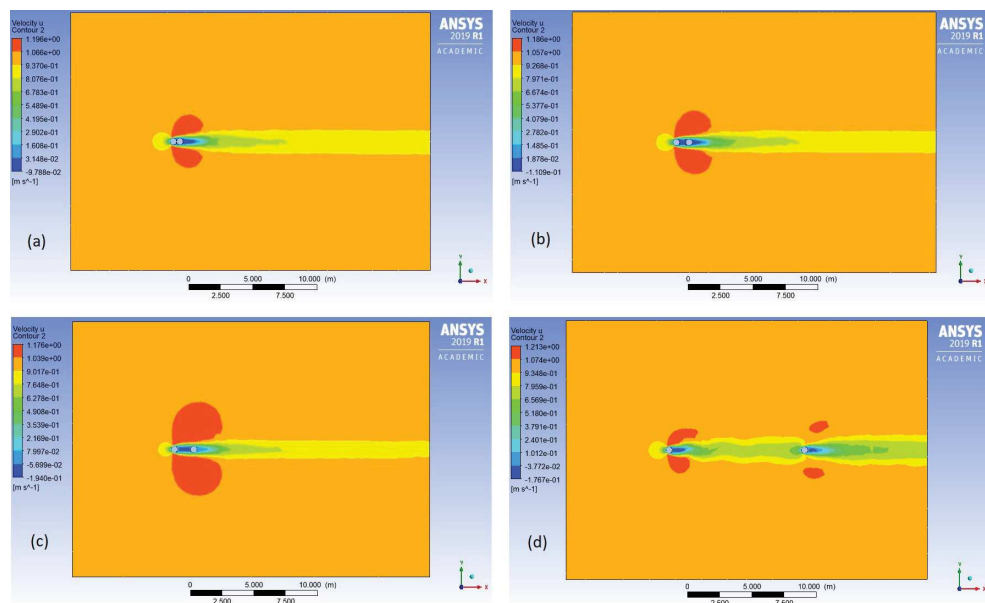
Pode ser observado na Tabela 4 e nos gráficos das Figuras 4.5 e 4.6 que os valores dos coeficientes aerodinâmicos para o primeiro cilindro variam ligeiramente em relação

ao caso base para valores maiores de e/D . Por outro lado, há uma forte variação para valores menores de e/D e isso se deve ao efeito da esteira que o segundo cilindro causa no primeiro cilindro. O mesmo comportamento não é observado no cilindro 2. Quando o valor e/D é 3, há uma mudança de sinal no valor de $\overline{C}d_2$. Isso indica que a partir de então os corpos se comportam de fato como distintos.

Quando a distância e aumenta, os coeficientes do segundo cilindro se aproximam do valor do caso base, isso se deve ao fato de a influência do primeiro cilindro no segundo tender a zero. No entanto, a influência do primeiro cilindro no segundo é maior que o caso anterior para $\overline{C}d_2$ e $\check{C}l_2$. Em relação ao número de Strouhal, foram observadas maiores variações para a menor relação e/D .

Também é observado na Figura 4.7 o perfil de velocidades horizontais para alguns dos casos estudados. Observa-se que para baixas distâncias entre os cilindros, ou seja, um valor menor de e possui uma região de velocidade considerada nula, aparecendo como se não fossem dois corpos, mas sim, apenas um. E à medida que os cilindros se afastam, a região se estreita, até o segundo cilindro ter o perfil de velocidade semelhante ao primeiro.

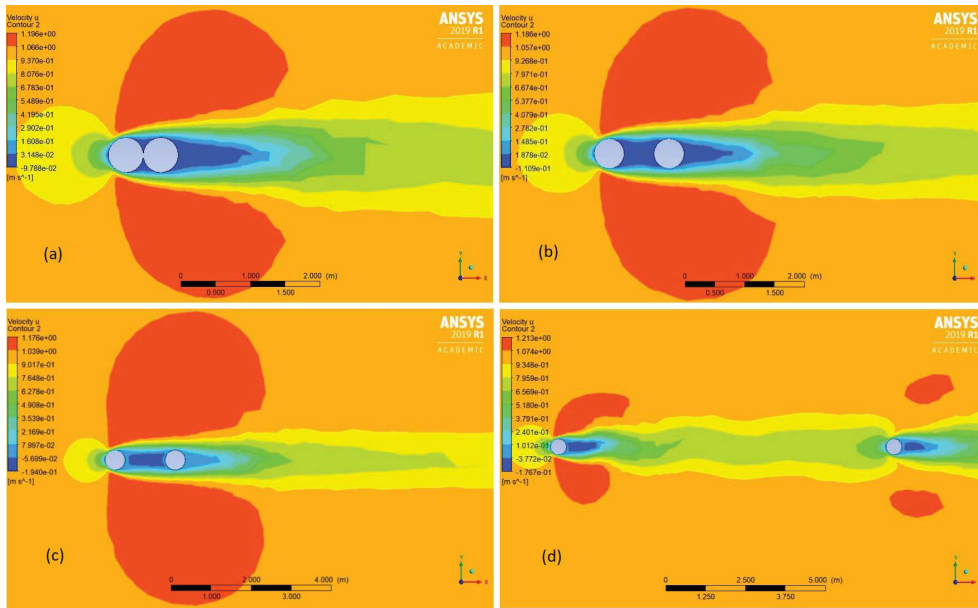
Figura 4.7 – Visualização do perfil de velocidades horizontal para (a) $e = 0$, (b) $e = 0,5$, (c) $e = 1$ e (d) $e = 10$



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o intuito de melhor visualizar, a Figura 4.8 trás um zoom da imagem anterior.

Figura 4.8 – Zoom da visualização do perfil de velocidades horizontal para (a) $e = 0$, (b) $e = 0,5$, (c) $e = 1$ e (d) $e = 10$



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.3 Efeito de profundidade

Como destacado anteriormente, o objetivo deste estudo é a análise da influência nos parâmetros aerodinâmicos da proximidade do cilindro a uma superfície plana. Esta situação é semelhante a de um riser próximo a leito marítimo. Adicionalmente, investigou-se a influência do número de Reynolds, conduzindo-se simulações para $Re = 100$ e $Re = 1000$.

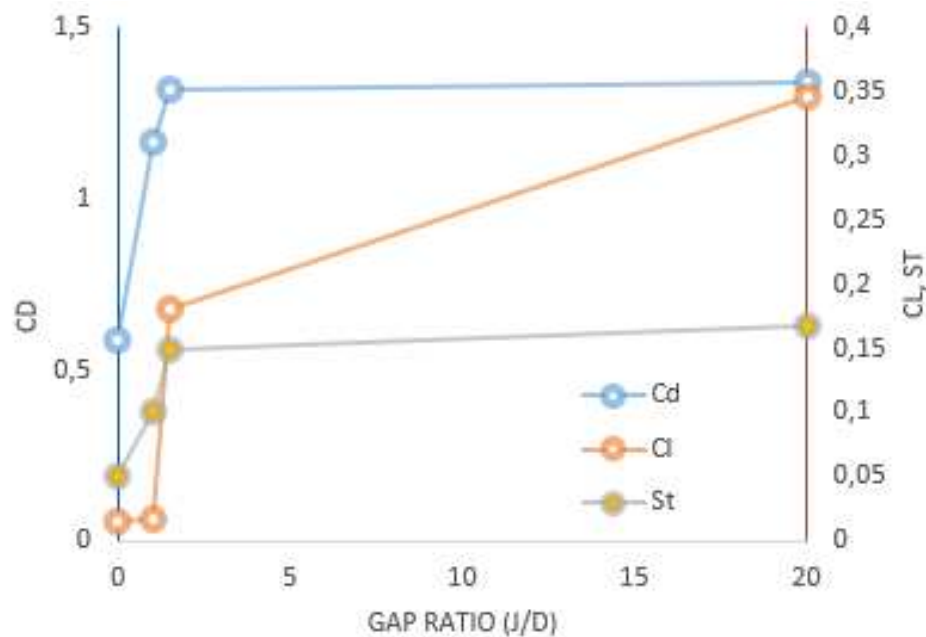
A mudança para o caso base é a aproximação do cilindro ao fundo do mar, como ilustrado na Figura 3.5. Para isso, a condição da parede inferior foi alterada para "Condição de não deslizamento". Os coeficientes de força foram analisados através da razão j/D , onde j é a distância do cilindro à base e D o diâmetro e para os dois valores de número de Reynolds. Os resultados estão apresentados na Tabela 7, onde também são mostrados os valores obtidos para os casos base.

Tabela 7 – Comparação dos coeficientes aerodinâmicos para $Re=100$ e $Re=1000$ com a distância à superfície plana

Reynolds number		100				1000			
$j(m)$	j/D	$\overline{C_d}$	$\overline{C_l}$	\check{C}_l	St	$\overline{C_d}$	$\overline{C_l}$	\check{C}_l	St
0	0	0,59	0,36	0,016	0,05	0,67	0,672	0,013	-
0,5	1	1,167	0,07	0,018	0,1	1,09	0,092	0,73	0,15
0,75	1,5	1,32	0,003	0,18	0,15	0,879	0,087	0,389	0,139
5	10	1,36	0,02	0,33	0,167	-	-	-	-
10	20	1,339	0,007	0,345	0,167	1,42	0,003	1,23	0,21
Caso base		1,339	0	0,345	0,167	1,42	0	1,23	0,21

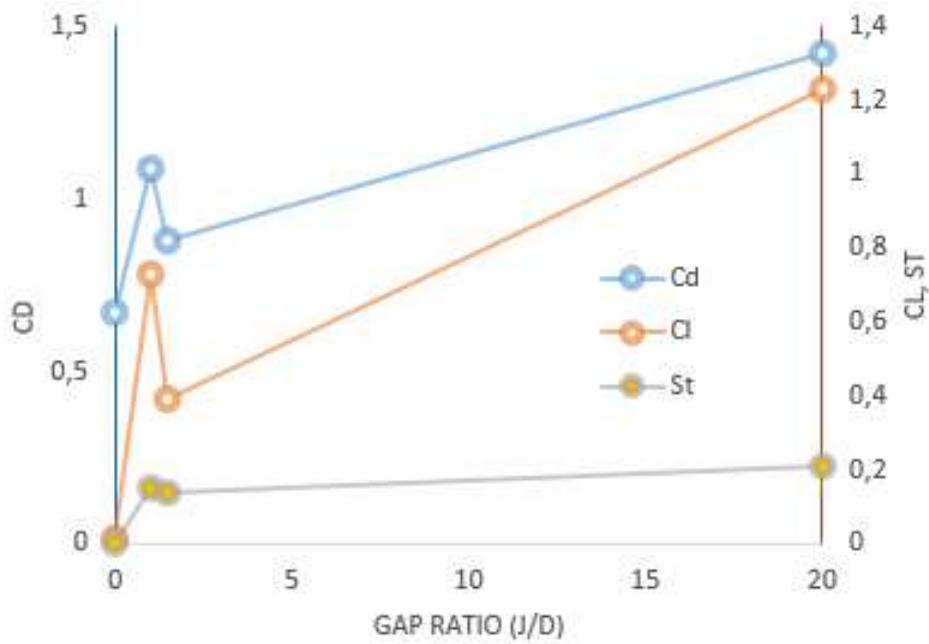
Nas Figuras 4.9 e 4.10 é possível observar as variações dos coeficientes aerodinâmicos com relação a razão j/D , para $Re = 100$ e $Re = 1000$, respectivamente. Para facilitar a visualização da influência do número de Reynolds em cada coeficiente, as mesmas informações são apresentadas nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13, onde as variações de cada coeficiente com j/D são representadas separadamente. Adicionalmente, são apresentadas nas Figuras 4.14 a 4.21 a evolução dos coeficientes de força ao longo do tempo de simulação, para os dois valores de número de Reynolds. Para evitar informações excessivas, neste último caso optou-se por apresentar os resultados para as razões $j/D = 0; 1, 0; 1, 5$ e 20 . Na Figura 4.22 tem-se uma ilustração do perfil de velocidades horizontais em função de diferentes valores de j e $Re = 100$.

Figura 4.9 – \bar{C}_d , \bar{C}_l e St em função da razão (j/D) para $Re=100$



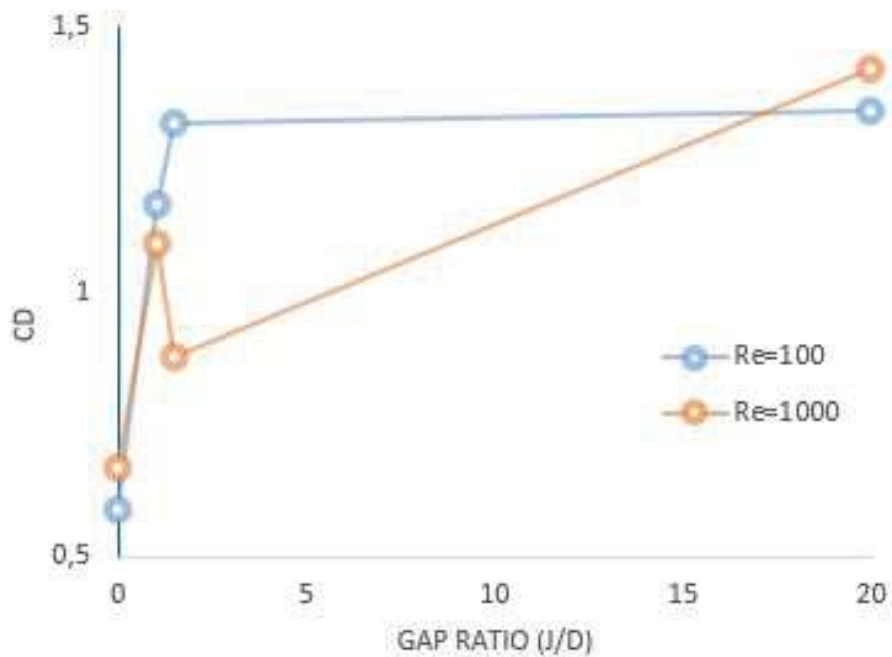
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.10 – $\overline{C_d}$, $\overline{C_l}$ e St em função da razão (j/D) para $Re=1000$



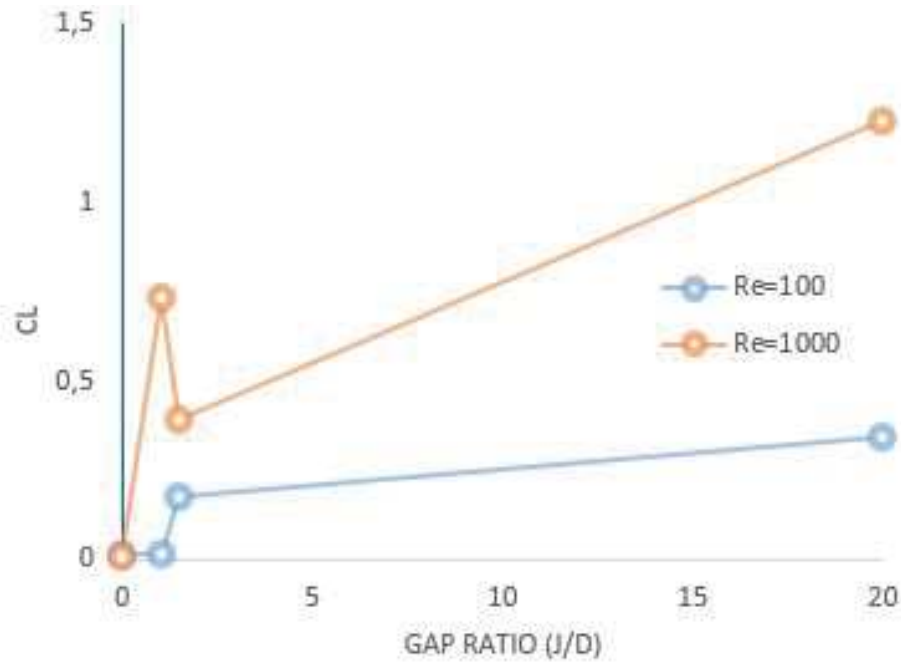
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.11 – Coeficiente de arrasto em função da razão (j/D)



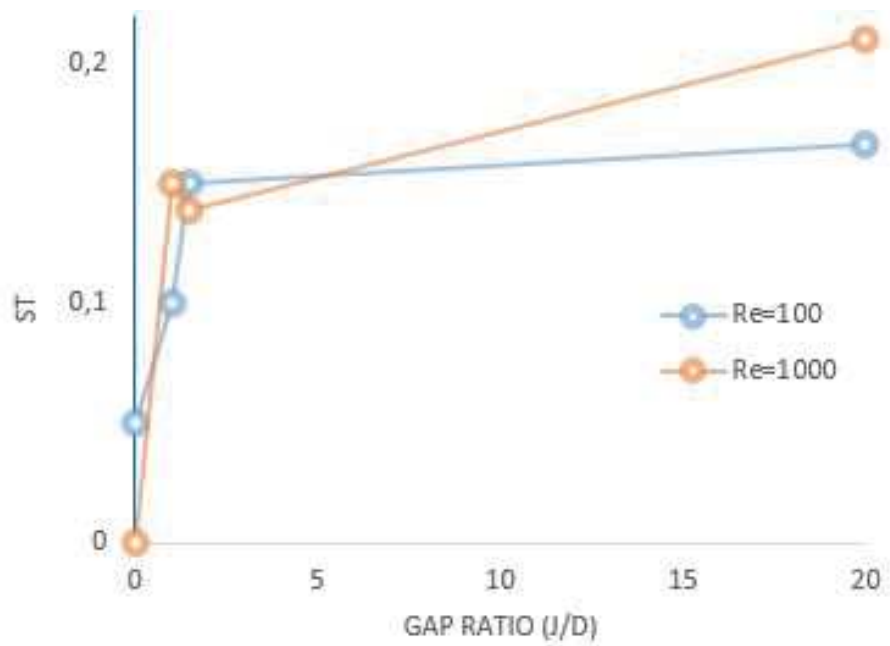
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.12 – Flutuação do coeficiente de sustentação em função da razão (j/D)



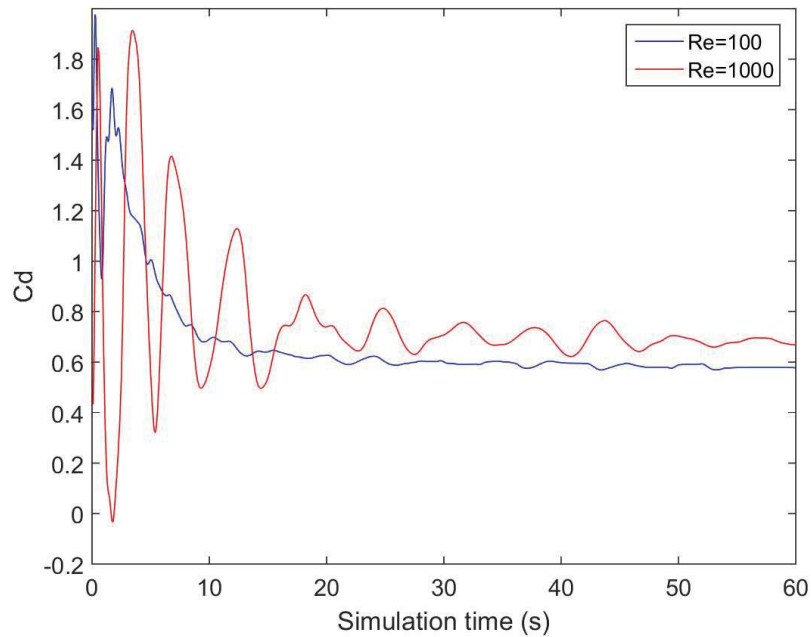
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.13 – Número de Strouhal em função da razão (j/D)



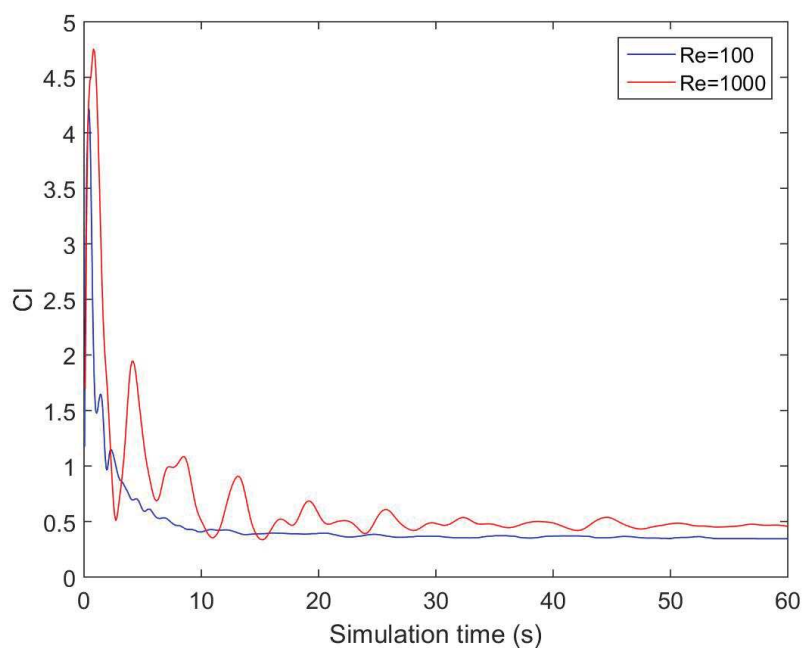
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.14 – Comparação dos coeficientes de arrasto entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 0$



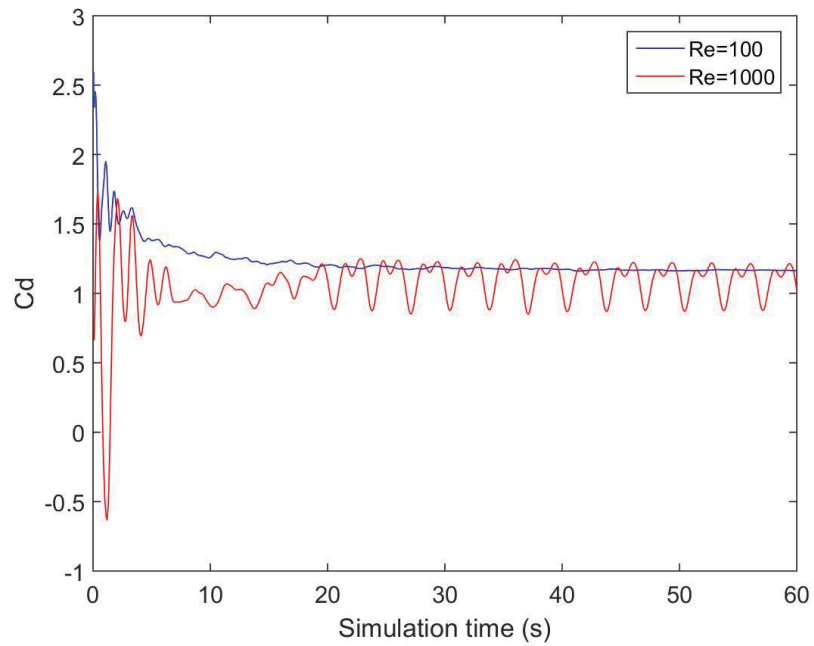
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.15 – Comparação dos coeficientes de sustentação entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 0$



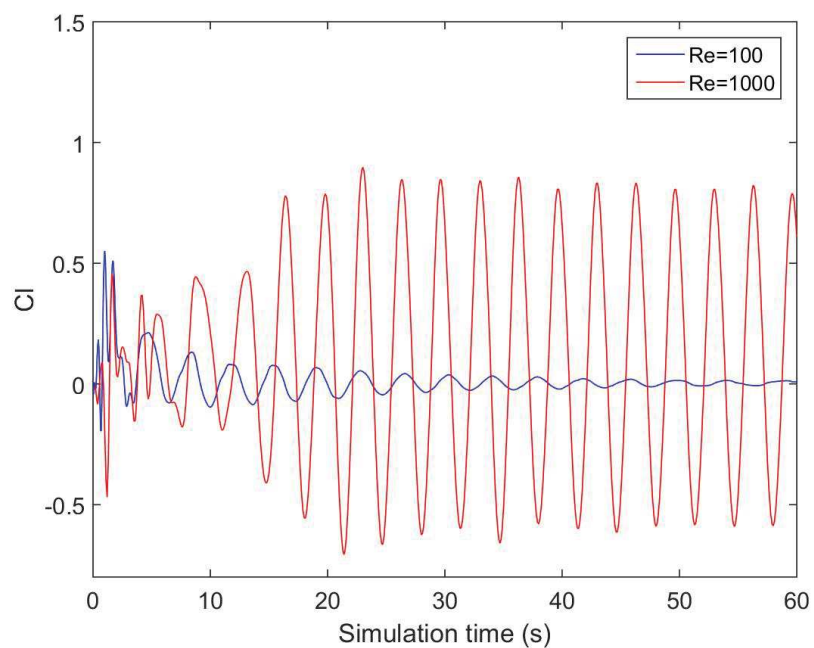
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.16 – Comparação dos coeficientes de arrasto entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 1$



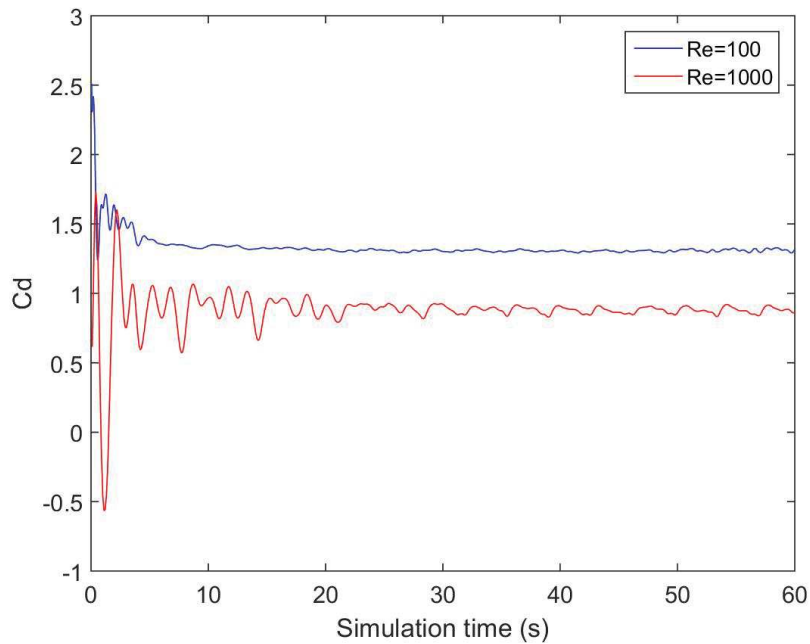
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.17 – Comparação dos coeficientes de sustentação entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 1$



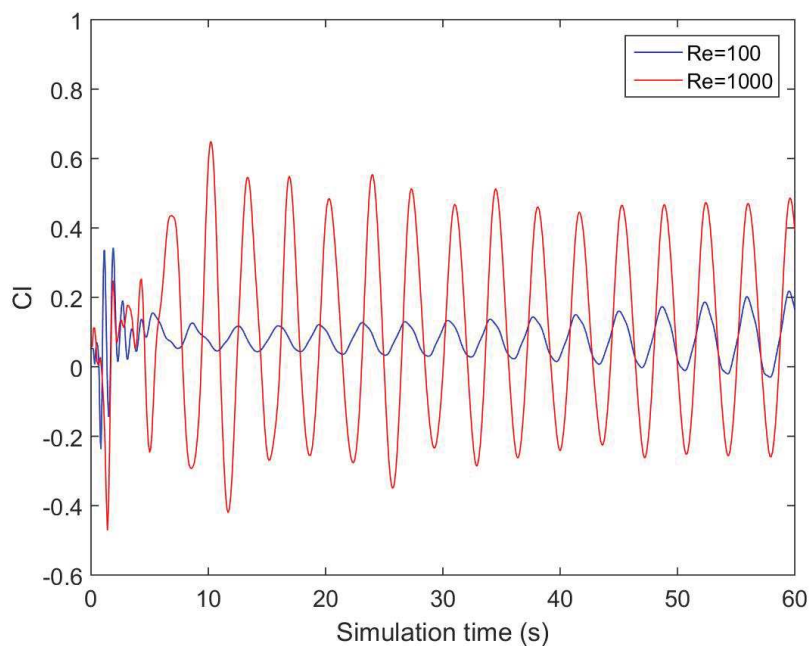
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.18 – Comparação dos coeficientes de arrasto entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 1,5$



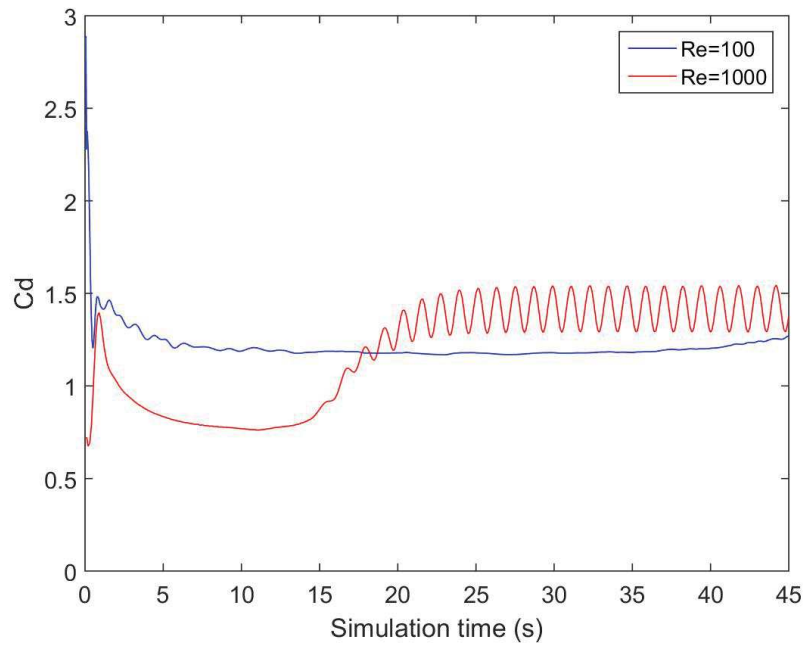
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.19 – Comparação dos coeficientes de sustentação entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 1,5$



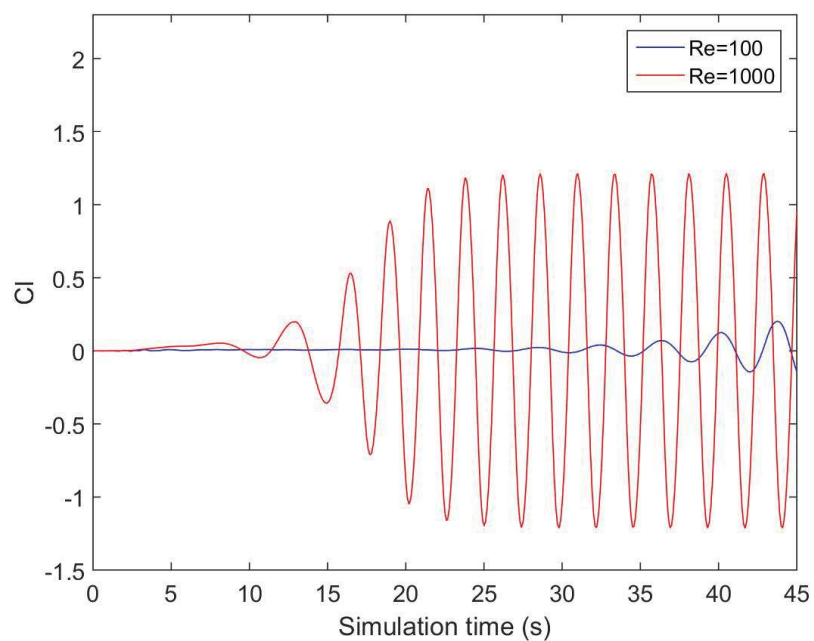
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.20 – Comparação dos coeficientes de arrasto entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 20$



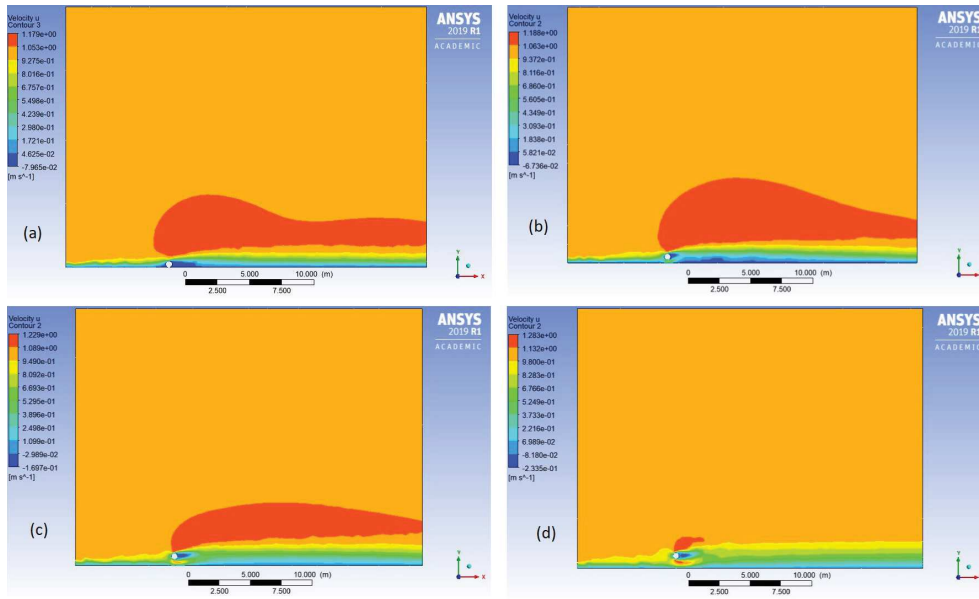
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.21 – Comparação dos coeficientes de sustentação entre $Re=100$ e $Re=1000$ para $j/D = 20$



Fonte: Elaborada pelo autor.

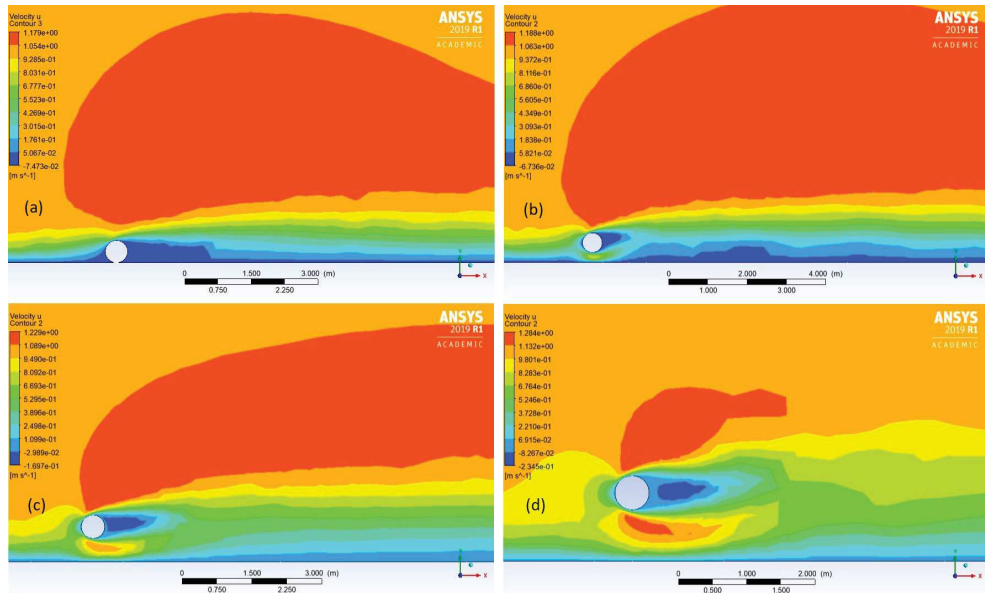
Figura 4.22 – Visualização do perfil de velocidades horizontal para (a) $j = 0$, (b) $j = 0, 25$, (c) $j = 0, 5$ e (d) $j = 0, 75$ para $Re=100$



Fonte: Elaborada pelo autor.

Da mesma forma que na subsecção anterior, aqui também há uma ampliação das imagens próximas aos obstáculos, que foi apresentada na Figura 4.23.

Figura 4.23 – Zoom da visualização do perfil de velocidades horizontal para (a) $j = 0$, (b) $j = 0,25$, (c) $j = 0,5$ and (d) $j = 0,75$ para $Re=100$



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que, quando o cilindro estava apoiado totalmente no fundo do mar, os valores de \overline{Cd} e \overline{Cl} e St variavam significativamente. À medida que a relação j/D aumenta, ou seja, com o destacamento do cilindro da parede inferior, percebe-se a tendência de retorno dos valores dos parâmetros estudados para perto dos valores do caso base. Este comportamento é observado para os dois valores do número de Reynolds.

O escoamento médio em torno do cilindro próximo à parede não é simétrico; portanto, uma sustentação média diferente de zero deve existir. No caso de um cilindro livre, a média quase nula do coeficiente de sustentação é atribuída à simetria do escoamento. Observa-se a partir dos valores de \overline{Cl} que, à medida que j/D diminui, ou seja, o cilindro se aproxima do fundo do mar, a simetria desaparece, obtendo assim um coeficiente de sustentação médio cada vez mais distante zero e com um valor significativo. Isso também pode ser observado na comparação entre o perfil de velocidade horizontal para $Re = 100$ ilustrados na Figura 4.22.

O trabalho experimental de Bearman and Zdravkovich (34) mostrou que a distribuição de pressão ao redor do cilindro para pequenos espaçamentos é caracterizado por um deslocamento do ponto de estagnação frontal em direção às folgas e pela interação da espessura da camada limite do cilindro e da superfície da parede. O movimento do ponto de estagnação frontal em direção à parede está associado à geração de uma sustentação vertical ascendente da parede. Os movimentos dos pontos de separação com um aumento

da pressão base resultam em um coeficiente de arrasto reduzido (Sarkar and Sarkar (35)). A camada de cisalhamento inferior do cilindro é suprimida devido à camada limite da parede, que também afeta a pressão base Sarkar and Sarkar (35). Esse comportamento pode explicar os valores mais baixos de $\bar{C}d$ para $j/D = 0$.

Quando o cilindro toca a parede, não há o descolamento regular de vórtices, como evidenciado na Figura 4.15. Essa inibição é mais forte para o valor mais baixo do número de Reynolds, igual a 100 neste estudo. Nesse caso, a parede inibiu a formação de vórtice cadenciados. Alguns autores, como Tawekal (14), Bearman and Zdravkovich (34), Sarkar and Sarkar (35), Taneda (36), relataram o mesmo comportamento no número de Strouhal.

Além disso, como evidenciado por Taneda (36), que conduziu um trabalho experimental com $Re = 170$ em uma situação semelhante e para $j/D = 0,1$. Este autor concluiu que há apenas uma única linha de vórtices, enquanto para $j/D = 0,6$ foi observada uma forte linha regular de vórtices. Em nossas simulações, isso é notável ao comparar os resultados de $j/D = 0$ a $j/D = 1$. Na última situação, as respostas Cl se tornam mais regulares, principalmente para $Re = 1000$.

O valor mais alto de $\bar{C}d$ e $\bar{C}l$ para $j/D = 1$ no intervalo de j/D entre 0 e 1,5 e $Re = 1000$ pode ser associado à alta correlação da espessura da camada limite entre o fundo do mar e o cilindro. Essa influência é fraca para $Re = 100$, talvez devido à camada delgada mais fina no cilindro e na parede.

4.2 TURBULENTO

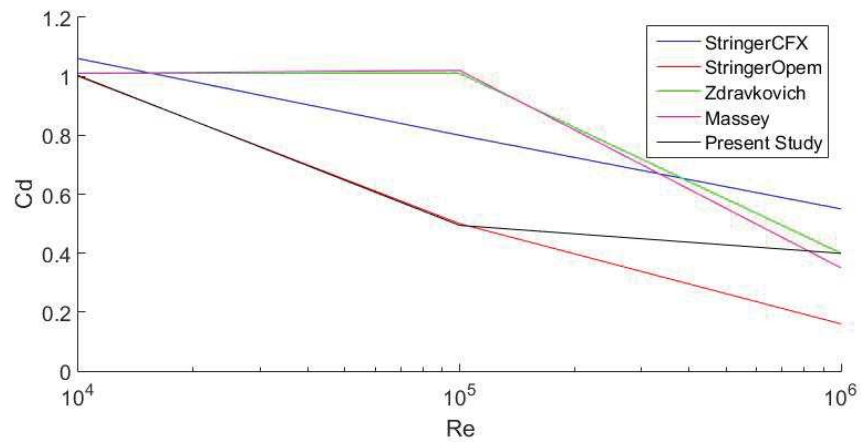
Nesta seção mostram-se os resultados obtidos para simulações em escoamento turbulento. Uma comparação com a literatura é realizada primeiro para validar o modelo proposto. A seguir, é apresentado um estudo dos efeitos de intensidade turbulenta no número de Strouhal, coeficientes de arrasto e sustentação para esses números de Reynolds na faixa do escoamento turbulento.

4.2.1 Caso base

Para validar o modelo no ANSYS®, foi escolhido o caso de um escoamento turbulento em um cilindro para o número de Reynolds de 10^4 , 10^5 e 10^6 . Os parâmetros de turbulência foram $I = 2,5\%$ e $\beta = 0,075$. Os coeficientes de força Cl e Cd em função do número de Reynolds foram obtidos como resultado das simulações.

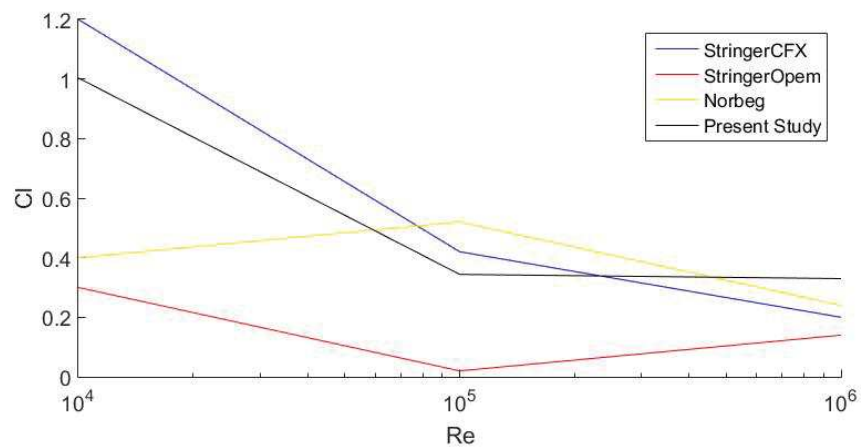
As figuras 4.24 a 4.26 mostram o valor médio do sinal Cd , a variação das rms do sinal Cl e o número de Strouhal, respectivamente, com o número de Reynolds. Uma comparação com a literatura também é fornecida a seguir (Massey and Ward-Smith (37), Stringer et al. (6), Zdravkovich (1), Norberg (38)).

Figura 4.24 – Comparação dos valores de \overline{Cd} em função do número de Reynolds com a literatura



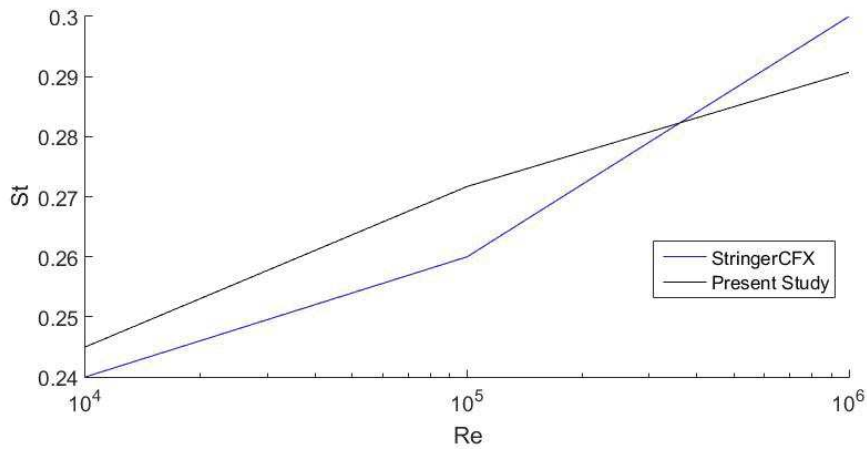
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.25 – Comparação dos valores de \overline{Cl} em função do número de Reynolds com a literatura



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.26 – Comparação dos valores de St em função do número de Reynolds com a literatura



Fonte: Elaborada pelo autor.

Existe uma concordância razoável entre os presentes resultados com a literatura. O comportamento das curvas permite algumas observações, citadas a seguir:

- Alguns autores identificaram o intervalo $1 \times 10^3 < Re < 2 \times 10^5$ como regime de transição da camada de cisalhamento Rosetti et al. (39). Nesse regime subcrítico, a função base aumenta e a região de recirculação média diminui. Esta tendência é causada pelo desenvolvimento de instabilidades nas camadas limites de cisalhamento acompanhadas de um aumento no arrasto, enquanto o ponto de transição laminar-turbulenta nas camadas de cisalhamento de separação se movem a montante, à medida que Re aumenta Rosetti et al. (39).

No regime crítico de transição, aproximadamente $2 \times 10^5 < Re < 5 \times 10^5$, a função base e o arrasto diminuem acentuadamente, principalmente associados a separação e recolamento da bolha de separação. O descolamento ocorre muito mais a jusante e causando uma esteira mais estreita. Esse fenômeno é conhecido como crise de arrasto. Neste ponto, a maior parte da camada de cisalhamento é turbulenta, enquanto a camada limite ainda é laminar Rosetti et al. (39).

Essas informações são consistentes com os resultados apresentados na Figura 4.24 e concisas com as apresentadas na Tabela 1.

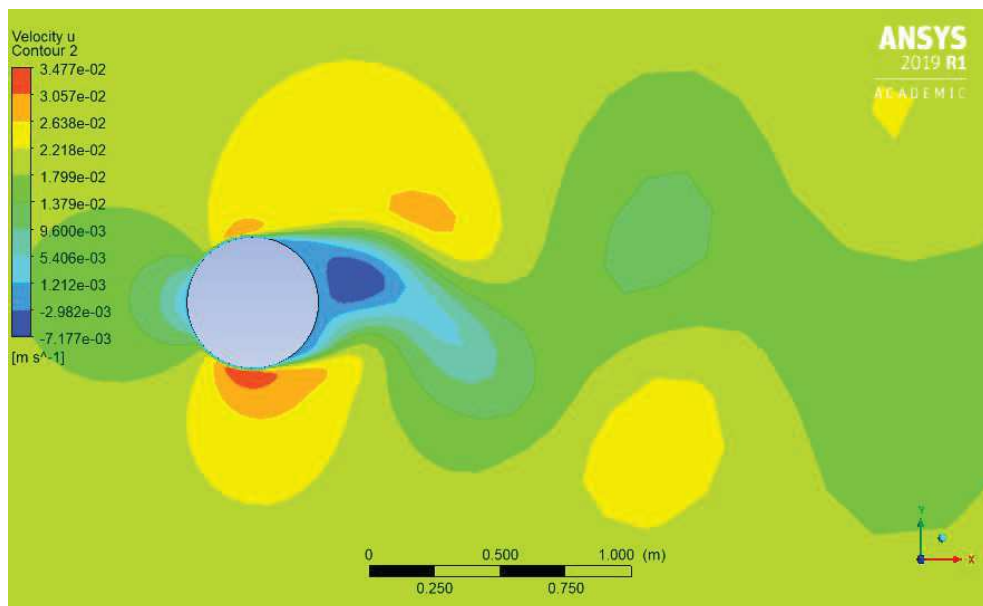
- Como pode ser visto, a rms da força de sustentação na Figura 4.25 em regime subcrítico apresenta uma grande divergência nos valores apresentados. Os valores da presente simulação foram superiores a alguns casos da literatura. Na região crítica, existe uma melhor convergência entre os resultados. Os leitores devem ter em mente que as flutuações do coeficiente de sustentação é dominada pelas ações do fenômeno

periódico de descolamento de vórtices, a principal fonte de vibração induzida pelo escoamento em uma estrutura.

Segundo Norberg (40), para reproduzir com fidelidade estes resultados, a modelagem precisa levar em consideração alguns aspectos supostamente sutis do escoamento, que é inerentemente tridimensional, transitório e que deve incorporar aspectos relacionados às características do escoamento na camada limite.

O perfil de velocidade horizontal é apresentado na Figura 4.27 para $Re = 10^4$ e $I = 2,5\%$. Os perfis de velocidade não serão apresentados para todos os casos estudados, para obtermos uma leitura mais dinâmica, visto que seguem a mesma tendência.

Figura 4.27 – Visualização do perfil de velocidade horizontal para $Re=10^4$ e $I=2,5\%$



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.2 Intensidade de turbulência

Esta subseção pretende analisar a influência da intensidade da turbulência nos parâmetros aerodinâmicos. Todas as características da simulação foram as mesmas do caso base, exceto o nível de intensidade da turbulência. Conforme descrito na subseção 2.2.1, este parâmetro representa uma perturbação da corrente livre no fluxo.

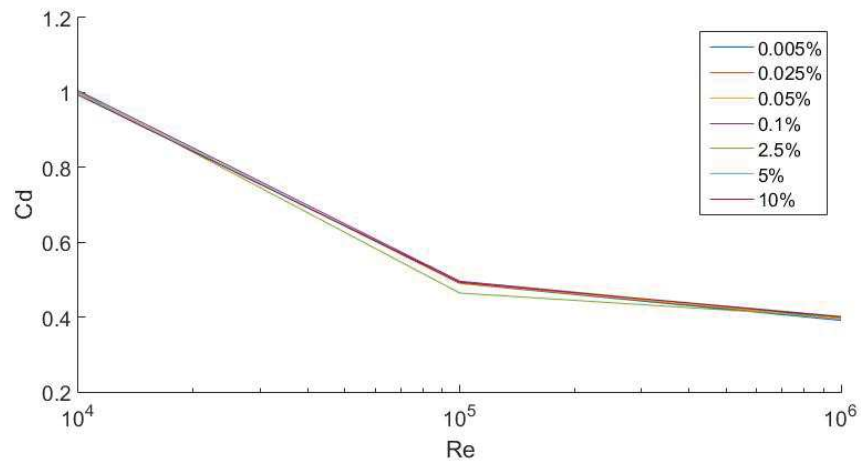
As simulações foram realizadas com valores de intensidade de turbulência de 0,005 %, 0,025 %, 0,05 %, 0,1 %, 2,5 %, 5 % e 10 % para cada número de interesse de Reynolds, 10^4 , 10^5 e 10^6 , resultando em 21 simulações. Os resultados da simulação podem ser vistos na tabela 8.

Tabela 8 – Resultado das simulações para o caso turbulento

Re	I(%)	\overline{Cd}	\overline{Cl}	St
10^4	0,005	0,9996	1,0097	0,24
10^4	0,025	0,997	0,9909	0,24
10^4	0,05	1,0002	0,9986	0,245
10^4	0,1	1,005	1,0309	0,245
10^4	2,5	1,0025	1,0035	0,245
10^4	5	0,9976	0,9977	0,24
10^4	10	0,9932	1,0028	0,238
10^5	0,005	0,4899	0,3117	0,272
10^5	0,025	0,49	0,303	0,268
10^5	0,05	0,4917	0,3331	0,269
10^5	0,1	0,4659	0,3527	0,269
10^5	2,5	0,4942	0,3439	0,2717
10^5	5	0,4932	0,3454	0,2717
10^5	10	0,4927	0,3471	0,2717
10^6	0,005	0,3911	0,2676	0,29
10^6	0,025	0,3951	0,2885	0,29
10^6	0,05	0,397	0,2893	0,2907
10^6	0,1	0,3987	0,2988	0,2907
10^6	2,5	0,3993	0,3298	0,2907
10^6	5	0,4019	0,3175	0,2907
10^6	10	0,4009	0,31	0,2907

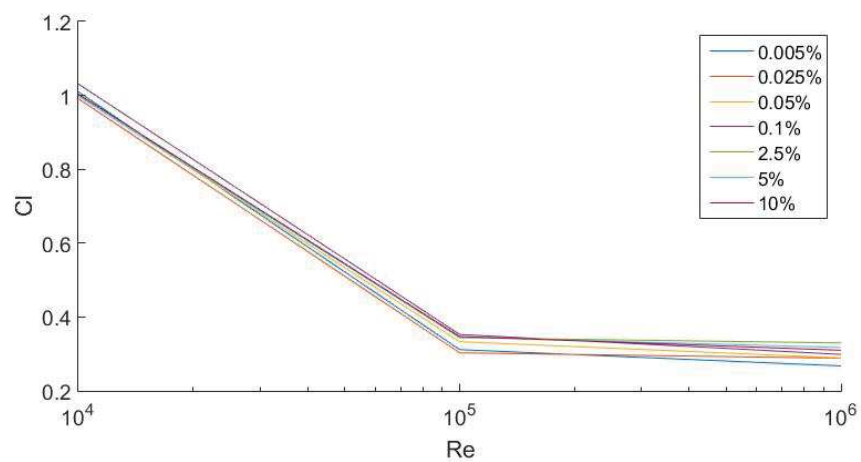
Com base nas informações dispostas na Tabela 8, foram gerados os gráficos expressos entre a Figura 4.28 e a Figura 4.36. Os resultados mostrados da Figura 4.28 à Figura 4.30 mostram as variações dos coeficientes aerodinâmicos para todo o intervalo de I em função do número de Reynolds. Nas Figuras 4.31 a 4.36 tem-se as variações de cada coeficiente pela intensidade de turbulência e para cada valor de Reynolds, isoladamente.

Figura 4.28 – \overline{Cd} como função do número de Reynolds para cada nível de intensidade de turbulência



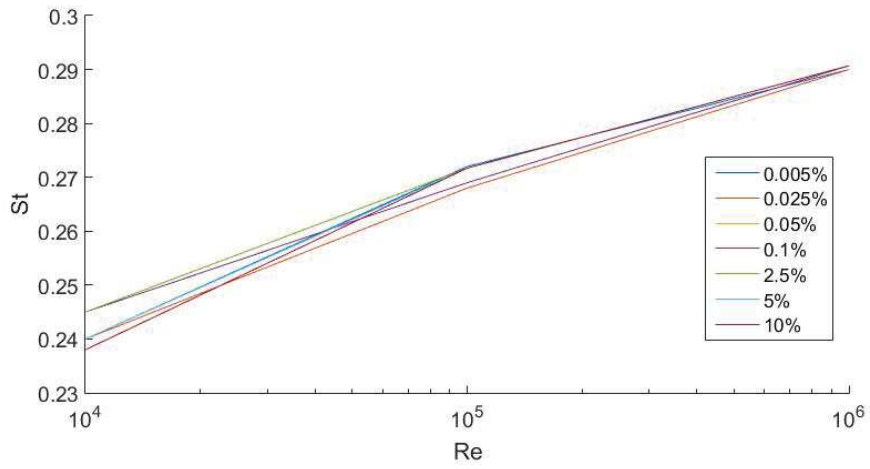
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.29 – \overline{Cl} como função do número de Reynolds para cada nível de intensidade de turbulência



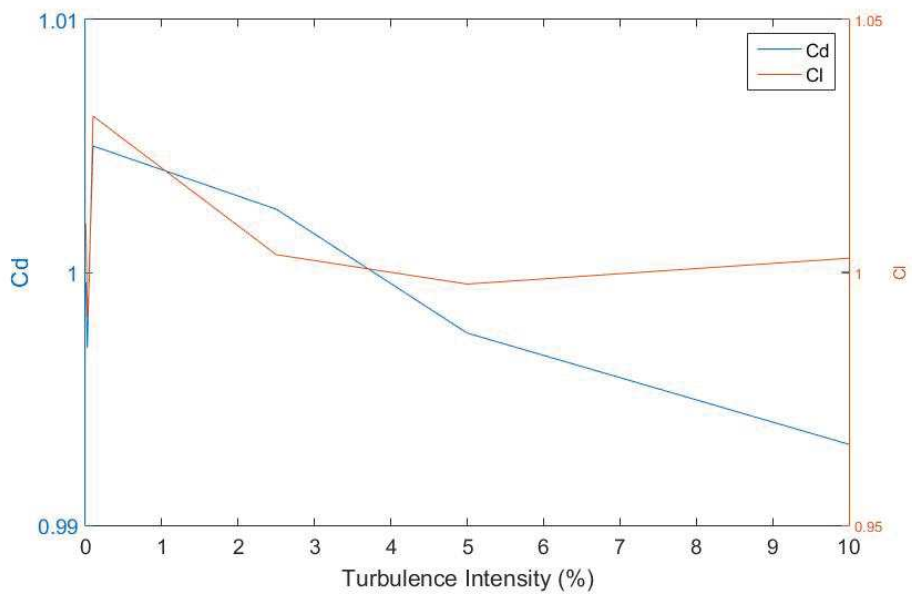
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.30 – Número de Strouhal como função do número de Reynolds para cada nível de intensidade de turbulência



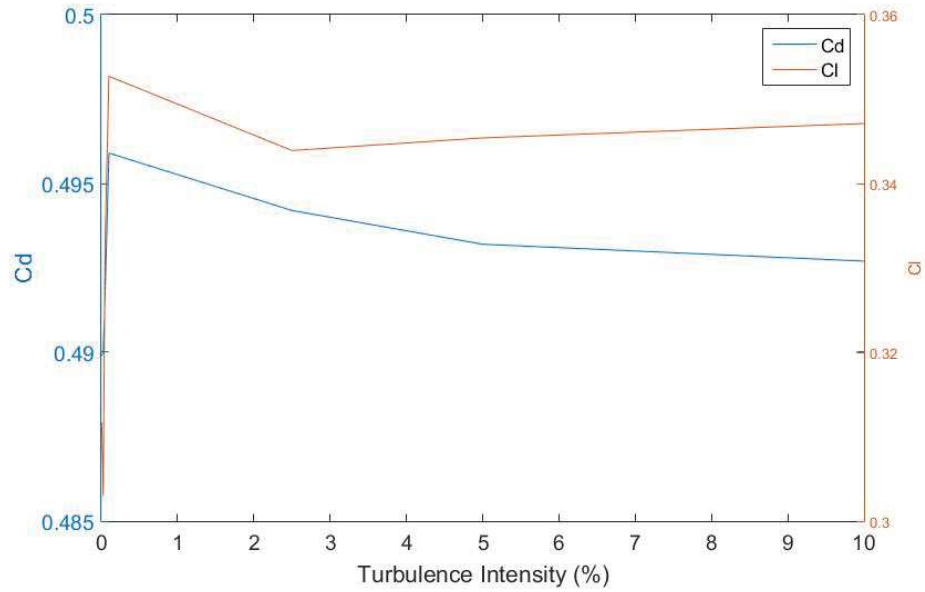
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.31 – \overline{Cd} e \overline{Cl} em função da intensidade de turbulência para $Re=10^4$



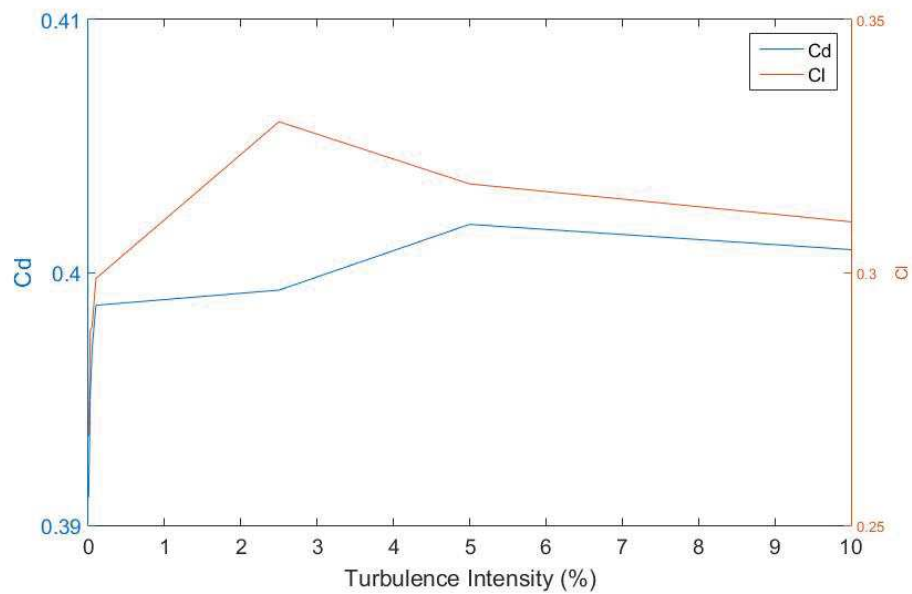
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.32 – \overline{Cd} e \overline{Cl} em função da intensidade de turbulência para $Re=10^5$



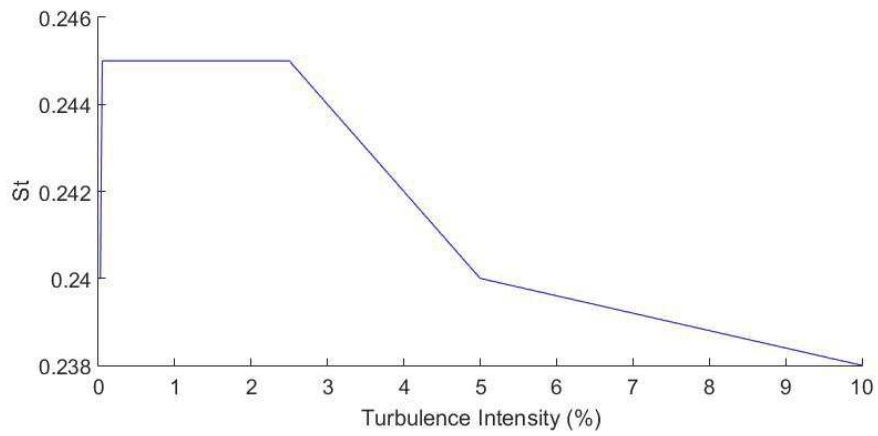
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.33 – \overline{Cd} e \overline{Cl} em função da intensidade de turbulência para $Re=10^6$

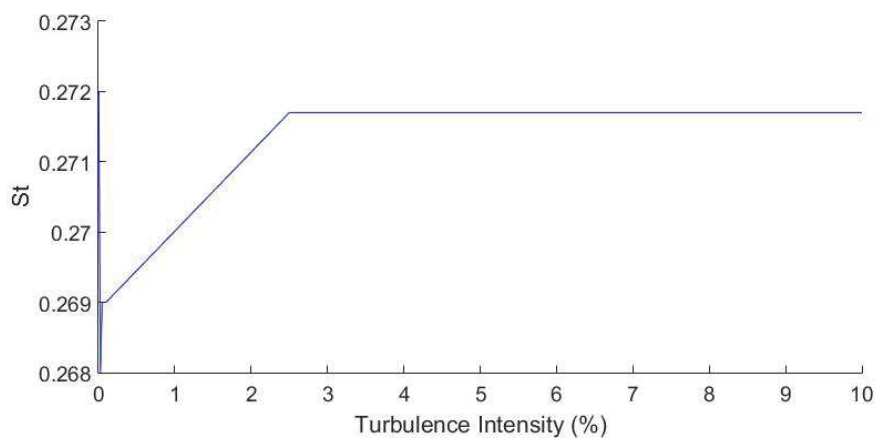


Fonte: Elaborada pelo autor.

Os gráficos em relação ao número de Strouhal em função da intensidade da turbulência são apresentados nas Figuras 4.34 à 4.36, respectivamente, para o número de Reynolds de 10^4 , 10^5 e 10^6 , embora tenha sido observada baixa interferência da intensidade da turbulência em todos os números de Reynolds estudados.

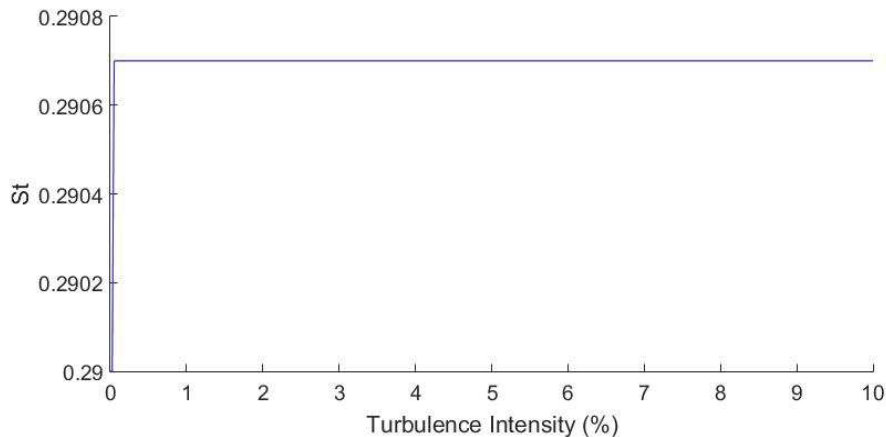
Figura 4.34 – Número de Strouhal em função da intensidade de turbulência para $Re=10^4$ 

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.35 – Número de Strouhal em função da intensidade de turbulência para $Re=10^5$ 

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.36 – Número de Strouhal em função da intensidade de turbulência para $Re=10^6$



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nessas informações aqui dispostas é possível destacar alguns comentários sobre os resultados, os quais estão expressos a seguir:

- Comportamento do \overline{Cd}

- Há uma ligeira variação deste parâmetro. Sua variação pode ser quantificada pelo desvio padrão, que foi mantido na ordem de 10^{-3} . Este parâmetro está relacionado ao escoamento médio e é fracamente influenciado pelo distúrbio de escoamento livre.
- Para $Re = 10^4$ e $I 0,1 \%$ (nível de turbulência médio), este parâmetro atinge o máximo. Ao aumentar o número de Re , o valor máximo aproxima-se do valor máximo de I . Pode ser que, para Reynolds abaixo de 10^4 , os fluxos sejam mais influenciados pelas camadas de tensão de cisalhamento do que pela intensidade da turbulência. Norberg (41) também relatou a mesma observação em seu texto. Este autor realiza uma estudo experimental buscando avaliar a influência do número de Reynolds e a intensidade de turbulência no número de Strouhal. De acordo com este autor, "...A alta sensibilidade aos distúrbios dos escoamentos livres nesse intervalo são refletidos na curva para $I = 0,1 \%$ ".

- Comportamento do \overline{Cl}

- A influência mais notável de I foi observada na flutuação de Cl . O desvio padrão aumenta à medida que Reynolds aumenta e foi de $0,8 \%$, $1,5 \%$ e $1,62 \%$ para $Re 10^4$, 10^5 e 10^6 , respectivamente. Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que, em geral, modelos de turbulência como o RANS estão preocupados em modelar a flutuação do fluxo, como resultado da decomposição de Reynolds.

- Novamente, para elevados Re os valores mais altos deste parâmetro foram observados para alta intensidade de turbulência.
- Comportamento do St
 - O número Strouhal está associado à periodicidade do sinal Cl . Os resultados mostraram que, para Re igual a 10^4 , esse valor é mais alto para I baixo e diminui à medida que I aumenta. À medida que no número Re aumenta, há uma tendência de uniformizar esse parâmetro em um valor constante. Em outras palavras, para o número de Reynolds em 10^4 e 10^5 , há uma variação maior do número de Strouhal quando comparado ao número de Reynolds de 10^6 .
 - Novamente, tem-se uma concordância com os resultados de Norberg (41). Esse pesquisador relatou que, em regime subcrítico, o número de Strouhal é dependente da intensidade de turbulência.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento da pesquisa, bem como os objetivos alcançados e os próximos objetivos a serem obtidos como forma de trabalhos futuros no prosseguimento do trabalho no doutorado.

De forma geral, este trabalho alcançou os objetivos para ele traçados, e também rendeu como fruto uma gama de conhecimentos adquiridos pelo autor ao longo desses dois anos de mestrado e também possibilitou a publicação de artigos em eventos Rodrigues and Hallak (42, 43, 44).

O objetivo deste trabalho foi alcançado satisfatoriamente. Primeiro, os valores de $\overline{C_d}$, $\overline{C_l}$ e St para o caso base conversaram perfeitamente bem com casos experimentais na literatura, bem como com outros casos numéricos em estudos anteriores.

Dessa forma, o modelo implementado no software comercial Ansys Fluent obteve resultados satisfatórios quando comparado a outros métodos numéricos aplicados em pesquisas anteriores e outros softwares. O sucesso dos resultados obtidos na primeira parte da pesquisa permitiu a análise das etapas subsequentes, como o estudo sob os efeitos da vizinhança e à proximidade do fundo do mar para o caso laminar e da intensidade de turbulência para o caso turbulento.

A análise dos efeitos de vizinhança mostrou que o cilindro a montante (cilindro 1) é ligeiramente influenciado pelo cilindro a jusante (cilindro 2) para distâncias maiores. Em outras palavras, há uma fraca influência do cilindro 2 no cilindro 1. Por outro lado, há uma forte influência do cilindro a montante no desempenho aerodinâmico do cilindro a jusante.

A proximidade do fundo do mar exerce grande influência no desempenho aerodinâmico de um cilindro singular. Quanto mais próximo o cilindro estiver do fundo do mar, haverá uma supressão no desprendimento de vórtice e uma perda de simetria do fluxo. Conclui-se que a influência da proximidade do fundo do mar nos coeficientes de arrasto e sustentação aumenta proporcionalmente ao número de Reynolds, bem como as frequências. Quanto ao número de Strouhal, o que foi observado foi uma influência menor do número de Reynolds nesse parâmetro quando a distância entre o cilindro e o fundo do mar variou.

Depois disso, já para o caso turbulento, conclui-se que há uma influência da intensidade da turbulência nos parâmetros estudados, mas essa influência aumenta proporcionalmente ao aumento no número de Reynolds da simulação. Em geral, pode-se concluir que existe uma influência considerável da intensidade da turbulência no coeficiente de sustentação e no número de Strouhal. Para o coeficiente de arrasto, essa influência é muito baixa para cada intervalo de número de Reynolds estudado.

Assim, sabe-se quais coeficientes são mais influenciados pelo parâmetro aqui estudado. E com isso, será possível chegar à modelagem mais próxima dos casos reais

da indústria offshore, como risers, por exemplo. Ao longo dos estudos, será cada vez mais evidente e relevante analisar os parâmetros estudados aqui ao executar um projeto envolvendo risers.

Este estudo contribui identificando quais dos parâmetros estudados (número de Strouhal, coeficiente de arrasto e sustentação) têm maior ou menor influência na variação da intensidade da turbulência.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros e como uma maneira de melhorar o trabalho em questão, tentaremos fazer uma comparação desse modelo com outros modelos de turbulência e métodos computacionais ou outras geometrias como objeto de estudo.

Também é de interesse implementar uma evolução deste estudo para a terceira dimensão. Isso possibilitaria um estudo mais elaborado da forma do riser, flutuadores e/ou supressores de vórtices, além de possibilitar um estudo sobre a catenária dos risers de petróleo e gás natural.

Além disso, almeja-se utilizar o conhecimento adquirido em dinâmica dos fluidos computacional e sobre o funcionamento do software utilizado para implementarmos ao modelo uma análise estrutural, e posteriormente aplicar modelos de otimização mono e multiobjetivo de flutuadores e supressores de vórtices em risers de petróleo.

Esse acoplamento das grandes área de estudo (dinâmica dos fluidos computacional, análise estrutural e otimização) se tornaria uma ideia mais viável mediante o software já utilizado, visto que o mesmo trata ambas áreas e promove a possibilidade de interação entre elas.

REFERÊNCIAS

- [1] M.M. Zdravkovich. Conceptual overview of laminar and turbulent flows past smooth and rough circular cylinders. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 33:53–62, 1990.
- [2] Paulo M. Pimenta. Examples of riser geometric configurations. <https://www.researchgate.net>, 2013. Acessado: 2019-11-27.
- [3] Luciano Tardelli Vieira. *Otimização de sistemas de risers para exploração de petróleo offshore através de algoritmos genéticos paralelos*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2008.
- [4] D. Tritton. Experiments on the flow past a circular cylinder at low reynolds numbers. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 6:547–567, 1959.
- [5] S. Dennis and G. Chang. Numerical solutions for steady flow past a circular cylinder at reynolds numbers up to 100. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 42:471–489, 1970.
- [6] R.M. Stringer, J. Zang, and A.J. Hillis. Unsteady rans computations of flow around a circular cylinder for a wide range of reynolds numbers. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 87:1–9, 2014.
- [7] Muk Chen Ong, Torbjørn Utnes, Lars Erik Holmedal, Dag Myrhaug, and Bjørnar Pettersen. Numerical simulation of flow around a smooth circular cylinder at very high reynolds numbers. *Marine Structures*, 22(2):142–153, 2009.
- [8] Mohammed Abdulaziz. *Study of the vortex-induced vibrations in off-shore structures*. PhD thesis, Institute of Ship Technology, Ocean Engineering and Transport Systems (ISMT), 2017.
- [9] W Franke, R. Rodi and B Schönung. Numerical calculation of laminar vortex-shedding flow past cylinders. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 35: 237–257, 1990.
- [10] D.Coles W.C.L.Shih, C.Wang and A.Roshko. Experiments on flow past rough circular cylinders at large reynolds numbers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 49:351–368, 1993.
- [11] M. Behr, D. Hastreiter, S. Mittal, and T.E. Tezduyar. Incompressible flow past a circular cylinder: dependence of the computed flow field on the location of the lateral boundaries. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 123: 309–316, 1995.

- [12] S. Mittal and A. Raghuvanshi. Control of vortex shedding behind circular cylinder for flows at low reynolds numbers. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 35:421–447, 2001.
- [13] Petter A. Berthelsen and Odd M. Faltinsen. A local directional ghost cell approach for incompressible viscous flow problems with irregular boundaries. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 227:4354–4397, 2008.
- [14] Jessica Rikanti Tawekal. Cfd simulation of the flow over a 2-dimensional pipe and vortex induced vibration of the pipe with 1 degree of freedom. Master’s thesis, University of Stavanger (UiS) - Faculty of Science and Technology, 2015.
- [15] Ariane Neale Ramos Vieira. Modelagem numérica do escoamento ao redor de cilindros aquecidos rotativos em regime laminar e turbulento. Master’s thesis, Universidade Federal de Itajubá, 2017.
- [16] H. Hasini P. Mathupriya, L. Chan and A. Ooi. Numerical investigations of flow over a confined circular cylinder. In *XXI Australasian Fluid Mechanics Conference*, Adelaide, Australia, 2018.
- [17] Tongming Zhou Hongjun Zhu, Honglei Zhao. Direct numerical simulation of flow over a slotted cylinder at low reynolds number. *Applied Ocean Research*, 87:9–25, 2019.
- [18] Diana Sher Sean Blaney and Philippe Lavoie. Vortex shedding from a nonparallel two-cylinder tandem configuration. *AIAA Scitech 2020 Forum*, 58:2020–2035, 2020.
- [19] Nicolas Lima Oliveira. Simulação em dinâmica dos fluidos computacional de hélices. Master’s thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora - Programa de pós-graduação em Modelagem Computacional, 2019.
- [20] Henk Kaarle Versteeg and Weeratunge Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method.*, volume I. Pearson Education, 2007.
- [21] Stephen B Pope. *Turbulent flows*, 2001.
- [22] David C Wilcox et al. *Turbulence modeling for CFD*, volume 2. DCW industries La Canada, CA, 1998.
- [23] Nour Sánchez Abad. *Numerical study of the predictive capabilities of Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) turbulence models applied to catalytic converters*. PhD thesis, Coventry University, 2016.
- [24] André Luiz Tenório Rezende. *Análise Numérica da Bolha de Separação do Escoamento Turbulento sobre Placa Plana Fina Inclínada*. PhD thesis, Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, 2009.

- [25] Florian Menter. Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows. In *23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference*, pages 1993–2906, 1993.
- [26] Florian R Menter, Martin Kuntz, and Robin Langtry. Ten years of industrial experience with the sst turbulence model. *Turbulence, heat and mass transfer*, 4(1):625–632, 2003.
- [27] ANSYS Fluent. 14.0 user’s manual. *ANSYS Inc., Canonsburg, PA*, 2011.
- [28] Florian R Menter. Influence of freestream values on k-omega turbulence model predictions. *AIAA journal*, 30(6):1657–1659, 1992.
- [29] Florian R Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8):1598–1605, 1994.
- [30] Florian R Menter. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. *International journal of computational fluid dynamics*, 23(4):305–316, 2009.
- [31] Rafael Alves Bonfim de Queiroz. Desenvolvimento e teste de esquemas "upwind" de alta resolução e suas aplicações em escoamentos incompressíveis com superfícies livres. Master’s thesis, USP - São Carlos, 2009.
- [32] Y. A. Cengel and J. M Cimbala. *Fluid mechanics: Fundamentals and applications*, volume III. McGraw Hill, 2014.
- [33] J. Blazek. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, volume III. Elsevier, 2015.
- [34] PW Bearman and MM Zdravkovich. Flow around a circular cylinder near a plane boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 89(1):33–47, 1978.
- [35] S Sarkar and Sudipto Sarkar. Vortex dynamics of a cylinder wake in proximity to a wall. *Journal of Fluids and Structures*, 26(1):19–40, 2010.
- [36] Sadatoshi Taneda. Experimental investigation of vortex streets. *Journal of the Physical society of Japan*, 20(9):1714–1721, 1965.
- [37] BS Massey and J Ward-Smith. *Mechanics of fluids*, volume VIII. Elsevier, 2006.
- [38] C. Norberg. Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 17:57–96, 2003.
- [39] Guilherme F Rosetti, Guilherme Vaz, and André LC Fajarra. Urans calculations for smooth circular cylinder flow in a wide range of reynolds numbers: solution verification and validation. *Journal of Fluids Engineering*, 134(12):121103, 2012.

- [40] C Norberg. Flow around a circular cylinder: aspects of fluctuating lift. *Journal of Fluids and Structures*, 15(3-4):459–469, 2001.
- [41] Christoffer Norberg. Effects of reynolds number and a low-intensity freestream turbulence on the flow around a circular cylinder. *Chalmers University, Goteborg, Sweden, Technological Publications*, 87(2):1–55, 1987.
- [42] Leonardo L. V. Rodrigues and Patrícia H. Hallak. Influence of reynolds number in seabed proximity in study of flow around a circular cylinder. In *XXII ENMC*, Juiz de Fora, Brasil, 2019.
- [43] Leonardo L. V. Rodrigues and Patrícia H. Hallak. Study of flow around a circular cylinder — influence of neighborhood effects and seabed proximity. In *XXIV ENIEF*, Santa Fé, Argentina, 2019.
- [44] Leonardo L. V. Rodrigues and Patrícia H. Hallak. Study of flow around a circular cylinder — influence of reynolds number and turbulence parameters. In *XL CILAMCE*, Natal, Brasil, 2019.