

IGOR ANDRADE COUTINHO

**ANÁLISE NUMÉRICA DO EFEITO DA
OSCILAÇÃO E CORRENTEZA SOBRE
COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS DE
GEOMETRIAS SIMPLES**

São Paulo
2022

IGOR ANDRADE COUTINHO

**ANÁLISE NUMÉRICA DO EFEITO DA
OSCILAÇÃO E CORRENTEZA SOBRE
COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS DE
GEOMETRIAS SIMPLES**

Versão Corrigida

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

Área de Concentração:

Engenharia Mecânica de Energia e Fluidos

Orientador:

Dr. Jurandir Itizo Yanagihara

São Paulo
2022

Prof. Dr. Jurandir Itizo Yanagihara

Dr. Leonardo de Oliveira Carvalho

Prof. Dr. Kazuo Nishimoto

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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

São Paulo, ____ de _____ de ____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Coutinho, Igor Andrade

Análise Numérica do Efeito da Oscilação e Correnteza Sobre Coeficientes Hidrodinâmicos de Geometrias Simples/ I. A. Coutinho – versão corr
– São Paulo, 2022. 90 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Coeficientes Hidrodinâmicos 2.Oscilação Forçada 3.Correnteza
4.Dinâmica dos fluídos computacionais 5.Disco I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, aos meus amigos, aos meus pais, à minha amada Rhaissa e ao meu furacãozinho, a quem chamo de filho. Todos tiveram participação, cada um com sua dose de incentivo, admiração e apoio. Serão sempre baluartes incomensuráveis.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Antônio e Silézia que são peças fundamentais à minha formação pessoal. Meu pai me ensinou a ser racional e minha mãe a ser emocional, o maior dos clichês, mas a mais pura verdade. Agradeço ao apoio e incentivo ao longo de todos os anos da minha existência. Desejo do fundo do meu coração que todos possam experimentar um amor tão grande quanto sinto.

Gostaria de agradecer à minha própria família, minha futura esposa Rhaissa e meu filho Vicente. Sem ela para segurar as pontas, sem os incentivos e os elogios demasiadamente exagerados não teria chegado até aqui. Provas de amor já foram demonstradas pela vida toda, aonde eu for, quero que ela esteja comigo. Vicente, com seus 1 ano e 8 meses, me mostrou que não estou fazendo nada de especial, porque o guerreiro mesmo foi ele. Os 3 meses na UTIN, desaturações e as paradas cardíacas não foram suficientes para derrubá-lo. Hoje, com toda sua energia e alegria, faz com que toda vez meu ânimo se renove por ver o rostinho dele brincando - com algo que não deveria - e rindo com a gargalhada mais gostosa do mundo. Todo o estudo e trabalho é para te dar o mundo, meu filho.

Agradeço ao meu orientador e professor, Dr. Jurandir Itizo Yanagihara, pela orientação e total apoio ao longo desses anos, presente até nos últimos dias do ano, sempre me encorajando. Obrigado por toda a ajuda.

Agradeço ao IPT, por ter dado todas as condições para tirar o maior proveito de tudo o que eu poderia oferecer. Agradeço também a todos os meus colegas de trabalho, pessoas que até hoje não consegui encontrar pessoalmente, mas que deram um apoio valioso nos trabalhos que realizamos juntos aos meus colegas de trabalho, pessoas que até hoje não consegui encontrar pessoalmente, mas deram um apoio valioso nos trabalhos que realizamos juntos.

Por fim, gostaria de agradecer à USP por ser a melhor instituição de ensino que eu poderia desejar.

“Raramente o destino nos chama quando nos convém.”

-- Autor Desconhecido

RESUMO

Em uma operação de lançamento/içamento de equipamentos submarinos na indústria *offshore*, vários fatores são importantes para uma instalação segura e econômica dentro de uma janela de operação. Um desses fatores são os coeficientes hidrodinâmicos dos equipamentos a serem instalados. Os coeficientes podem ser obtidos, experimentalmente ou numericamente, aplicando um movimento oscilatório que representa os efeitos da condição do mar e do movimento da embarcação. Contudo, essas aplicações simplificam as condições durante uma operação real e desconsideram efeitos importantes como a corrente oceânica. Este trabalho investiga numericamente o efeito da correnteza em conjunto a oscilação forçada nos coeficientes hidrodinâmicos de discos a partir da análise de dois parâmetros de influência: o número de Keulegan-Carpenter (KC) e a velocidade de correnteza reduzida (V_r). Um processo de validação do modelo numérico foi realizado em etapas para suprir a falta de referências sobre o assunto. O modelo foi comparado aos resultados de *Direct Numerical Simulations (DNS)* para baixos número de Reynolds (Re), em uma análise qualitativa e quantitativa, aplicado a condições mais amplas encontradas em operações reais, com KC de até 3, V_r de até 0,3 e para Re altos, de até 240 mil. Os coeficientes hidrodinâmicos de arrasto (C_d) e de massa adicional (C_a) tiveram mudanças significativas quando adicionado a correnteza nas simulações. Em resumo, ocorre um aumento de C_d e uma redução de C_a conforme V_r aumenta. Considerando condições reais de operações, os mesmos resultados são encontrados, com variações de C_d de até 300% e de C_a de até 36% para baixos KC . Os efeitos da correnteza também são percebidos nos vórtices. KC e V_r influenciaram diretamente a geração dos vórtices e até mudanças de formatos que ocorreram alterando estes parâmetros. Por fim, comparou-se a janela de operação de instalação na região de entrada na água utilizando coeficientes padrões da norma e os coeficientes encontrados neste trabalho.

Palavras-Chave – Coeficientes Hidrodinâmicos, Oscilação Forçada, Correnteza, *CFD*, Disco, Janela de Operação.

ABSTRACT

In a launching/lifting operation of subsea equipment in the offshore industry, several factors are important for a safe and economical installation within an operating window. One of these factors is the hydrodynamic coefficients of the equipment to be installed. The coefficients can be obtained, experimentally or numerically, by applying an oscillatory motion that represents the effects of sea condition and vessel motion, but these applications simplify conditions during a real operation and disregard important effects such as ocean current. This work investigates numerically the effect of current together with forced oscillation on the hydrodynamic coefficients of disks. Analyzing two influence parameters, the Keulegan-Carpenter number (KC) and the reduced current velocity (V_r). A numerical model validation process was carried out in stages to overcome the lack of references on the subject. The model was compared with Direct Numerical Simulation (DNS) results for low Reynolds number (Re), in a qualitative and quantitative analysis, and then applied to broader conditions found in real operations, with KC up to 3, V_r up to 0.3, and for high Re , up to 240 thousand. The hydrodynamic coefficients of drag (C_d) and additional mass (C_a) had significant changes when added the current in the simulations. In summary, C_d increases and C_a decreases as V_r increases. Considering real operating conditions, the same results are found, with variations of C_d up to 300% and of C_a up to 36% for low KC . The effects of the current are also perceived in the vortices. KC and V_r directly influenced the generation of vortices and even shape changes occur by altering these parameters. Finally, the installation operation window in the water inlet region was compared using standard coefficients of the norm and the coefficients found in this work.

Keywords – Hydrodynamic Coefficients, Forced Oscillation, Current, CFD, Disk, Operation Window.

LISTA DE FIGURAS

1	Lançamento/içamento de equipamentos submarinos.	2
2	Imagens de duas estruturas complexas parecidas com <i>manifolds</i> reais usados em trabalhos citados acima.	7
3	Imagens do trabalho experimental de TIAN et al., (2017a) mostrando o aparato experimental usado e algumas geometrias simples testadas.	10
4	Configurações do escoamento usadas no trabalho THIAGARAJAN; TROESCH, (1998), em (a) cilindro oscilando verticalmente na presença de uma correnteza constante horizontal e em (b) cilindro com um disco acoplado na presença de correnteza.	13
5	Visualização do escoamento de um disco em oscilação forçada na presença de correntezas constantes de YANG et al., (2014), as simulações tiveram o mesmo valor de correnteza e aumentou-se a amplitude da oscilação nas imagens de (a) a (k). Mais informações no trabalho citado.	15
6	Desenho esquemático de um equipamento submarino durante o processo de lançamento/içamento de uma embarcação-guindaste.	32
7	Domínio utilizado para simulações de oscilação forçada de validação.	34
8	Gráfico da validação da malha para C_d usando o programa <i>NUA</i> para casos de oscilação forçada.	36
9	Resultados das malhas de todos os refinamentos usando todos os métodos para cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos, comparados com resultados experimentais de TIAN et al., 2017a.	37
10	Resultados do modelo numérico para coeficientes hidrodinâmicos para os casos de apenas oscilação forçada comparando os métodos de cálculo dos coeficientes.	38

11	Resultados do modelo numérico para coeficientes hidrodinâmicos para os casos de apenas oscilação forçada comparando os métodos de solução. . . .	39
12	Domínio utilizado para simulações de oscilação + correnteza.	41
13	Gráfico de validação de malha para C_d usando o programa NUA para casos de oscilação + correnteza.	42
14	Malha de refinamento $m3$ para os casos de oscilação + correnteza.	43
15	Resultados do modelo numérico para os coeficientes hidrodinâmicos de C_d e C_a para os casos de oscilação + correnteza comparados com (YANG et al., 2014).	44
16	Resultados do modelo numérico para o coeficiente hidrodinâmico de \bar{C}_x para os casos de oscilação + correnteza comparados com (YANG et al., 2014).	45
17	Comparação com (YANG et al., 2014) da visualização do escoamento para oscilação + correnteza de disco de $e/D = 0,1$ com $KC = 0,6$ em várias velocidades de correnteza quando o disco está na sua máxima velocidade axial. As estruturas dos vórtices estão presentes nas figuras utilizando de uma iso-superfície com $Q - criterion = 0,1s^{-1}$	46
18	Visualização instantâneas do escoamento de oscilação + correnteza em discos de $e/D = 0,1$, da esquerda para direita com (a) $V_r = 0,1$ e $KC = 0,5$ (b) $V_r = 0,2$ e $KC = 0,5$ (c) $V_r = 0,1$ e $KC = 3,0$ (d) $V_r = 0,2$ e $KC = 3,0$. Imagens no tempo $T/10,3T/10,5T/10,7T/10$ e $9T/10$ para um T de simulação. Um controno dos campos de velocidades foi criado no eixo de simetria y e uma iso-superfície com $Q - criterion = 0,1s^{-1}$ foi usada para visualizar os vórtices.	47
19	Gráfico de C_d para simulações de oscilação + correnteza com disco em altos Re_o	48
20	Gráfico de C_a para simulações de oscilação + correnteza com disco em altos Re_o	48
21	Gráfico de \bar{C}_x para simulações de oscilação + correnteza com disco em altos Re_o	49

23	Séries temporais da força F_x das simulações do disco com altos Re_o	51
24	Gráficos para o disco com altos Re_o de C_x mostrando a dispersão dos valores.	51
26	Pontos criados para leituras de algumas variáveis do escoamento ao longo do período de oscilação para as simulações do disco com Re_o altos.	52
27	Gráficos da pressão dinâmica das simulações para o disco em Re_o altos. . .	52
22	Visualizações instantâneas de discos em oscilação + correnteza com $e/D = 0,02$ para simulações com altos Re , da esquerda para direita em (a) $V_r = 0$ e $KC = 2,0$ (apenas oscilação) (b) $V_r = 0,1$ e $KC = 2,0$ (c) $V_r = 0,2$ e $KC = 2,0$. Imagens no tempo $T/10, 3T/10, 5T/10, 7T/10$ e $9T/10$ para um T de simulação. Um contorno do campo de velocidades foi criado no eixo de simetria y e uma iso-superfície com $Q - criterion = 0,1 s^{-1}$ foi usada para visualização dos vórtices.	55
25	Visualizações instantâneas de discos em oscilação + correnteza com $e/D = 0,02$ para simulações com altos Re , para $V_r = 0,1$ na esquerda em (a) e $V_r = 0,2$ na direita em (b). Imagens no tempo $T/20, 4T/20, 7T/20, 10T/20, 13T/20$ e $16T/20$ para um T de simulação. Contornos de pressão foram criados no plano de simetria do disco.	56
28	Contornos de vórtices mostrando o <i>vortex shedding</i> para os modos $2S, 2P, P + S$ e $2P_{overlap}$	57
29	Visualizações instantâneas de discos em oscilação + correnteza com $e/D = 0,02$ para simulações com altos Re , para $V_r = 0,1$ na esquerda em (a) e $V_r = 0,2$ na direita em (b). Imagens no tempo $T/20, 4T/20, 7T/20, 10T/20, 13T/20$ e $16T/20$ para um T de simulação. Uma iso-superfície com $Q - criterion = 0,1 s^{-1}$ foi usada para visualização dos vórtices.	58
30	Visualizações instantâneas de discos em oscilação + correnteza com $e/D = 0,02$ para simulações com altos Re , para $V_r = 0,1$ na esquerda em (a) e $V_r = 0,2$ na direita em (b). Imagens no tempo $T/20, 4T/20, 7T/20, 10T/20, 13T/20$ e $16T/20$ para um T de simulação. Contorno criado no plano de simetria do disco com $Q - criterion = 0,1 s^{-1}$ usado para visualização dos vórtices.	59

31	Gráfico de C_d para simulações de oscilação + correnteza com disco de dimensões maiores em altos Re_o	63
32	Gráfico de C_a para simulações de oscilação + correnteza com disco de dimensões maiores em altos Re_o	64
33	Resultados das janelas de operação encontradas para o disco com dimensões maiores com o uso do programa <i>Splash Zone</i>	65

LISTA DE TABELAS

2	Tabela da validação de malha para casos de apenas oscilação forçada . . .	36
3	Tabela para os métodos de solução para casos de apenas oscilação forçada.	36
4	Tabela com as características do domínio considerando D como o tamanho característico.	40
5	Tabela da validação de malha para simulações de oscilação + correnteza. .	41
6	Resultados das simulações de oscilação + correnteza de discos em altos Re_o e Re_c : Diferenças de C_d e C_a em relação aos resultados para $V_r = 0$ (oscilação pura).	49

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coefficientes a serem encontrados
β	Número de Stokes
ϵ_ϕ	Erro da malha
δV	Mudança no volume de água deslocada da superfície da água parada para a crista
μ	Viscosidade dinâmica [$Pa.s$]
ν	Viscosidade cinemática [$\frac{m^2}{s}$]
ρ	Massa específica do fluido [kg/m^3]
σ	Desvio padrão
ϕ	Resultados de valor integral ou local de uma malha
ω	Frequência angular [rad/s]
A	Amplitude de oscilação [m]
A_{33i}	Massa adicional do objeto [Kg]
A_0	Área seccional de referência [m^2]
A_p	Área de seção transversal de referência [m^2]
A_{pi}	Área da parte submersa do item objeto projetado em um plano horizontal [m^2]
A_s	Área de <i>slamming</i> [m^2]
\forall	Volume de referência [m^3]
a_{ct}	Aceleração vertical de característica da ponta do guindaste [m/s^2]
a_n, A_n, B_n	Coefficientes de Fourier
a_w	Aceleração de partículas de água vertical característica [m/s^2]
BOI	<i>Body of Influence</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
C_a	Coefficiente de massa adicional
C_d	Coefficiente de arrasto
C_{ds}	Coefficiente de arrasto para um escoamento uniforme
C_{do}	Coefficiente de arrasto do movimento oscilatório
C_s	Coefficiente de <i>slamming</i>
C_x	Coefficiente de arrasto em relação ao eixo x com correnteza
\bar{C}_x	Média temporal do coeficiente de arrasto em relação ao eixo x com correnteza
D	Comprimento seccional característico [m]
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
e	Espessura [m]
$FSAB1$	<i>Fourier Series Approach with B_1</i>
$FSABn$	<i>Fourier Series Approach with B_n</i>
F_ρ	Força de empuxo variável característica [N]
F_D	Força hidrodinâmica de arrasto característica [N]
F_{hyd}	Força hidrodinâmica característica [N]
F_M	Força hidrodinâmica de massa característica [N]
F_m	Força em um volume [N]
F_{slam}	Força de <i>slamming</i> característica [N]
F_{static}	Força estática do objeto [N]
F_{total}	Força total característica do objeto descendo através da superfície da onda [N]
f_g	Força do campo da gravidade [N]

$F_{x,y,z}$	Força em relação ao eixo x , y ou z [N]
$g_{x,y,z}$	Gravidade em relação ao eixo x , y ou z [m/s^2]
H_s	Altura máxima da onda [m]
h	Taxa de refinamento de malha
KC	Número de Keulegan-Carpenter
L	Comprimento característico [m]
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
$LSMIF$	<i>Least Square Method – Integral Form</i>
$LSMLS$	<i>Least Square Method – Linear System</i>
M	Massa do objeto no ar [Kg]
MVF	Métodos dos Volumes Finitos
$MUSCL$	<i>Monotone Upstream-Centered Scheme</i>
NUA	<i>Numerical Uncertainty analysis</i>
p	Ordem de convergência observada na validação de malha
$Q - criterion$	Parâmetro da vorticidade [s^{-1}]
$RANS$	<i>Reynolds Average Navier-Stokes</i>
RAO	<i>Response Amplitude Operator</i>
Re	Número de Reynolds
Re_o	Número de Reynolds do movimento oscilatório
Re_c	Número de Reynolds baseado na velocidade da correnteza
$S(t)$	Função do deslocamento de um corpo oscilando senoidalmente
$\dot{S}(t)$	Função da velocidade de um corpo oscilando senoidalmente
$\ddot{S}(t)$	Função da aceleração de um corpo oscilando senoidalmente
T	Período de oscilação [s]
Tp	Período da onda [s]
t	Tempo [s]
UDF	<i>User-Defined Function</i>
U_ϕ	Incerteza numérica da malha
U_c	Velocidade da correnteza [m/s]
U_m	Velocidade máxima de oscilação [m/s]
V	Volume de água deslocado em diferentes estágios no momento de entrada na água
V_r	Velocidade reduzida
v_r	Velocidade relativa vertical característica entre o objeto e as partículas de água
VIV	Vibração Induzida por Vórtices
V_i	Volume de água deslocada do objeto em relação ao nível de água parada [m^3]
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
v_s	Velocidade de impacto de <i>slamming</i>
$WLSMIF$	<i>Weight Least Square Method – Integral Form</i>
$WLSMLS$	<i>Weight Least Square Method – Linear System</i>
$w_{i,f,LS}$	Funções peso
Y^+	Distância da parede adimensional
y_1	Altura da primeira camada prismática [m]
y_2	Tamanho dos elementos para a região de refinamento médio [m]

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Instalação de Equipamentos Submarinos	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Estrutura da Dissertação	3
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Normas para Instalação de Equipamentos Submarinos	5
2.2	Estruturas Complexas	6
2.3	Estudos de Oscilação Forçada em Estruturas Simples	8
2.4	Estudos com Modelagem Numérica	9
2.5	Efeitos Adicionais e da Correnteza	11
3	Formulação Matemática	16
3.1	Parâmetros Adimensionais	16
3.2	Equações Governantes	17
3.3	Equação de Morison	18
3.4	Coefficientes Hidrodinâmicos e Métodos de Cálculo	20
4	Métodos Numéricos	23
4.1	<i>Computational Fluid Dynamics</i>	23
4.2	Método de Volumes Finitos	25
4.3	Modelos de Turbulência	26

4.4	Malha	28
4.5	<i>Reference Frame Motion</i>	29
4.6	Condições de operação	30
5	Validação para simulações de Oscilação Forçada	32
6	Resultados e Discussão	40
6.1	Validação e Resultados para Baixos Re	40
6.2	Resultados para Altos Re	48
6.3	Estudo Aprofundado nos Casos com \bar{C}_x negativo	50
7	Janela de Operação de Instalação	60
7.1	Programa <i>Splash Zone</i>	60
7.2	Resultados da Janela de Operação para Discos	62
8	Conclusão	66
	Referências	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 Instalação de Equipamentos Submarinos

A exploração de recursos oceânicos em regiões *offshore* tem crescido cada vez mais ao longo das últimas décadas, liderado pelos esforços crescentes da indústria de petróleo e gás. A construção da infraestrutura submarina necessária para viabilizar essas atividades geralmente é feita por operações de içamento submarino por meio de barcaças ou embarcações especializadas, e correspondem a uma grande parte dos investimentos necessários para iniciar a produção do campo.

Este processo é uma operação essencial com diversos riscos envolvidos e exige navios-guindaste específicos relacionados às dimensões e pesos dos equipamentos a serem instalados, sendo que as etapas devem ser seguidas durante uma janela de operação encontrada com base nas condições climáticas. Portanto, para um processo bem sucedido, além do conhecimento das condições meteorológicas e oceográficas, os coeficientes hidrodinâmicos do equipamento e a resposta do movimento induzido pelo guindaste devem ser conhecidos (CHREIM et al., 2020a).

Uma abordagem comum para melhorar essas operações é criar modelos mais precisos para prever a dinâmica dos sistemas de içamento submarinos. Isso dá mais confiança nas previsões das tensões máximas dos cabos para garantir a segurança da operação e definir com mais precisão a janela climática operacional, economizando custos, que podem ser extremamente altos para embarcações especializadas.

Figura 1: Lançamento/içamento de equipamentos submarinos.



Fonte: url: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-curiosidades-sobre-equipamentos-de-nossos-sistemas-submarinos.htm>.

1.2 Justificativa

A recomendação usual neste tipo de operação de instalação de equipamentos é a utilização de normas técnicas específicas criadas a partir de dados experimentais, como a DNV-RP-N103. Contudo, sabe-se que as estimativas para os coeficientes hidrodinâmicos dos equipamentos tendem a ser conservadoras, o que pode resultar em uma janela operacional menor e, conseqüentemente, maiores custos envolvidos no aluguel de navios-guindaste e equipamentos de apoio à instalação. Portanto, a necessidade de melhores formas de estimar os coeficientes hidrodinâmicos para os mais diversos equipamentos incentivou diversos trabalhos experimentais e numéricos, analisando diferentes geometrias para diferentes movimentos induzidos por estruturas flutuantes e ondas.

Muitos efeitos não são levados em consideração ou simplificados durante um projeto de instalação, um deles é a correnteza oceânica. Presente em praticamente qualquer operação *offshore* e importante em inúmeras áreas da naval, é questionável a concepção de que a correnteza não possa alterar o nosso processo industrial analisado de instalação de equipamentos submarinos. Mais estudos são necessários tanto para analisar a influência da correnteza quanto para promover novas aplicações. A exploração naval *offshore* continua a crescer, atingindo maiores profundezas, aumentando as escalas ou novas localizações, como de rios, aonde correntezas mais fortes estão presentes.

São escassas as informações científicas e teóricas disponíveis sobre este processo industrial, tendo como norteamento do processo, na maioria das vezes, as recomendações práticas de normas e conhecimentos individuais de cada empresa. Por isso, este trabalho é um estudo que além de científico é tecnológico, uma vez que aplica os conhecimentos

adquiridos através dos modelos propostos em aplicações reais mostrando os resultados numa janela de operação de instalação real.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor um modelo numérico para encontrar os coeficientes hidrodinâmicos de discos oscilando senoidalmente na presença de correntezas constantes. As simulações numéricas transientes tridimensionais são baseadas em modelos de turbulência do tipo *Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)*, com o movimento imposto no domínio usando o referencial móvel e comparados com aos resultados da *Direct Numerical Simulation (DNS)* de YANG et al., (2014). Foi realizado um processo de validação por etapas devido à falta de referências no assunto. Por fim, foi analisada a influência do KC e V_r nos coeficientes hidrodinâmicos para discos em altos números de Re , próximos às condições encontradas no processo de lançamento/içamento de estruturas oceânicas.

1.4 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está dividido da seguinte forma: Inicialmente, no capítulo 1 é apresentado o processo de instalação de equipamentos submarinos, explicitando alguns dos efeitos que os coeficientes hidrodinâmicos alteram no processo, posteriormente, a justificativa e os objetivos do trabalho são mostrados. Uma revisão bibliográfica (capítulo 2) foi escrita com objetivo de esclarecer os trabalhos em que aparecem os coeficientes hidrodinâmicos de estruturas simples e onde eles são aplicados. Também são expostos os pontos fortes e limitações das normas frequentemente usadas nas operações de instalação de equipamentos. Para finalizar, é destacada a importância do efeito da correnteza em estudos de geometrias em oscilação forçada, citando os poucos artigos encontrados sobre o tema.

O capítulo 3 apresenta toda a formulação matemática envolvida, a começar pelos parâmetros adimensionais importantes do fenômeno, passando para as equações mais importantes, e seguindo com os coeficientes hidrodinâmicos encontrados no escoamento e as diferentes formas de calculá-lo. No capítulo 4, de métodos numéricos, o foco a formulação

numérica utilizada nesse trabalho, são apresentados a técnica de *Computational Fluid Dynamics*, as hipóteses admitidas, os modelos usados e as condições de operação buscadas, todos estes responsáveis pela escolha dos parâmetros variados nas simulações.

Já no capítulo 5 o processo de validação é realizado, utilizando-se de resultados experimentais para geometrias simples em oscilação forçada. Essa primeira validação serviu de base para a confecção do modelo numérico desejado para o efeito combinado da correnteza, levando em consideração as várias características desse modelo numérico. Os resultados presentes no capítulo 6 foram separados em dois capítulos principais: um para validação e resultados estendidos de simulações com número de Re baixos; e outro para a extrapolação do modelo numérico final deste trabalho em regiões mais próximas das operações reais, com altos Re , em que não foram encontrados dados para validação. Também estão presentes neste capítulo as discussões sobre os efeitos dos parâmetros adimensionais do escoamento nos coeficientes hidrodinâmicos e no *vortex shedding*.

A aplicação dos resultados dos coeficientes hidrodinâmicos variáveis será mostradas no 7. Alterações para adicionar os resultados obtidos nos capítulos anteriores foram realizadas em um programa que é baseado nas recomendações práticas para encontrar a janela de operação para instalação de equipamentos submarinos.

Finalmente, reiteram-se as conclusões obtidas com o presente estudo e são apresentadas sugestões de desenvolvimento e trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Normas para Instalação de Equipamentos Submarinos

Na indústria naval *offshore* é necessária a instalação de diversos equipamentos submarinos durante o processo de exploração oceânica. Muitos desses equipamentos podem ter grandes dimensões e pesar várias toneladas. Pela diversidade de equipamentos e quantidade de variáveis operacionais, recomendações práticas são as mais usadas durante um projeto de instalação. Uma dessas recomendações é a DNV-RP-N103, (2017), que tem como objetivo guiar a modelagem e análise das operações marítimas de içamento e lançamento de equipamentos, desde a região de entrada da água, *splash zone*, até o leito oceânico.

Durante a operação, as estruturas a serem instaladas sofrem diversas forças hidrodinâmicas das ondas, correntezas e pelo movimento induzido da própria embarcação. Essas forças tendem a ser transientes, sofrendo com grandes variações pelos efeitos da inércia e arrasto. As forças hidrodinâmicas devem ser calculadas da maneira mais precisa possível, por se relacionarem diretamente com:

- a) A seleção das embarcações de içamento e capacidades dos guindastes necessários;
- b) A estabilidade do equipamento no mar;
- c) A janela de operação climática necessária para a instalação.

A norma da DNV-RP-N103 calcula os carregamentos hidrodinâmicos presentes no processo, mas várias simplificações são utilizadas. Uma dessas simplificações é a utilização de coeficientes hidrodinâmicos de geometrias simples em estruturas muito mais complexas,

sem levar em conta ainda outros efeitos, como de correntezas, proximidade com superfícies ou das ondas. Para mitigar este problema com a norma, estudos e testes são feitos com estruturas e condições mais reais de operação, traduzindo, assim, em uma operação mais segura e menos onerosa.

(MINGUEZ et al., 2015) é um dos trabalhos que usa uma metodologia alternativa no cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos para contornar o conservadorismo/limitação da norma. O autor utiliza simulações numéricas para calcular coeficientes hidrodinâmicos para uma estrutura submarina genérica, chamada de *mud-mat*, para duas escalas de tamanho diferentes, validando com resultados de testes experimentais. Os resultados hidrodinâmicos do modelo são às recomendações da norma, encontrando diferenças significativas para os coeficientes de massa adicional e amortecimento quando $KC < 1,5$. Por fim, duas previsões da janela de operação para instalação são realizadas, uma seguindo à norma e outra aos coeficientes do modelo numérico, mostrando que a janela de operação disponível para modelo numérico é muito maior.

Mesmo utilizando uma geometria relativamente simples e que algumas recomendações a mais são encontradas para ela na norma DNV-RP-N103, foram encontradas diferenças relevantes no projeto de instalação. Para estruturas usuais ainda mais complexas, como de *manifolds*, em que as recomendações das normas parecem ainda menos aplicáveis, os benefícios desses tipos de análises alternativas são ainda mais promissores.

2.2 Estruturas Complexas

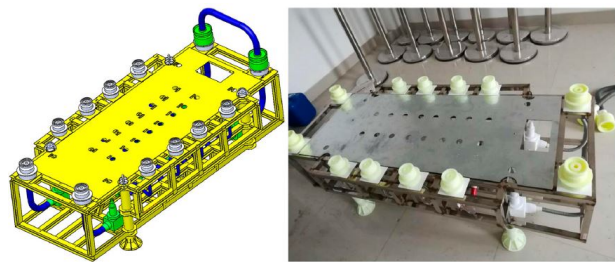
Estudos de oscilação forçada com corpos submersos próximos aos reais são mais complexos e, portanto, menos abundantes na literatura. Sua geometria tridimensional, porosidades e dimensões grandes e variadas tornam a análise, tanto experimental quanto numérica, mais difícil. Por isso, é usual em estudos a escolha de geometrias de equipamentos comuns na indústria naval. FERNANDES; MINEIRO, (2007) usa de um equipamento chamado de *manifold*, aplicando dois métodos para encontrar a massa adicional desta geometria. O primeiro utiliza um procedimento teórico, referenciado como *frequency limit method*, enquanto o segundo aplica uma abordagem experimental.

Um trabalho experimental utilizando várias geometrias diferentes de *suction anchors*

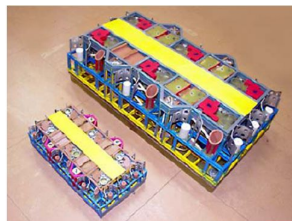
foi realizado por SOLAAS; SANDVIK, (2017). Os coeficientes hidrodinâmicos foram calculados variando os parâmetros geométricos de altura, diâmetro, perfuração e geometria dos buracos na estrutura, encontrando variações significativas comparada à sugestão da norma DNV-RP-N103 para essa estrutura.

Outros estudos mais recentes para *manifolds* foram realizados por DU et al., (2021) e PESTANA et al., (2021). Em (DU et al., 2021) os autores utilizaram duas abordagens, experimental e numérica, para encontrar os coeficientes hidrodinâmicos do *manifold*, concluindo que a abordagem numérica realizada pode ser utilizada para encontrar os coeficientes de outros equipamentos complexos com uma boa precisão. PESTANA et al., (2021) completou a análise de instalação encontrando a janela de operação do *manifold* utilizando os coeficientes pela DNV-RP-N103. Através de seus resultados experimentais, comprova a expansão da janela operacional. Isso se deve ao fato de que o coeficiente de arrasto para estruturas reais são maiores, principalmente para KC baixos, o que leva a um maior amortecimento. Por outro lado, o coeficiente de massa adicional tende a aumentar com o aumento do KC , dois processos que, normalmente, não são levados em consideração nas recomendações práticas. Finalmente, coeficientes hidrodinâmicos para algumas estruturas submarinas simplificadas podem ser vistas em (ORITSLAND, 1989).

Figura 2: Imagens de duas estruturas complexas parecidas com *manifolds* reais usados em trabalhos citados acima.



(a) *Manifold* de DU et al., (2021).



(b) *Manifold* de FERNANDES; MINEIRO, (2007).

Fonte: DU et al., (2021) e FERNANDES; MINEIRO, (2007)

2.3 Estudos de Oscilação Forçada em Estruturas Simples

Estudos com estruturas complexas parecidas com os equipamentos reais são difíceis de se reproduzir para validações e tornam o estudo dos efeitos isolados encontrados nas simulações mais difíceis de serem analisados também. Por isso, simplificações são realizadas e assim os estudos de oscilação forçada em corpos submersos são realizados, principalmente, para dois grandes grupos:

- a) *Heave plates*: que são placas utilizadas em plataformas *offshore* para reduzir seu movimento de afundamento (*heave*) ou nos cascos de navios para reduzir seu movimento de rolagem;
- b) Equipamentos submarinos: relacionados a obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos de equipamentos submarinos.

Os estudos de *heave plates* investigam, experimentalmente ou numericamente, estruturas simples como discos e placas sob oscilação forçada, em que alguns parâmetros geométricos ou do movimento são modificados. Em relação à geometria, vê-se na literatura modificações associadas à razão de aspecto, ao formato, à porosidade, ao número de placas e suas disposições. Já em relação ao movimento, usualmente são alterados os parâmetros adimensionais, como o número de Keulegan-Carpenter (KC), o número de Stokes (β) e o número de Reynolds (Re). Devido ao grande número de estudos do primeiro grupo, eles são utilizados para validar modelos numéricos.

Estudos experimentais de geometrias simples em oscilação forçada são usados há mais de 20 anos para se calcular os seus coeficientes hidrodinâmicos. THIAGARAJAN; TROESCH, (1998) estudaram o escoamento de discos sólidos oscilando em um fluido, com o uso da técnica de *Particle Image Velocimetry*, analisando os escoamentos de cilindros com disco acoplados em oscilação forçada. Posteriormente, vários trabalhos experimentais buscaram encontrar, principalmente, os coeficientes hidrodinâmicos de arrasto (C_d) e massa adicional (C_a) para várias geometrias simples, variando alguns parâmetros geométricos por vez.

TAO; DRAY, (2008) investigaram as características hidrodinâmicas para discos sólidos

e porosos em oscilação forçada. Aumentando o KC para valores de até 1,2, foi percebido - de maneira linear - uma diminuição do coeficiente de amortecimento, relacionado por C_d , e aumento da massa adicional, relacionado pelo C_a . Com o uso de discos porosos de até 20% de porosidade, os testes mostraram um acréscimo no C_d para baixos KC e uma redução do C_a , se comparado aos discos sólidos. Os experimentos de LI et al., (2013) mostraram a mesma relação linear dos coeficientes hidrodinâmicos para placas oscilando com KC de até 1,2. Contudo, foram realizados mais testes variando a espessura das placas, o formato das bordas, a porosidade e o tamanho dos furos para as placas porosas. A espessura usada nas placas mostrou uma relevância muito grande para C_d , porém, pequena para o C_a . O coeficiente C_d se mostrou quase independente do formato da borda utilizado e o C_a obteve pouca dependência. A porosidade das placas obteve os mesmos resultados que os discos porosos de TAO; DRAY, (2008) e o tamanho do furo não mostrou uma influência significativa nos coeficientes hidrodinâmicos.

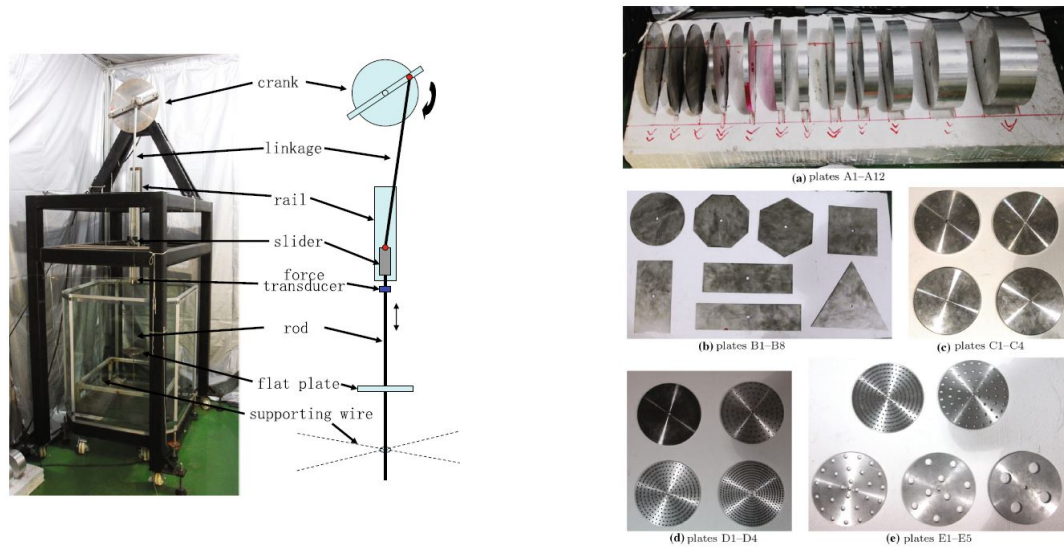
TIAN et al., (2017a) aprofundaram os estudos experimentais realizando um trabalho com mais de 40 configurações para valores de KC entre 0,15 a 3,15, englobando grande parte das condições de operação de instalação de equipamentos submarinos e para plataformas *offshore* em que geometrias simples são usadas. Pela quantidade de geometrias e condições testadas esse trabalho é considerado uma boa base de validação para muitos modelos futuros.

Embora os coeficientes hidrodinâmicos sejam uma parte fundamental para aplicações na engenharia naval, outras propriedades do escoamento relacionadas aos vórtices, como o fenômeno de *vortex shedding*, foram pouco estudadas em trabalhos experimentais envolvendo estes tipos de geometrias. Essas características do escoamento são essenciais em muitas aplicações, como por exemplo, para calcular vibrações geradas pelos vórtices em estruturas marítimas. Para elucidar esses fenômenos, a abordagem numérica tem sido utilizada.

2.4 Estudos com Modelagem Numérica

HOLMES et al., (2001) utilizaram a *Computational Fluid Dynamics (CFD)* para analisar o movimento de afundamento (*heave*) de placas quadradas usadas em plataformas

Figura 3: Imagens do trabalho experimental de TIAN et al., (2017a) mostrando o aparato experimental usado e algumas geometrias simples testadas.



Fonte: TIAN et al., (2017a).

do tipo SPAR. As simulações numéricas foram utilizadas, principalmente, para obter a distribuição de cargas nas placas e ajudar no design do tempo de vida por fadiga dessas estruturas. Os resultados numéricos das placas quadradas para condições de um movimento harmônico e, posteriormente, para condição de mar aleatório comparando aos dados experimentais, mostraram que análises por *CFD* são uma boa ferramenta para calcular os coeficientes hidrodinâmicos e distribuição de forças.

TAO; THIAGARAJAN, (2003 A, 2003 B) analisaram o escoamento de cilindros com um disco acoplado oscilando verticalmente com o uso de *Direct Numerical Simulation (DNS)* baseado no método de diferenças finitas. Para os parâmetros utilizados, foram visualizados três regimes de *vortex shedding* diferentes, nomeados como: independente, iterativo e uni-direcional. Os parâmetros que mais influenciaram o escoamento e o regime de *vortex shedding* foram o KC , β e a geometria do disco analisado.

Na tese de doutorado de MENDOZA, (2015), o autor teve como foco o cálculo do amortecimento e massa adicional de *heave plates* para estruturas flutuantes *offshore* de turbinas eólicas. Simulações numéricas bidimensionais foram realizadas usando a abordagem de *Volume of Fluid (VOF)* e malhas adaptativas; todas as simulações foram comparadas aos resultados experimentais. Os coeficientes hidrodinâmicos foram calculados para condições de mar profundo, longe da influência de superfícies, e para condições

próximas da superfície do mar e do leito oceânico, mostrando uma forte influência dessas condições nos resultados de massa adicional e amortecimento. O estudo também incluiu placas com geometrias diferentes para as bordas, os *flaps*, e uma placa porosa do estilo fractal. Por fim, o comportamento do processo de *vortex shedding* foi analisado com contornos do escoamento e com termos de *enstrophy* associados ao KC das simulações.

O estudo numérico de geometrias simples em oscilação forçada continuou em estudos mais recentes. Em (TIAN et al., 2017b), *DNS* foi usado para discos oscilando com valores de KC maiores, de 1 até 24, e para Re de até 800. Cinco regimes de escoamento foram visualizados com relação ao Re e KC das simulações. CHREIM et al., (2020a) utilizaram um modelo numérico tridimensional mais simples e conseguiram bons resultados para discos e placas planas em oscilação forçada. O foco deste trabalho foi o cálculo de coeficientes hidrodinâmicos de geometrias simples em instalação de equipamentos submarinos, sendo que as condições de operações foram parecidas às encontradas neste processo.

2.5 Efeitos Adicionais e da Correnteza

Em estudos para determinação de coeficientes hidrodinâmicos é usual e recomendado aplicar um movimento de oscilação forçada senoidal na geometria capaz de refletir o movimento induzido pela embarcação, guindaste ou pelo próprio mar. No entanto, alguns estudos já mostraram mudanças significativas ao analisar outros efeitos associados (SARPKAYA, 2010). Um dos efeitos analisados para operações de instalação de equipamentos é o da proximidade com superfícies livres, à linha d'água. WADHWA; THIAGARAJAN, (2009) e WADHWA; KRISHNAMOORTHY; THIAGARAJAN, (2010) analisam esse efeito experimentalmente em discos oscilando para KC baixos. Variações nos coeficientes hidrodinâmicos são calculados com medições das forças, percebendo um aumento tanto do C_d quanto do C_a quando o disco oscila perto da superfície livre. Os resultados sugerem a existência de um valor crítico para KC , quando, abaixo deste valor, a massa adicional varia linearmente.

FU; XU; CHEN, (2014) também analisaram, experimentalmente, o efeito da proximidade com superfícies, porém, utilizando um cilindro em oscilação forçada com uma correnteza constante. Neste trabalho um aumento nos coeficientes pela proximidade com a

superfície livre também é percebido, sendo realizadas análises adicionais a fim de observar o fenômeno de Vibração Induzida por Vórtices (VIV). Comparado a condição de sem paredes por perto, o número de Strouhal sofreu um aumento para as condições com proximidades às paredes. A proximidade às paredes teve um efeito importante na transferência de forças para o escoamento, resultando em um efeito mais intenso de VIV. Apenas quando a distância é muito pequena que ocorre uma quase total supressão do efeito da VIV.

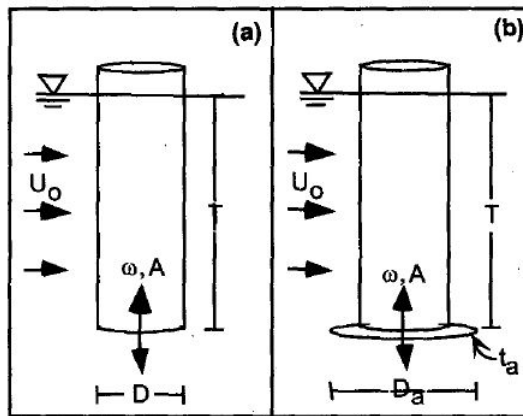
O efeito adicional analisado por MENTZONI; KRISTIANSEN, (2020) foi a paritr do movimento da geometria e com a presença de ondas. Os autores estudaram os carregamentos hidrodinâmicos de placas perfuradas bidimensionais em testes experimentais e simulações numéricas com uma oscilação forçada, ondas e com um movimento orbital. Em geral, os coeficientes hidrodinâmicos foram similares para um movimento orbital e de oscilação para KC baixos. No entanto, para $KC > 1,0$ ocorreu uma diferença significativa para C_a e C_d comparando com a condição de movimento oscilatório. Para analisar o efeito das ondas na geometria foi utilizada uma força normalizada, variando a amplitude e período para as ondas. Em média, os resultados mostraram um aumento da amplitude da força pelo aumento das ondas ou aumento de KC . Para baixos KC , as simulações com movimento orbital previram muito bem a amplitude da força gerada pelas ondas, mostrando similaridades entre estas duas simulações para KC baixos.

A correnteza é um fenômeno presente em quase todas as áreas da engenharia oceânica, mas considerado praticamente irrelevante pelas normas técnicas para o processo de lançamento/içamento de equipamentos submarinos, mesmo com vastas informações da influência deste efeito em análises VIV de *risers* e tubulações oceânicas. Trabalhos considerando o efeito de ondas são relevantes para embarcações em geral, e, para a instalação de equipamentos, apenas durante o breve momento de entrada na água, relacionado principalmente ao coeficiente de *slamming*. Por outro lado, a correnteza influencia diretamente os coeficientes de amortecimento e massa adicional durante toda operação de descida até o leito oceânico. Porém, trabalhos considerando esse efeito são relativamente escassos.

THIAGARAJAN; TROESCH, (1998) foi um dos primeiros a considerar esse efeito em uma aplicação similar às instalações. O autor estudou um cilindro com um disco acoplado na ponta, reproduzindo um modelo de plataformas do tipo *tension leg platforms*. Os ensaios experimentais foram realizados colocando o cilindro em oscilação forçada

e adicionando correntezas constantes. Apenas o efeito do amortecimento foi analisado e os resultados mostraram um aumento de quase 90% devido a adição de pequenas correntezas. Comparando a um cilindro simples, a combinação de cilindro+disco e correnteza gerou um aumento do amortecimento por um fator de seis. O *vortex shedding* dessa configuração mostrou simetria em relação ao eixo de oscilação, um formato de vórtices do tipo anel, característico deste tipo de escoamento, uma relação forte com o KC e geometria da estrutura e uma relação bem fraca com o β .

Figura 4: Configurações do escoamento usadas no trabalho THIAGARAJAN; TROESCH, (1998), em (a) cilindro oscilando verticalmente na presença de uma correnteza constante horizontal e em (b) cilindro com um disco acoplado na presença de correnteza.



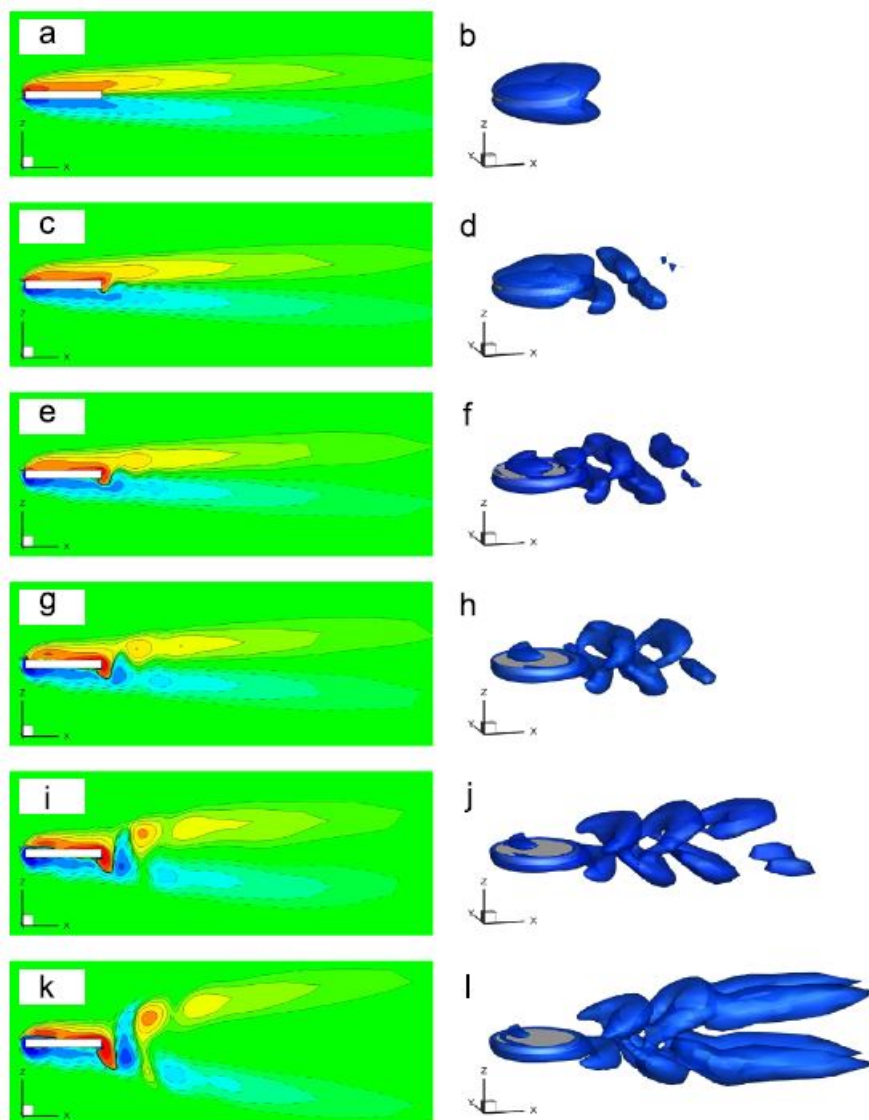
Fonte: THIAGARAJAN; TROESCH, (1998).

GAO et al., (2020) investigaram os coeficientes hidrodinâmicos para cilindros circulares lisos em oscilação forçada, para KC de até 5 e Re altos, na presença de correntezas constantes *in-line*, com a mesma direção que a oscilação, e correntezas cruzadas, perpendiculares ao eixo de oscilação. Dois modelos para os cálculos dos coeficientes foram utilizados, o primeiro modelo é o já conhecido modelo de Morison, que utiliza o conceito de velocidades relativas. Já o segundo modelo usa o conceito de velocidades independentes, separando o coeficiente de C_d em dois, C_{ds} que é o coeficiente de arrasto para um escoamento uniforme num cilindro, e o C_{do} , coeficiente de arrasto resultante do movimento oscilatório. O modelo independente se aproximou mais dos resultados experimentais, principalmente para correntezas *in-line*, mas a adoção dele é menos prática pela utilização de mais um coeficiente na análise. Resumidamente, podemos entender um aumento do C_d e diminuição C_a conforme a correnteza aumenta.

Pensando na performance de *heave plates* em plataformas SPAR, YANG et al., (2014)

realizaram simulações *DNS* para discos circulares com várias espessuras em oscilação forçada vertical e com correntezas constantes perpendiculares, variando o KC até 1 para $Re < 600$. Uma validação em etapas foi realizada para melhor verificação do modelo numérico. Em relação aos coeficientes hidrodinâmicos, os resultados mostram claramente o aumento do amortecimento e diminuição da massa adicional conforme a correnteza aumenta. O coeficiente C_x , relacionado ao arrasto no eixo da correnteza, mostrou uma diminuição com o aumento da correnteza, no entanto, conforme o KC aumenta a dispersão dos valores aumenta consideravelmente. Vale ressaltar que a força F_x em relação a este eixo é consideravelmente menor que as forças apresentadas nos demais eixos. O autor finaliza analisando o escoamento das simulações variando a correnteza com um KC constante e variando o KC com uma correnteza constante. Um *vortex shedding* periódico é encontrado em todas as simulações com oscilação e correnteza presentes. Além disso, o formato dos vórtices muda, passando desde um formato anelar simétrico, para simulações com apenas oscilação forçada, passando para um formato de "minhoca" e, por último, para um formato de "grampo". O autor confirma que o fenômeno do *vortex shedding* tem relação direta com o KC e correnteza presente no escoamento.

Figura 5: Visualização do escoamento de um disco em oscilação forçada na presença de correntezas constantes de YANG et al., (2014), as simulações tiveram o mesmo valor de correnteza e aumentou-se a amplitude da oscilação nas imagens de (a) a (k). Mais informações no trabalho citado.



Fonte: YANG et al., (2014).

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

3.1 Parâmetros Adimensionais

Pequenas oscilações senoidais são frequentemente usadas para determinar os coeficientes de massa adicional e arrasto de corpos com vários formatos (SARPKAYA, 2010). Para geometrias de corpos robustos oscilando em um fluido, dois números adimensionais são muito importantes: o número de Keulegan-Carpenter (KC) e o número de Stokes (β) (KEULEGAN; CARPENTER, 1958), definidos por

$$KC = \frac{2\pi A}{L} = \frac{U_m T}{L} \quad (3.1)$$

$$\beta = \frac{Re_o}{KC} = \frac{L^2}{\nu T} \quad (3.2)$$

onde A é a amplitude de oscilação, T o período da oscilação, L uma dimensão característica (diâmetro do disco) e ν a viscosidade cinemática do fluido. U_m é definido como velocidade máxima da oscilação dada por $U_m = A\omega$, com ω sendo a frequência angular. O número de Reynolds (Re_o) do movimento oscilatório, baseado em U_m , e o Re_c , baseado na velocidade da corrente U_c , são dados a seguir por Eq. 3.3 e 3.4:

$$Re_o = \frac{U_m L}{\nu} \quad (3.3)$$

$$Re_c = \frac{U_c L}{\nu} \quad (3.4)$$

Outro parâmetro adimensional utilizado quando adicionado a correnteza no movimento oscilatório será o da velocidade reduzida (V_r), definida como

$$V_r = \frac{U_c}{\omega L} = \frac{U_c T}{2\pi L} \quad (3.5)$$

3.2 Equações Governantes

As equações que governam o escoamento de fluidos compressíveis ou incompressíveis, tanto turbulentos quanto laminares, são as equações de Navier-Stokes, que junto à equação de conservação de massa, serão a base para toda a formulação matemática. A equação de conservação de massa é definida por

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

em que o primeiro termo representa a variação temporal da massa específica do fluido, enquanto o segundo descreve a taxa de variação da massa por unidade de volume. Considerando a água como um fluido Newtoniano incompressível, a Eq. 3.6 se reduz a

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

As equações de conservação de quantidade de movimento são obtidas pela aplicação da segunda lei de Newton, em que a taxa de variação temporal da quantidade de movimento de uma partícula é igual à resultante das forças que agem sobre a partícula. Essas forças podem ser de dois tipos:

- a) Forças de campo, que agem sobre a massa do fluido como um todo;
- b) Forças de superfície, que agem apenas sobre a superfície dos elementos do fluido.

Neste trabalho, apenas a força de campo da gravidade será considerada. Para um escoamento tridimensional em coordenadas cartesianas, as equações de conservação da quantidade de movimento aparecem como

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (3.8)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (3.9)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (3.10)$$

Em uma forma simplificada podemos escrever as três equações como

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + f_g \quad (3.11)$$

Ou na sua forma tensorial

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + \rho g_{x_i} \quad (3.12)$$

Pode-se explicar a Eq. 3.11 entendendo o termo $\rho \frac{DV}{Dt}$ como sendo a força em cada partícula do fluido, em que o lado direito da equação é justamente essa força sendo decomposta em três componentes:

- a) $-\nabla p$: um termo da pressão que se relaciona com as tensões normais no fluido;
- b) $\mu \nabla^2 V$: o termo das tensões, responsável pelo movimento devido à fricção e às tensões de cisalhamentos;
- c) f_g : o termo de forças de campo, em que apenas a gravidade será considerada.

As Eqs. 3.11 e 3.12 são chamadas de equações de Navier - Stokes. Mesmo para geometrias e escoamentos simples, essas equações são difíceis de resolver analiticamente. Por conta disso, métodos numéricos são usados utilizando a técnica de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para encontrar soluções aos mais diversos escoamentos de forma aproximada, contudo, precisa.

3.3 Equação de Morison

Um objeto içado em águas profundas por navios-guindaste típicos experimenta um movimento oscilatório como resultado do movimento do navio sendo excitado pelas ondas do oceano. Este fluxo oscilatório introduz forças hidrodinâmicas no equipamento que devem ser avaliadas para prever a dinâmica do sistema durante a operação. Segundo SARPKAYA, (2010), em escoamentos transientes como este, a direção da esteira muda de montante para jusante à medida que a velocidade da carga muda de sinal, o escoamento pode mudar de regime laminar para turbulento e o equipamento pode oscilar dentro da sua própria esteira. Devido à complexidade deste escoamento e à geometria não trivial dos equipamentos reais, nenhuma solução analítica está disponível para representar as forças hidrodinâmicas que são geradas. A representação dessas forças deve se basear em relações empíricas ou semi-empíricas calibradas por meio de experimentos ou simulações numéricas.

Historicamente, a equação de Morison (MORISON; JOHNSON; SCHAAF, 1950) tem sido usada para aproximar essas forças. Nesta formulação, a carga hidrodinâmica é dividida em um termo proporcional à aceleração e um termo proporcional ao quadrado da velocidade (TOMMASINI et al., 2021).

A força $dF_m(t)$ exercida em um volume infinitesimal, em função do tempo t , de um objeto se movendo com velocidade $\dot{S}(t)$ e aceleração $\ddot{S}(t)$, imerso em um fluido de massa específica ρ , é descrita por dois componentes: (i) uma de arrasto C_{ds} que inclui as parcelas (dinâmicas) de fricção e forma; e (ii) uma de inércia, proporcional à aceleração do objeto, exercida sobre a massa adicional deslocada e caracterizada por um coeficiente de massa adicional C_{as} . Assim, $dF_m(t)$, desconsiderando a massa do objeto, pode ser descrita como

$$dF_m(t) = \left[\rho A_0(x) C_{as} \ddot{S}(t) + \frac{1}{2} \rho D(x) C_{ds} \dot{S}(t) |\dot{S}(t)| \right] dx \quad (3.13)$$

A equação acima é a chamada equação de Morison, sendo $D(x)$ um comprimento seccional característico do corpo, normal à direção do escoamento, $A_0(x)$ uma área seccional de referência e dx uma espessura transversal infinitesimal. Agora, admitindo que o corpo oscile de maneira senoidal, com amplitude seccional A e frequência angular ω , é possível escrever:

$$S(t) = A \cos(\omega t) \quad (3.14)$$

$$\dot{S}(t) = -A\omega \sin(\omega t) \quad (3.15)$$

$$\ddot{S}(t) = -A\omega^2 \cos(\omega t) \quad (3.16)$$

Logo, substituindo as equações (3.14) e (3.15) em (3.13), obtém-se:

$$dF_m(t) = \left[\rho A_0(x) A \omega^2 C_{as} \sin(\omega t) - 0,5 \rho D(x) A^2 \omega^2 C_{ds} \cos(\omega t) |\cos(\omega t)| \right] dx \quad (3.17)$$

Essa análise pode ser estendida para toda a extensão do corpo (ao longo de sua espessura), considerando, em adição às hipóteses já impostas, que o corpo admitido rígido possui a mesma velocidade e aceleração em todos os seus pontos. Logo, é possível escrever:

$$F_m(t) = \int_{\text{corpo}} dF_m(t) = \rho \forall A \omega^2 C_a \sin(\omega t) - 0,5 \rho A_p A^2 \omega^2 C_d \cos(\omega t) |\cos(\omega t)| \quad (3.18)$$

Sendo os coeficientes de massa adicional (C_a) e de arrasto (C_d) para o corpo como um

todo, são obtidos por uma espécie de média ponderada:

$$C_a = \frac{\int_{corpo} C_{as} A_0(x) dx}{\forall} \quad (3.19)$$

$$C_d = \frac{\int_{corpo} C_{ds} D(x) dx}{A_p} \quad (3.20)$$

em que \forall e A_p são o volume e a área de seção transversal de referência. A equação de Morison foi construída diretamente a partir das teorias de ondas e foi confirmada por experimentos, ou seja, ela é uma equação empírica. Mesmo sendo criada a partir de resultados para cilindros verticais sob efeito de ondas, a equação de Morison foi confirmada e é utilizada para uma grande gama de aplicações da engenharia naval. Contudo, algumas limitações podem ser encontradas.

Em (GAO et al., 2020) podemos ver uma situação em que a equação de Morison foi modificada, para a situação de um cilindro oscilando com a presença de uma correnteza constante no mesmo eixo, utilizando um modelo com velocidades independentes e adição de mais um coeficiente para o arrasto, baseado no modelo de MOE; VERLEY, (1980).

3.4 Coeficientes Hidrodinâmicos e Métodos de Cálculo

Com o conhecimento das forças exercidas nos corpos, a partir de testes experimentais ou simulações numéricas, os coeficientes C_a e C_d podem ser estimados de várias maneiras. Cada método pode levar a diferentes resultados para os mesmos dados de entrada devido à diferentes hipóteses associadas a cada procedimento. Neste trabalho, seis métodos para calcular os coeficientes serão usados e comparados.

A primeira abordagem é baseada no trabalho original de KEULEGAN; CARPENTER, (1958), em que $F_m(t)$ pode ser expresso por séries de Fourier, Eq. 3.21, e comparado a Eq. 3.18, relacionando C_a e C_d pelos coeficientes A_n e B_n , como segue:

$$F_m = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{sen}(n\omega t + \phi) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \text{cos}(n\omega t + \phi) \quad (3.21)$$

O método será chamado de *Fourier Series Approach with B₁* (FSAB1) quando assu-

mido que apenas o coeficiente B_1 será significativo para cálculo de C_d , usando Eq. 3.22, 3.23 e 3.24. Quando outros coeficientes B_n são considerados, o método será chamado de *Fourier Series Approach with B_n (FSABn)*, usando a Eq. 3.25 para calcular C_d .

$$C_a = \frac{A_1}{\rho V A \omega^2} \quad (3.22)$$

$$C_d = \frac{2\pi}{\rho A_p (A\omega)^2} \frac{B_n}{a_n} \quad (3.23)$$

$$a_n = \frac{8(-1)^{\frac{n+1}{2}}}{n(n^2 - 4)} \quad (3.24)$$

$$C_d = \frac{2\pi}{\rho A_p (A\omega)^2} \sum_n \left(\frac{B_n}{a_n} \right) \quad (3.25)$$

Outro método bastante utilizado para obter C_a e C_d é através do método de Mínimos Quadrados, que procura minimizar os resíduos dados pelas Eq. 3.26 (JOURNÉE; MASSIE, 2001):

$$R(C_a, C_d) = \int_{t_i}^{t_f} w_{if}^2(t) [F_h(t) - F_m(t, C_a, C_d)]^2 dt \quad (3.26)$$

Aqui, $w_{if}(t)$ é uma função peso. Quando igual a 1, o método será chamado de *Least Square Method – Integral Form (LSMIF)* e quando uma ênfase for desejada para os picos, $w_{if}(t) = F_h(t)$, o método será chamado de *Weight Least Square Method – Integral Form (WLSMIF)*. Os últimos dois métodos testados também tentam minimizar os resíduos através do método de Mínimos Quadrados, usando o fato de que $F_h(t)$ é uma combinação linear de \ddot{S} e $\dot{S}(t) \left| \dot{S}(t) \right|$ (MIWA, 2005), um sistema de matrizes pode ser obtido:

$$\vec{x} = M^{-1} \vec{b} \quad (3.27)$$

$$M = (m_{ij})_{n \times p}, \quad n, p = 1, 2 \quad (3.28)$$

$$m_{11} = \sum_{t=t_i}^{t_f} w_{LS}(t) [\ddot{S}(t)]^2 \quad (3.29)$$

$$m_{12} = \sum_{t=t_i}^{t_f} w_{LS}(t) \dot{S}(t) \left| \dot{S}(t) \right| \ddot{S}(t) \quad (3.30)$$

$$m_{21} = \sum_{t=t_i}^{t_f} w_{LS}(t) \dot{S}(t) \left| \dot{S}(t) \right| \ddot{S}(t) \quad (3.31)$$

$$m_{22} = \sum_{t=t_i}^{t_f} w_{LS}(t) \left[\dot{S}(t) \left| \dot{S}(t) \right| \right]^2 \quad (3.32)$$

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} \sum_{t=t_i}^{t_f} w(t) F_h(t) \ddot{S}(t) \\ \sum_{t=t_i}^{t_f} w(t) F_h(t) \dot{S}(t) |\dot{S}(t)| \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} \rho \forall C_a \\ \frac{1}{2} \rho A_p C_d \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

Portanto, C_a e C_d pode ser obtido por \vec{x} com $w_{LS}(t)$ também sendo uma função peso. Para $w_{LS}(t) = 1$, o método é chamado de *Least Square Method - Linear System (LSMLS)*, enquanto para $w_{LS}(t) = F_h^2(t) / \sum_{t=t_i}^{t_f} F_h^2(t)$, ele será chamado de *Weight Least Square Method - Linear System (WLSMLS)* no presente trabalho. Uma explicação mais detalhada dos métodos pode ser encontrada em (CHREIM et al., 2020b). Finalmente, o coeficiente de arrasto em relação ao eixo x , o eixo da correnteza, é dado pela Eq. 3.35:

$$C_x = \frac{F_x}{0,5 \rho U_c^2 D e} \quad (3.35)$$

onde F_x é a força atuando no disco, calculado diretamente integrando a pressão e tensão de cisalhamento viscosa através da superfície do disco, com e sendo a espessura do disco e \overline{C}_x sendo a correspondente média temporal.

4 MÉTODOS NUMÉRICOS

4.1 *Computational Fluid Dynamics*

Soluções para as equações de Navier-Stokes são difíceis de resolver devido às suas equações diferenciais de segunda ordem não-lineares, além de toda característica caótica da turbulência. Portanto, soluções analíticas só foram determinadas para poucos casos. Por essa razão, no estudo do movimento de fluidos, muitas vezes são utilizados ensaios experimentais, como testes em túneis de vento e tanques d'água. Contudo, vale destacar que essa abordagem possui algumas limitações. Nem todos os fenômenos conseguem ser reproduzidos facilmente em laboratório, por vezes em decorrência de problemas de escala ou por custo e tempo proibitivos. Outra possível limitação é no objetivo da realização do experimento, algumas propriedades do escoamento são mais simples de serem encontradas, como por exemplo a temperatura e pressão, mas efeitos como de vórtices, combustões e escoamento multifásicos, necessitam de mais aparatos experimentais.

A técnica de *Computational Fluid Dynamics* (*CFD*) é a terceira alternativa de solução. *CFD* é a área da computação científica que estuda métodos computacionais para simulação de fenômenos que envolvem fluidos em movimento com ou sem trocas de calor (FORTUNA, 2000). Basicamente, o objetivo é obter as distribuições de velocidades, pressões e temperaturas na região do escoamento, através da resolução das equações de Navier-Stokes numericamente em um domínio discretizado, dividido em pequenos volumes, conhecido como malha computacional. Um dos mais comuns métodos de discretização é o Método dos Volumes Finitos (MVF), que será usado neste trabalho.

Praticamente todos os métodos de *CFD* utilizam a seguinte abordagem:

- a) Pré – Processamento;

- Criação da geometria;
 - Discretização do domínio (Malha);
 - Definição dos modelos físicos e equações;
 - Definição das condições de contorno;
- b) Realização da simulação;
- c) Pós – processamento;
- Análise dos resultados;
 - Visualização dos resultados.

Se as equações governantes forem conhecidas e precisas, soluções com o uso de *CFD* podem ter qualquer acurácia desejada. No entanto, em muitos fenômenos, como por exemplo o da turbulência, as equações exatas ou não são conhecidas ou são muito difíceis de alcançar a solução numérica. Por esse motivo são usados modelos para representar a solução desses fenômenos, fazendo com que os resultados de *CFD* sejam aproximações. A validação desses modelos passa a ser uma parte fundamental do processo de aplicação do *CFD*. Validar os modelos numéricos com testes experimentais ou resultados analíticos é a melhor abordagem para um estudo de mecânica dos fluidos, pois, depois de o modelo numérico ter sido validado, extrapolar os resultados para outras condições de entrada, mudanças de propriedades ou geometrias similares se torna um processo mais trivial que gera inúmeros benefícios na engenharia.

Um dos pontos mais fortes no uso de *CFD* é a facilidade com que visualizações das soluções podem ser realizadas. Uso de contornos, vetores, gráficos ou vídeos para escoamentos transientes podem ser criados com extrema facilidade e tornam uma parte fundamental na interpretação dos resultados, uma ferramenta mais difícil de ser explorada em testes experimentais.

Pela quantidade de modelos que podem ser usados em uma análise de um escoamento complexo, tanto para as equações físicas quanto para as equações de discretização, um profundo conhecimento do fenômeno físico é necessário para a correta análise dos resultados. Isso se dá pelo fato de que, algumas vezes, uma visualização do escoamento pode parecer

boa, mas completamente incorreta, através da solução errada de condições de contornos, propriedades do fluido, entre outros.

O programa ANSYS Fluent[®], com precisão dupla, foi usado nas simulações. Esse programa é baseado no MVF para resolver as equações de difusão-convecção, onde uma equação de transporte geral transiente é integrada em um volume de controle.

4.2 Método de Volumes Finitos

O método dos Volumes Finitos (MVF) é baseado na discretização das equações de Navier-Stokes de forma conservativa. O domínio é formulado usando um número finito de volumes de controle, quando todo o domínio é discretizado de forma contínua fazendo com que cada volume tenha outros volumes como vizinhos. Isso acarreta em um escoamento em que o fluido que sai de um volume entra em outro logo em seguida. As variáveis ficam localizadas no centro de cada volume, encontradas integrando as equações diferenciais parciais sobre o volume de controle. Interpolações são usadas para descrever o fluxo das variáveis entre as células. Quando a simulação alcança o regime estacionário, não há perdas de fluido, a taxa de escoamento de massa será a mesma na entrada de saída do domínio. O mesmo acontece para os fluxos de momentos e energias (MORGENTHAL, 2022).

O MVF é considerado superior na análise de mecânica de fluidos, comparado aos métodos de Elementos Finitos e de Diferenças Finitas. Uma de suas vantagens é a facilidade de adequá-lo às simulações tridimensionais, alcançando simulações mais complexas. Com o avanço dos códigos para criação de malhas, o uso de malhas não-estruturadas que se adequam melhor a geometrias complexas, mas que se aproximam da velocidade de computação de malhas estruturadas, tem feito com que o uso do MVF seja ainda mais preferido por ser melhor aplicado nesses tipos de malhas.

Para solucionar o problema das não-linearidades das equações da pressão e velocidade, o algoritmo SIMPLE será usado como forma de uma solução interativa para o acoplamento da pressão-velocidade criado por PATANKAR; SPALDING, (1972). Para a discretização espacial, métodos de segunda ordem serão usados nas equações de quantidade de movimento e das propriedades turbulentas.

Em uma das soluções alternativas neste trabalho (*Alt5*) foi utilizado um método de terceira ordem. O esquema usado de terceira ordem MUSCL foi criado a partir do método original *MUSCL* (*Monotone Upstream-Centered Schemes*) juntando um esquema de diferenciação central com um *Second-Order Upwind* (FLUENT, 2013a). Nessa solução específica alternativa, o método de interpolação da pressão PRESTO! foi usado em vez do método de segunda ordem. PRESTO! usa um balanço da continuidade discretizado para o volume de controle *staggered* para computar a pressão nas faces.

4.3 Modelos de Turbulência

A maioria dos escoamentos encontrados na engenharia prática são turbulentos e, por isso, merecem um tratamento especial. Os escoamentos turbulentos são caracterizados por serem tridimensionais, pela alta instabilidade e por vórtices que alteram diversas propriedades dos escoamentos (FERZIGER; PERIC, 2002). Os efeitos da turbulência podem ser benéficos ou não, a depender da aplicação. Em misturas de fluidos, componentes químicos e na transferência de calor o aumento que a turbulência causa no escoamento é algo desejado. Por outro lado, na aerodinâmica de aeronaves e automóveis, o aumento da vorticidade encontrada em escoamentos turbulentos "roubam" energia do movimento, que aumenta o arrasto, sendo prejudicial nessa aplicação. A correta análise e estudo da turbulência permite que seja possível entender a influência que esse efeito causa e até o controle do fenômeno, aumentando ou reduzindo, para alcançar os melhores resultados.

Podemos categorizar a forma como calculamos a turbulência por três formas principais:

- a) *RANS* – são obtidas equações usando uma média temporal das equações do movimento, esse procedimento gera um conjunto de equações diferenciais parciais chamadas de *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*. Essas equações não formam um sistema fechado, mais incógnitas são introduzidas, havendo a necessidade de outras equações para essas incógnitas. Esses são os modelos de turbulência, extensivamente usados na engenharia por apresentar bons resultados quando usados corretamente;
- b) *LES* – Usando o *Large Eddy Simulation* são resolvidas as maiores escalas turbulentas dos vórtices presentes no escoamento, enquanto que aproximações ou modelos são utilizados apenas para as menores escalas turbulentas. Essa abordagem é um

pouco mais complexa que *RANS*, gerando escoamentos mais próximos que os reais. No entanto, o aumento do consumo computacional é algo que deve ser levado em consideração, uma vez que, dependendo da análise desejada, o aumento da complexidade da simulação não justifica o ganho de precisão;

- c) *DNS – Direct Numerical Simulation* é a abordagem mais precisa disponível resolvendo as equações de Navier-Stokes sem a utilização de aproximações ou médias, apenas usando discretização numérica em todo domínio, uma abordagem conceitualmente simples, contudo, de difícil aplicação. Para que todas as estruturas da turbulência sejam capturadas, a malha deve ser fina o suficiente para capturar todos os vórtices, das maiores a menores escalas. Pela relação que se pode considerar das menores escalas, o custo computacional pode ser estimado pelo *Re* da simulação. Atualmente, apenas simulações com baixos *Re* e geometrias simples são realizadas. Pela alta complexidade, *DNS* são utilizadas com foco em obter informações detalhadas e precisas do escoamento, mais para área da pesquisa do que para a engenharia prática. Resultados destas simulações são tão precisos que são usados para validação e calibração de experimentos.

Para a análise numérica de instalação de equipamentos submarinos, o método *RANS* é o mais usado. Ele permite simulações com uma precisão aceitável e com um custo computacional que permite a realização de diversas simulações, variando parâmetros geométricos e do escoamento. Comparações de alguns modelos de turbulência aplicados no método *RANS* pode ser encontrada no artigo de CHREIM et al., (2020a).

Neste trabalho, vários modelos de turbulência serão testados. Dois deles, muito usados na indústria são, o $\kappa - \omega$ *SST*, conhecido como *Shear-Stress Transport Model*, e o $\kappa - \epsilon$ *Realizable*. O primeiro modelo considera o escoamento totalmente turbulento e aplica o modelo $\kappa - \omega$ nas regiões próximas da parede e o modelo $\kappa - \epsilon$ nas regiões de fluxo livre no escoamento, regiões onde cada um deles tem os melhores resultados. O modelo $\kappa - \epsilon$ *Realizable*, também considera o escoamento totalmente turbulento e possui aperfeiçoamentos em relação ao modelo original $\kappa - \epsilon$ para escoamentos com grande curvaturas e vórtices, mostrando melhores resultados para simulações mais complexas (FLUENT, 2013a). Essas duas alternativas de modelos, *Alt1* e *Alt2*, foram simulados com a opção de "*curvature correction*" habilitada.

Devido ao número de Re usados nas simulações, três modelos de turbulência para a região de transição foram comparados. O $\kappa - k_l - \omega$ é um modelo de três equações baseado no modelo $\kappa - \omega$ para calcular as propriedades turbulentas κ , energia cinética turbulenta, e ω , taxa de dissipação específica, além de uma equação adicional para o cálculo da energia cinética laminar, k_l , o que faz o modelo trabalhar melhor na região de transição entre laminar e turbulento (WALTERS; COKLJAT, 2008). O modelo *Transition SST*, ou $\gamma - Re_\theta$, é baseado no modelo $\kappa - \omega SST$ com a adição de duas equações de transporte a mais, uma para a *intermittency*, γ , e outra para um critério de transição, em função do *momentum-thickness Reynolds numbers*, Re_θ . Esse modelo já sofreu algumas modificações e melhoramentos dentro do pacote Fluent. O último modelo de transição testado é o *Intermittency Transition Model*, baseado no $\gamma - Re_\theta$, mas com apenas uma equação para o γ , sem a necessidade da equação para o Re_θ , esse é um modelo mais simplificado com algumas vantagens comparado ao anterior, possuindo um esforço computacional menor sem uma grande perda de eficiência em alguns casos (FLUENT, 2013b).

4.4 Malha

A malha é a discretização numérica do domínio em sub-divisões, volumes de controle, onde as variáveis serão calculadas. Podemos dividir as malhas em três tipos:

- a) Malhas estruturadas – São malhas regulares e mais simples, formando volumes de controle com o mesmo formato, de quadriláteros para 2D ou hexaédricos para simulações 3D. Esse tipo de malha é mais fácil de resolver numericamente, gerando um menor custo computacional. Porém, se utilizada em geometria complexas, principalmente em 3D, leva a um perda de eficiência ou até erros numéricos altos.
- b) Malhas não-estruturadas – Aqui as células criadas podem ser de qualquer formato, tornando muito prático a implementação em qualquer geometria desejada. Os formatos mais comuns encontrados são de tetraédricos. Nos últimos anos, um grande foco foi dado aos códigos para criar esse tipo de malha e calculá-lo, aumentando a presença de malhas com formatos poliédricos. A praticidade de aplicar em geometrias complexas vem com a desvantagem do aumento considerável do número de elementos totais gerados na malha.

- c) Malhas híbridas – Esse tipo de malha utiliza um código de geração mais complexo criando malhas estruturadas em regiões simples e quando se aproxima de lugares com curvaturas, buracos ou paredes se utiliza malhas não-estruturadas.

O tamanho dos elementos da malha é um fator crucial para simular o escoamento com precisão, podendo variar, reduzindo ou aumentando em regiões onde é mais necessário. Um estudo de convergência de malha é uma etapa importante para construir malhas que sejam finas o suficiente para capturar todos os fenômenos desejados com precisão, mas que tenham um custo computacional aceitável.

Neste trabalho, a malha não-estruturada com elementos poliédricos será usada em todo o domínio, apenas utilizando elementos prismáticos nas regiões próximas da superfície da geometria de análise (*inflation*), para que seja possível resolver a camada-limite do escoamento de forma precisa.

4.5 *Reference Frame Motion*

Em vez do corpo ser colocado para oscilar no fluido, o domínio inteiro irá oscilar enquanto o corpo continuará fixo, usando a técnica chamada de *Reference Frame Motion*. Essa técnica se baseia em resolver o conjunto de equações do problema em um referencial que se move, fazendo com que exista um acréscimo na aceleração do fluido devido aos termos adicionais que aparecem nessas equações. Esta abordagem é apresentada por GHOZLANI; HAFSIA; MAALEL, (2012), que expõe que, a grande vantagem em seu uso é a imposição do movimento sem a necessidade de realizar qualquer modificação na malha ao longo da simulação, o que representa economia no tempo de simulação. Por outro lado, uma desvantagem é a impossibilidade de simular a influência do leito oceânico ou da superfície livre, uma vez que todo o domínio se movimenta.

Devido a essa abordagem numérica, as equações de Navier-Stokes (3.11) devem ser escritas usando um sistema de referência acelerado. Sendo x_i, \tilde{x}_i e $x_{i,s}$ as coordenadas para o sistema inercial, o acelerado e a posição do sistema acelerado, respectivamente, a Eq. 4.1 relaciona essas variáveis.

$$x_i = \tilde{x}_i + x_{i,s} \quad (4.1)$$

Diferenciando a Eq. 4.1, temos a equação da velocidade para cada sistema.

$$u_i(x_i, t) = \tilde{u}_i(\tilde{x}_i, t) + U_{i,s}(t) \quad (4.2)$$

Portanto, as equações da quantidade de movimento e da continuidade para o sistema acelerado podem ser vistas na Eq. 4.3 e Eq. 4.4.

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_i} \quad (4.3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j} \right) = - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}_i} + \mu \left(\frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j^2} \right) - \rho \frac{dU_{i,s}(t)}{dt} \quad (4.4)$$

onde \tilde{u}_i é a velocidade do fluido no referencial acelerado. O último termo do lado direito da Eq. 4.4 é um termo adicional de fonte que leva em consideração a aceleração do corpo oscilando.

O movimento do domínio foi aplicado usando uma *User-Defined Function (UDF)* baseado na equação da velocidade, Eq. 3.13.

4.6 Condições de operação

Condições usuais nas operações de lançamento/içamento de estruturas serão escolhidas para variar os parâmetros das simulações. Períodos de 2 a 8 s são normalmente encontrados no movimento de embarcações. Devido a baixa influência que o T tem nos discos em relação aos coeficientes hidrodinâmicos (TAO; DRAY, 2008), $T = 2s$ será usado para reduzir o tempo de simulação. Para equipamentos com comprimentos L variando de 0,5 a 15 m, estima-se valores de KC entre 0,25 a 3,0.

As correntezas oceânicas variam por região e possuem um perfil de velocidades em função da profundidade, que neste trabalho será dada como constante. Tomando como base a Bacia de Santos, uma região importante pro cenário *offshore* brasileiro, podemos estimar as correntes presentes com base em informações de operações coletadas e por estudos como de SOUZA, (2000), utilizando assim correntes de até 2 m/s para nosso estudo.

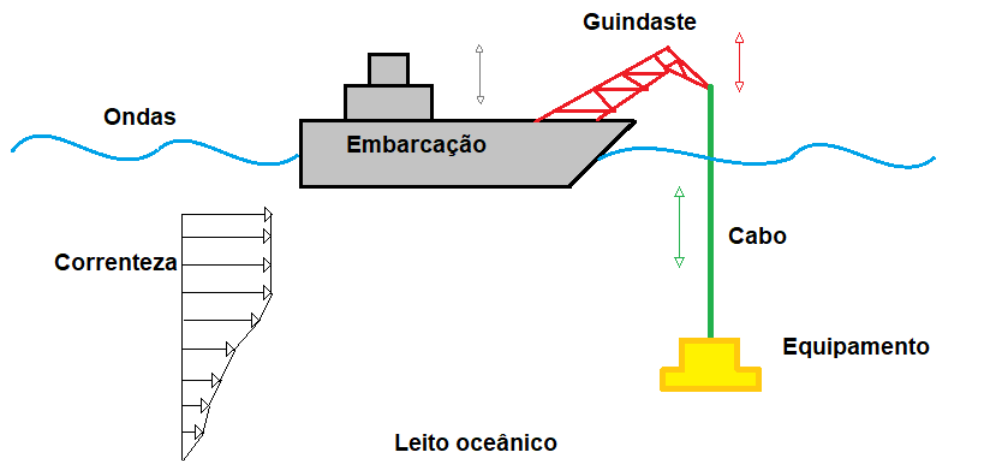
Resumindo as condições usuais de operação, temos um V_r variando entre 0 a 0,25. Por causa do Re_o e Re_c encontrados nas condições de operação terem um valor entre 10^4 a

10^6 , as operações passam do regime laminar, para transição e pelo turbulento.

5 VALIDAÇÃO PARA SIMULAÇÕES DE OSCILAÇÃO FORÇADA

Na Figura 6 temos um desenho esquemático de um processo de instalação de equipamentos submarinos. Devido a sua complexidade, o processo de lançamento dessas estruturas será simplificado para realização das simulações numéricas. Toda a movimentação decorrente da embarcação, do guindaste, do cabo e das ondas será resumida em um movimento oscilatório senoidal no corpo de análise. O corpo utilizado será de um disco horizontal, uma vez que apresenta semelhanças com alguns equipamentos submarinos e a nossa disposição vários resultados para validação. A correnteza terá um valor constante em todo o domínio.

Figura 6: Desenho esquemático de um equipamento submarino durante o processo de lançamento/içamento de uma embarcação-guindaste.



Fonte: Autoria própria.

Devido à relevância de resultados para corpos em oscilação forçada na área naval, foram encontrados estudos que analisam diversos parâmetros sobre a região de operação para este trabalho. (TIAN et al., 2017a),(TAO; DRAY, 2008) e (CHUA et al., 2005) são

alguns dos trabalhos que analisam geometrias simples para Re altos com valores de KC desejados, sendo (TIAN et al., 2017a) utilizado principalmente para esta validação.

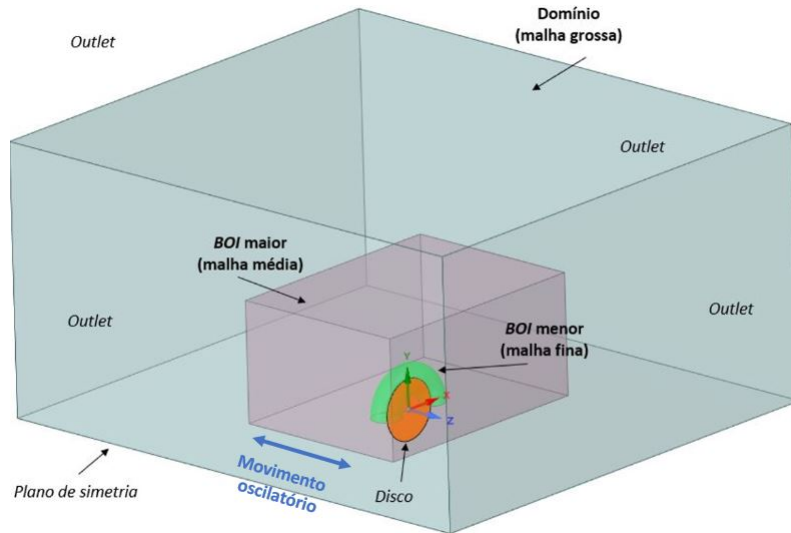
Repetindo a geometria A2 de TIAN et al., (2017a), com um disco sem arredondamentos com $D = 0.4\text{ m}$ e $e/D = 0.02$, simulações foram feitas para valores de KC entre 0,25 a 3, com o Re_o variando de 20 000 para 240 000. O domínio criado foi baseado em análises de tamanho mínimo necessário para simulações tridimensionais de CHREIM et al., (2020a). Para tanto, foi usado um domínio retangular com um plano de simetria no meio do disco, com $4.5 D$ na frente e atrás do disco (eixo z), comprimento de $8 D$ e altura de $4 D$. Duas regiões de refinamentos foram criadas para a malha: uma região retangular com uma malha de refinamento mediano de comprimento, largura e altura de $3 D$, $2 D$ e $2 D$, respectivamente, e uma região de refinamento fino com um formato de cilindro de revolução centrado nas bordas do disco com diâmetro de $0,5 D$. Essa região foi criada para capturar melhor o fenômeno de *vortex shedding*.

A condição de sem escorregamento e gradiente de pressão normal zero foi adotada na superfície do disco. Adicionalmente, um plano de simetria no eixo y , e *pressure-outlet* com gradientes de pressão zero foram adotados em todos os lados do domínio. O domínio pode ser visto na Figura 7, onde o disco, em cor laranja e dividido ao meio pelo plano de simetria, é retirado do domínio para realizar uma simulação apenas fluidodinâmica. A direção do movimento oscilatório também pode ser vista, sendo realizada na direção do eixo z .

Todo o domínio foi discretizado com elementos poliédricos, com apenas elementos prismáticos na região de *inflation*. Os tamanhos dos elementos em cada região de refino foram tomados em função do comprimento característicos do disco, D . Duas regiões de refino no domínio foram criadas com o uso do *Body of Influence (BOI)*, estabelecendo tamanho dos elementos para todo um volume de influência. Um *BOI* com uma malha de refinamento médio foi utilizado na região onde a maior geração de vórtices está presente. Outro *BOI* mais refinado foi utilizado nas bordas do disco com o intuito de capturar melhor os efeitos do desprendimento dos vórtices nesta região.

O refino na superfície do disco foi realizado estabelecendo tamanho de elementos em função do tamanho da primeira camada prismática, y_1 , com o objetivo de alcançar uma boa qualidade de malha. O refinamento usando *inflation* na superfície do disco com

Figura 7: Domínio utilizado para simulações de oscilação forçada de validação.



Fonte: Autoria própria.

elementos prismáticos foi utilizado para capturar os efeitos de camada-limite, baseado na adoção do Y^+ próximo de 1 nas simulações e uma altura suficiente para englobar toda a camada-limite, com mais de 20 camadas. Estas regiões de refino podem ser vistas na Figura 7.

A validação da malha foi realizada estabelecendo uma malha muito refinada, chamada de $m1$, e reduzindo a resolução do refino multiplicando a taxa de refinamento por $\sqrt{2}$ em todas as regiões de refino. A taxa de refinamento de 2 foi usada para calcular o *time step* para cada refinamento, com o *time step* da $m1$ estimado baseado em resultados de trabalhos passados. Todas as malhas geradas alcançaram uma qualidade de malha boa, usando o critério de *Orthogonal Quality* $> 0,2$.

Para a validação de malha, foi usado o *software Numerical Uncertainty Analysis (NUA)* criado nos trabalhos de Eça; HOEKSTRA, (2014). Esse programa calcula o erro de discretização das malhas pela extrapolação de Richardson usando o *Grid Convergence Index (GCI)* (ROACHE, 1998), considerando que os erros de arredondamentos e iterações são desprezíveis. O objetivo é estimar uma incerteza numérica U_ϕ de cada malha através de um resultado local ou integral ϕ_i , não conhecendo o resultado exato da simulação, ϕ_{exact} , e criando um intervalo de confiança que contém 95% confiança, como mostrado na Eq. 5.1:

$$\phi_i - U_\phi \leq \phi_{exact} \leq \phi_i + U_\phi \quad (5.1)$$

O *software NUA* usa quatro tipos de expansões em séries de potências (Eq. 5.2,5.3,5.4 e 5.5) para obter o erro da malha $\epsilon_\phi \approx \phi_i - \phi_0$, com ϕ_0 sendo o resultado local ou integral de uma variável com uma malha de refinamento “infinito”, ou solução exata, α, α_1 e α_2 constantes a serem encontradas, h_i a taxa de refinamento da malha de refinamento mais fino e p a ordem de convergência observada.

$$\epsilon_\phi \cong \alpha h_i^p \quad (5.2)$$

$$\epsilon_\phi \cong \alpha h_i \quad (5.3)$$

$$\epsilon_\phi \cong \alpha h_i^2 \quad (5.4)$$

$$\epsilon_\phi \cong \alpha_1 h_i + \alpha_2 h_i^2 \quad (5.5)$$

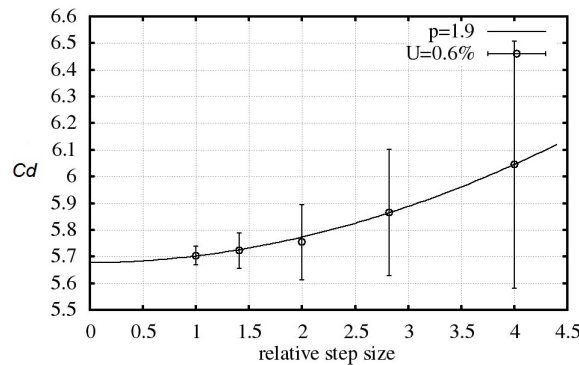
A equação que será usada irá depender no p e do desvio padrão σ das expansões, primeiro se usa a Eq. 5.2, se $p < 0,5$ ou $p > 2,1$, testa Eq. 5.3,5.4 e 5.5 usa o que tiver o menor σ . Com esse procedimento, para geometrias mais complexas com resultados mais espalhados, é esperado do *NUA* melhores resultados que o *GCI*. Esse método requer malhas com formatos similares, com a mesma taxa de refinamento entre as malhas e com malhas suficientes; cinco refinamentos de malhas serão usados neste trabalho.

As malhas foram simuladas com o modelo de turbulência $\kappa - k_l - \omega$ devido a sua habilidade de simular a região de transição de laminar para turbulento e por bons resultados encontrados comparado com resultados experimentais para os casos de oscilação forçada de CHREIM et al., (2020a). Outros modelos de turbulência serão testados para o melhor refinamento de malha encontrado. Para o acoplamento de pressão-velocidade, o esquema SIMPLE será usado. Métodos de discretização de *Second Order* e de *Second Order Upwind* foram usados para todas as equações conservativas, incluindo as das propriedades turbulentas. Para se reduzir o tempo de análise, os refinamentos de malhas foram simulados para apenas $KC = 1,5$. A Tabela 2 mostra as características das malhas testadas, sendo y_1 a altura da primeira camada prismática na região de *inflation* e y_2 o tamanho dos elementos para a região de refinamento médio.

Analisando a Figura 8 e 9, e as incertezas das malhas na Tabela 2, o refinamento de malha $m2$ é considerado suficiente para essa validação pela incerteza menor que 2%. Em relação aos métodos de cálculo dos coeficientes C_d e C_a , para obter os valores mais próximos

Tabela 2: Tabela da validação de malha para casos de apenas oscilação forçada

Malha	Relative Step Size	Time step	Número de células (*10 ³)	y_1/D	Y^+	y_2/D	C_d	C_a	$U_\phi(\%)$
m1	1	T/1600	3178	0,000125	0,7	0,012	5,703	1,1748	0,62
m2	$\sqrt{2}$	T/800	1387	0,000177	1,0	0,017	5,722	1,1745	1,16
m3	2	T/400	617	0,00025	1,4	0,024	5,754	1,1729	2,47
m4	$2\sqrt{2}$	T/200	299	0,000353	2,0	0,034	5,864	1,1757	4,15
m5	4	T/100	133	0,0005	2,8	0,0048	6,044	1,1728	8,11

Figura 8: Gráfico da validação da malha para C_d usando o programa *NUA* para casos de oscilação forçada.

Fonte: Autoria própria.

do experimental, o método *FSAB1* foi considerado o melhor, seguido pelo *LSMIF* e depois *LSMLS*.

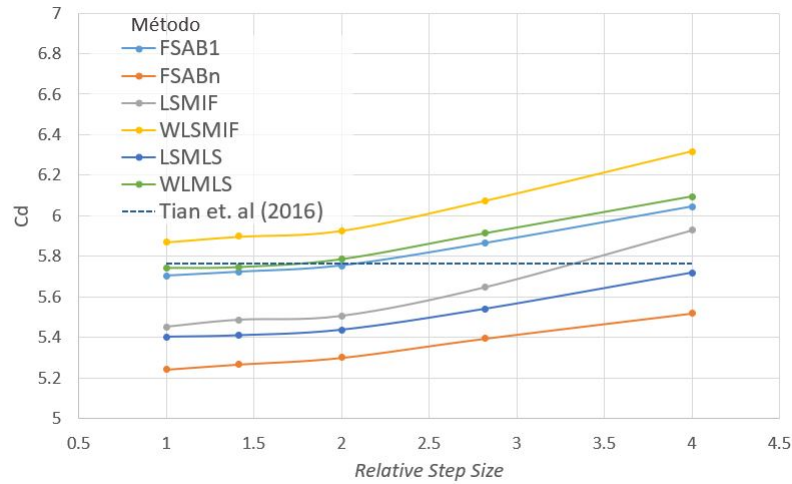
Definido o refinamento de malha, diferentes métodos de solução foram testados. Como explicado na seção 4.3, as cinco alternativas podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3: Tabela para os métodos de solução para casos de apenas oscilação forçada.

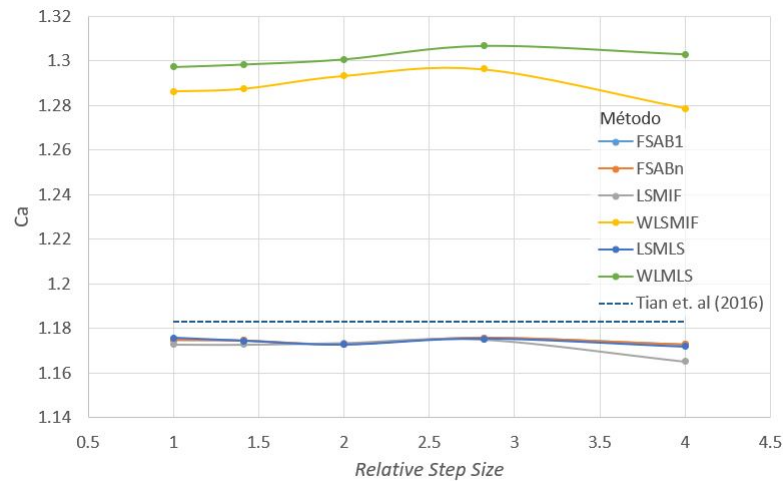
Alternativa	Modelo de Turbulência	Erro por Tian et al. (2017) para o método <i>FSAB1</i> (%)		Erro por Tian et al. (2017) para o método <i>LSMIF</i> (%)		Resultados para a configuração A2 de Tian et al. (2017)	
		C_d	C_a	C_d	C_a	C_d	C_a
<i>Alt1</i>	$\kappa - \omega$ <i>SST</i>	-8,7	3,1	-16,8	8,0	5,76361	1,18304
<i>Alt2</i>	$\kappa - \epsilon$ <i>Realizable</i>	-0,4	-2,5	-1,9	-2,6		
<i>Alt3</i>	$\gamma - Re_\theta$	-4,9	5,1	-12,9	12,5		
<i>Alt4</i>	<i>Intermittency Transition Model</i>	-10,5	2,6	-19,6	7,6		
<i>Alt5</i>	$\kappa - k_l - \omega$ modificado	-6,4	2,8	-18,1	9,8		
<i>Alt6</i>	$\kappa - k_l - \omega$	-0,7	-0,7	-4,8	-0,9		

A última alternativa testada, chamada de *Alt5*, usa o modelo $\kappa - k_l - \omega$, com alterações na resolução das equações discretizadas seguindo algumas recomendações para os tipos de simulações deste trabalho. Para a interpolação da pressão, o esquema *PRESTO!* foi usado, uma vez que é recomendado em simulações com grandes curvaturas, diferenças altas de pressões e com alta vorticidade, e a discretização dos termos convectivos foi resolvida com o método *MUSCL*. Este método de terceira ordem algumas vezes obtém melhores

Figura 9: Resultados das malhas de todos os refinamentos usando todos os métodos para cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos, comparados com resultados experimentais de TIAN et al., 2017a.



(a) Resultados para C_d



(b) Resultados para C_a

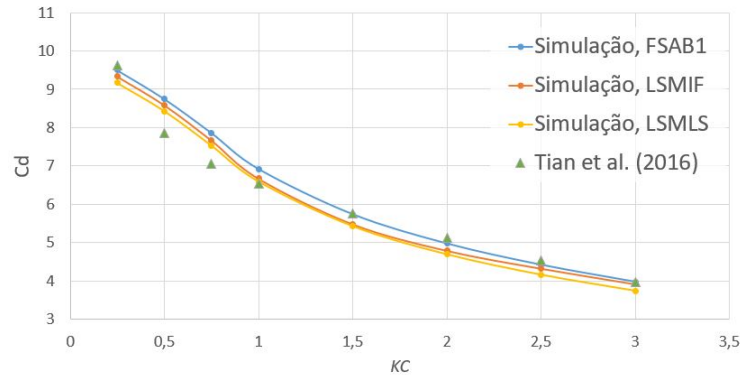
Fonte: Autoria própria.

resultados para escoamentos secundários e vorticidades altas em malhas não-estruturadas.

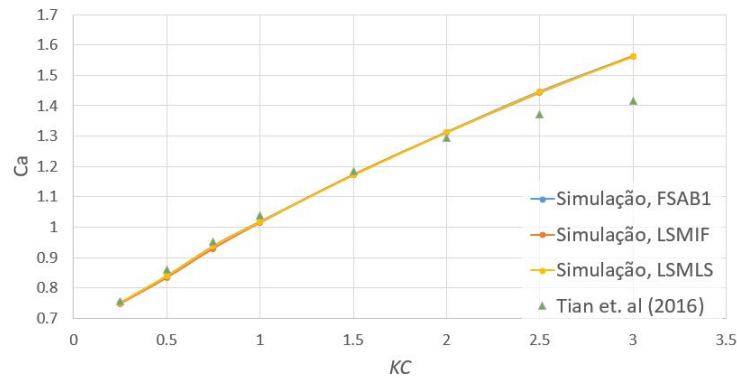
A Tabela 3 mostra que as alternativas *Alt2* e *Alt6* alcançam os melhores resultados e serão testados para todos os valores de KC desejados.

Os resultados finais da validação do modelo para os casos de apenas oscilação forçada mostraram resultados consistentes com o trabalho experimental analisado, assim como mostrado nas Figuras 10 e 11. Os três métodos de cálculo dos coeficientes tiveram resultados similares, com o *FSAB1* sendo considerado um pouco melhor, e a alternativa *Alt6* tendo resultados melhores que *Alt2*.

Figura 10: Resultados do modelo numérico para coeficientes hidrodinâmicos para os casos de apenas oscilação forçada comparando os métodos de cálculo dos coeficientes.



(a) Gráfico de C_d para os vários métodos de cálculo dos coeficientes usando *Alt6* comparada com (TIAN et al., 2017a).



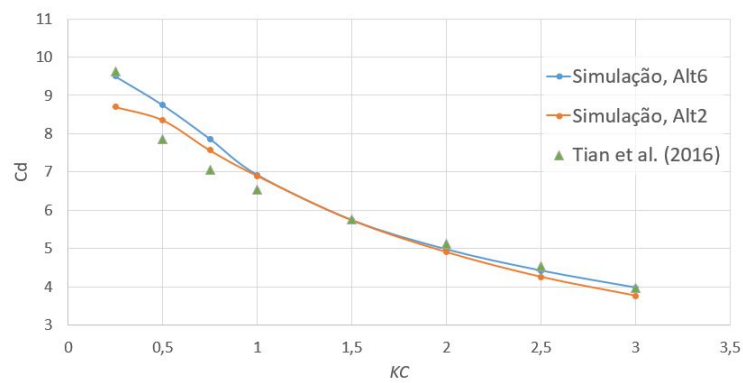
(b) Gráfico de C_a para os vários métodos de cálculo dos coeficientes usando *Alt6* comparada com (TIAN et al., 2017a).

Fonte: Autoria própria.

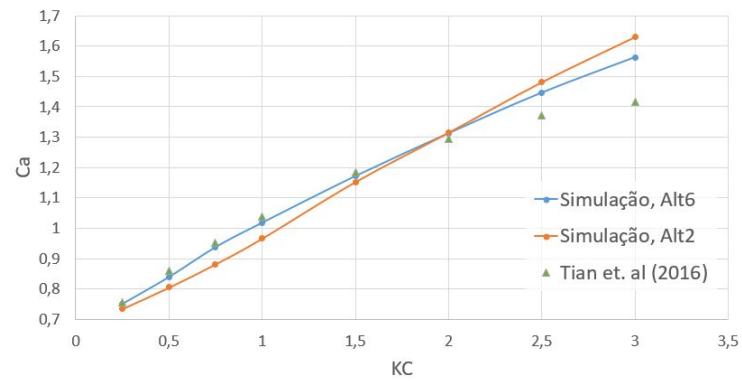
Uma alternância na precisão encontrada de C_d e C_a ocorreram, dependendo da KC da simulação. Para $KC < 1,5$, C_d obteve os piores erros, chegando a valores de até 12%, enquanto que para $KC > 1,5$, o C_a que obteve os piores resultados de até 10%. Fora dessas regiões, o modelo obteve bons resultados.

Seguindo os passos da análise com o efeito da oscilação separada, foi possível estabelecer um modelo aproximado de domínio, malha e métodos de solução para a aplicação nos casos de discos oscilando na presença de uma correnteza.

Figura 11: Resultados do modelo numérico para coeficientes hidrodinâmicos para os casos de apenas oscilação forçada comparando os métodos de solução.



(a) Gráfico de C_d comparando *Alt2* e *Alt6* com (TIAN et al., 2017a).



(b) Gráfico de C_a comparando *Alt2* e *Alt6* com (TIAN et al., 2017a).

Fonte: Autoria própria.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Validação e Resultados para Baixos Re

O presente modelo foi validado usando simulações *DNS* para baixos Re_o e Re_c de YANG et al., (2014), sendo o único estudo que analisa o efeito da oscilação e correnteza juntas nos coeficientes hidrodinâmicos sobre condições similares. O domínio usado para essa validação foi criado baseado no domínio criado nas simulações de apenas oscilação forçada, com um adicional nas dimensões do eixo x para se levar em consideração os efeitos que a correnteza gera no escoamento, sendo o eixo z de oscilação do disco e o eixo x da correnteza. Na Tabela 4 e Figura 12 os tamanhos e características do domínio podem ser encontradas.

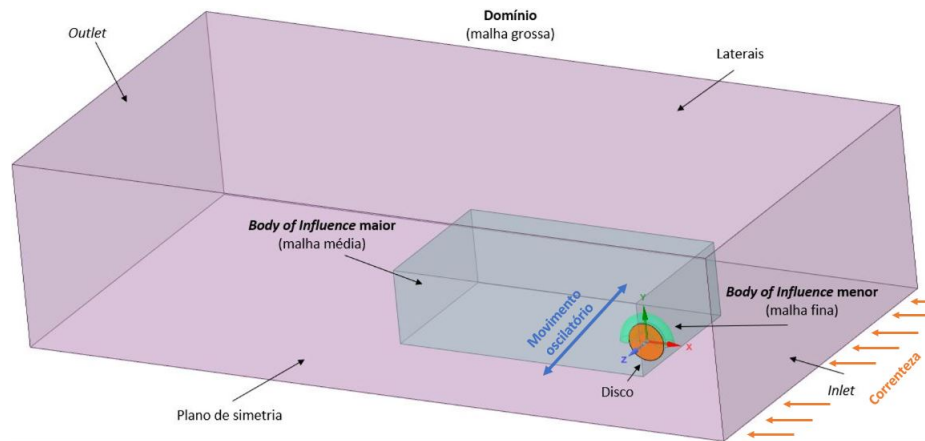
Tabela 4: Tabela com as características do domínio considerando D como o tamanho característico.

Casos	Domínio				<i>Body of Influence</i> Maior (X,Y,Z)	<i>Body of Influence</i> Menor
	Frente do disco	Atrás do disco	Altura	Largura		
Yang et al. (2014)	Esférico com Diâmetro = 40D				-	-
Apenas Oscilação	4,5D	4,5D	4,5D	4D	(3D,2D,2D)	Diâmetro = 0,5D
Oscilação + Correnteza	5D	15D	5D	5D	(7D,2D,2D)	Diâmetro = 0,5D

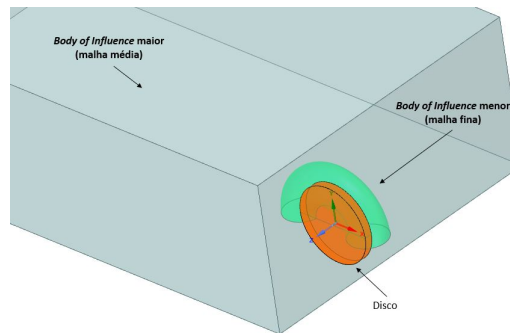
A malha criada teve como base os tamanhos dos elementos para cada região de refino das etapas anteriores, com uma mudança na região de *inflation*, por conta dos Re das simulações serem baixos. A altura da primeira camada prismática, y_1 , para se ter um $Y^+ < 1$, proporcionalmente, é muito maior que as usadas anteriormente. No entanto, ao usar estes valores de y_1 , chegou-se ao resultado de perdas de qualidade da malha, portanto as malhas nesta etapa tiveram valores de y_1 proporcionalmente menores e, conseqüentemente, um $Y^+ \ll 1$.

Discos com $e/D = 0,1$ foram usados, fixando um $\beta = 200$ e $T = 2s$. Para validação

Figura 12: Domínio utilizado para simulações de oscilação + correnteza.



(a) Domínio com todas suas características.



(b) Zoom das regiões de refinamento.

Fonte: Autoria própria.

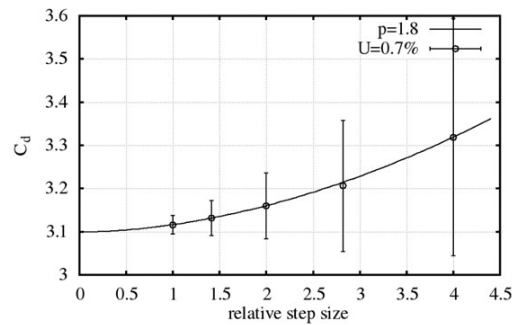
da malha foi usado um $KC = 1$ e $V_r = 0,1$. Seguindo o mesmo procedimento das etapas anteriores, a malha de refinamento $m3$ foi considerada aceitável devido às suas baixas incertezas, apresentadas na Tabela 5 e resultados da Figura 13.

Tabela 5: Tabela da validação de malha para simulações de oscilação + correnteza.

Malha	Relative step size	Time step	Número de células (10^3)	y_1/D	Y^+	y_2/D	C_d	C_a	\bar{C}_x	$U_\phi(\%)$ para C_d
m1	1	T/1000	4301	0,0002	0,01	0,036	3,1161	5,3488	5,5879	0,68
m2	$\sqrt{2}$	T/500	1860	0,00028	0,014	0,051	3,1317	5,3652	5,6002	1,3
m3	2	T/250	764	0,0004	0,02	0,072	3,1601	5,3871	5,6146	2,45
m4	$2\sqrt{2}$	T/125	338	0,00056	0,028	0,102	3,2060	5,4106	5,6331	5,88
m5	4	T/75	150	0,0008	0,04	0,144	3,3188	5,4306	5,6104	8,81

Com a malha escolhida, que pode ser vista em detalhes na Figura 14, os métodos de solução foram testados. Pelos baixos Re das simulações considerados aqui, dois métodos alternativos adicionais foram simulados, o modelo de turbulência $\kappa - \omega SST$ com a opção habilitada de *Low - Re Correction* e o uso do modelo laminar. Os resultados foram praticamente iguais em todas as alternativas, uma vez que os modelos de turbulência não

Figura 13: Gráfico de validação de malha para C_d usando o programa NUA para casos de oscilação + correnteza.



Fonte: Autoria própria.

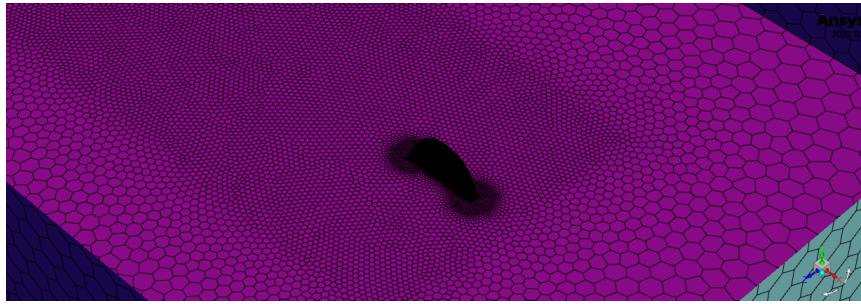
alteram em muito os resultados, precisamente porque o escoamento é majoritariamente laminar.

Com todos os parâmetros escolhidos, simulações foram realizadas com quatro diferentes velocidades de correntezas e para KC de até 3, estendendo o trabalho realizado por YANG et al., (2014) que simulou para KC de até 1. Os resultados na Figura 15 mostraram uma boa comparação, com erros de até 3% para C_d , menos de 2% para C_a e de 5% for C_x . Em relação aos coeficientes hidrodinâmicos, o modelo criado neste trabalho reproduziu bem os resultados para baixos Re sem a necessidade de uma simulação DNS , altamente custosa computacionalmente.

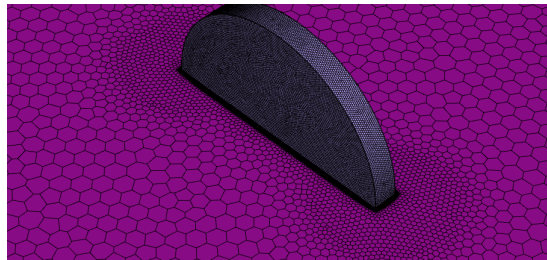
O primeiro ponto interessante de se analisar nos resultados das simulações é a relação entre C_d , C_a e \bar{C}_x com a correnteza, como mostrado nas Figuras 16. Conforme a correnteza aumenta, o valor de C_d aumenta enquanto C_a diminui. No entanto, com o aumento do KC as velocidades impostas pela oscilação do disco no escoamento se tornam mais predominantes que a correnteza, resultando em uma menor influência da correnteza no C_d . Assim, para $KC \geq 2$, C_d não é mais alterado pelos valores de correnteza, enquanto que para C_a a correnteza ainda é relevante. \bar{C}_x mantém a mesma relação encontrada em (YANG et al., 2014) para KC de até 1, mas um estranho efeito começa a aparecer para altos valores de V_r e baixos de KC onde \bar{C}_x aparece negativo, o que fisicamente diria que o disco se moveria contra a correnteza. Uma análise maior deste resultado será realizada na sessão 6.3.

Na Figura 17 temos uma comparação do escoamento presente nos resultados de YANG et al., (2014) (a) e nos resultados das simulações deste trabalho (b), criando uma iso-

Figura 14: Malha de refinamento $m3$ para os casos de oscilação + correnteza.



(a) As duas regiões de refino da malha.



(b) Refinamento próximo da região do disco.

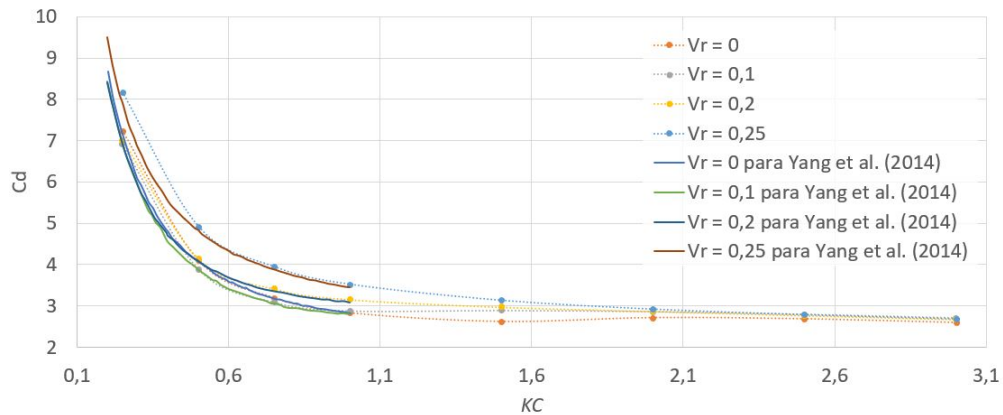
Fonte: Autoria própria.

superfície com $Q - criterion = 0,1 s^{-1}$, com um valor fixo de $KC = 0,6$ e variando V_r de 0 a 0,25 com o disco no seu tempo de maior velocidade de oscilação. O escoamento muda significativamente com a introdução da correnteza nas simulações, cessando a relação de simetria que os vórtices tinham com o eixo da correnteza e aumentando o deslocamento que eles têm conforme o V_r aumenta. O formato dos vórtices gerados também se altera. Para $V_r = 0$, os vórtices são de um formato anelar. Adicionando a correnteza, os vórtices são arrastados formando um formato do tipo "minhoca" para baixos KC e, para altos KC , o formato se torna mais parecido com um "grampo".

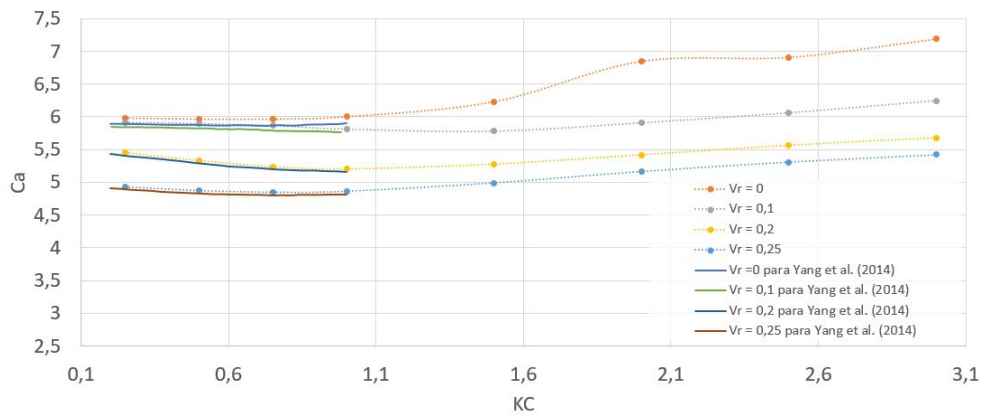
Os resultados foram similares aos de YANG et al., (2014). Se desconsiderarmos as diferenças geométricas, podemos relacionar o *vortex shedding* presente em um dos três tipos de formas indicados no trabalho de TAO; THIAGARAJAN, (2003 A), independente, interativo e uni-direcional. Sendo considerado o *vortex shedding* presente nas simulações como sendo uni-direcional, onde para discos com moderadas razões de aspecto, há apenas um processo de *vortex shedding* ocorrendo na frente e atrás das bordas dos disco, em um processo independente durante tempos diferentes no ciclo oscilatório.

Nas Figuras 18 temos imagens instantâneas comparando quatro simulações, (a) $V_r = 0, 1$

Figura 15: Resultados do modelo numérico para os coeficientes hidrodinâmicos de C_d e C_a para os casos de oscilação + correnteza comparados com (YANG et al., 2014).



(a) Resultados para C_d .



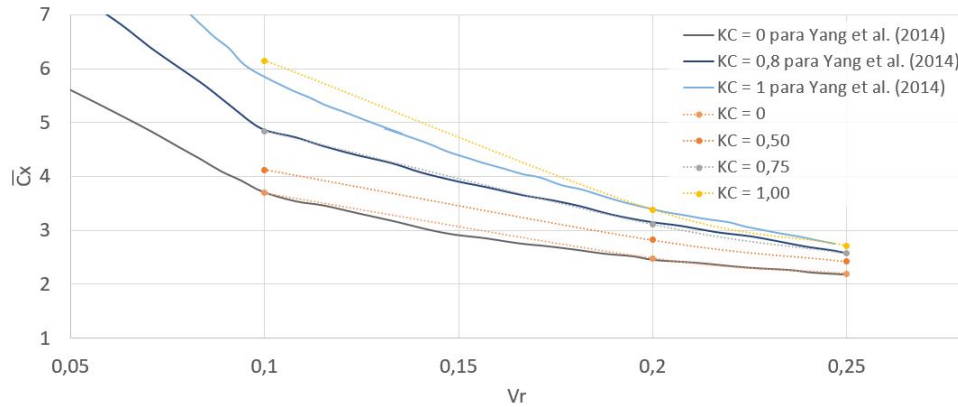
(b) Resultados para C_a .

Fonte: Autoria própria.

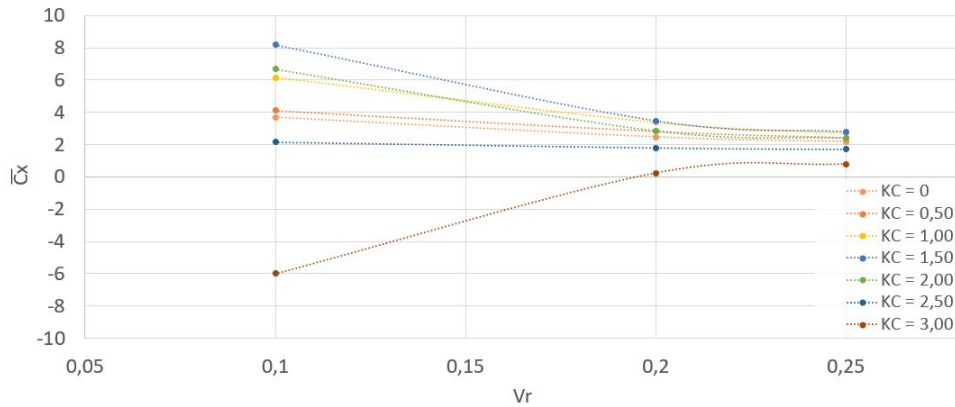
e $KC = 0,5$ (b) $V_r = 0,2$ e $KC = 0,5$ (c) $V_r = 0,1$ e $KC = 3,0$ e (d) $V_r = 0,2$ e $KC = 3,0$, um contorno do campo de velocidades em $y = 0$ e uma iso-superfície com $Q - criterion = 0.1 s^{-1}$ durante um período de oscilação dividido em cinco Δt . Com essas imagens é possível visualizar a criação e deslocamento dos vórtices durante a oscilação. Foi possível ver a geração dos vórtices nas bordas do disco na região frontal e traseira em diferentes momentos da simulação. Estes dois *vortex shedding* interagem entre si, onde os vórtices criados na borda frontal do disco, durante a subida e descida, são destruídos ou absorvidos quando o disco passa por eles durante o movimento oscilatório. Assim, apenas os vórtices gerados na borda de trás do disco são carregados pela correnteza. Ao aumentando o valor de KC , ocorrem mais interações entre estes dois processos.

Em (a) e (b) a velocidade da correnteza é maior que da oscilação, formando uma grande região de recirculação atrás do disco. A oscilação é mais importante para o processo

Figura 16: Resultados do modelo numérico para o coeficiente hidrodinâmico de \overline{C}_x para os casos de oscilação + correnteza comparados com (YANG et al., 2014).



(a) Resultados para \overline{C}_x para $KC < 1$.

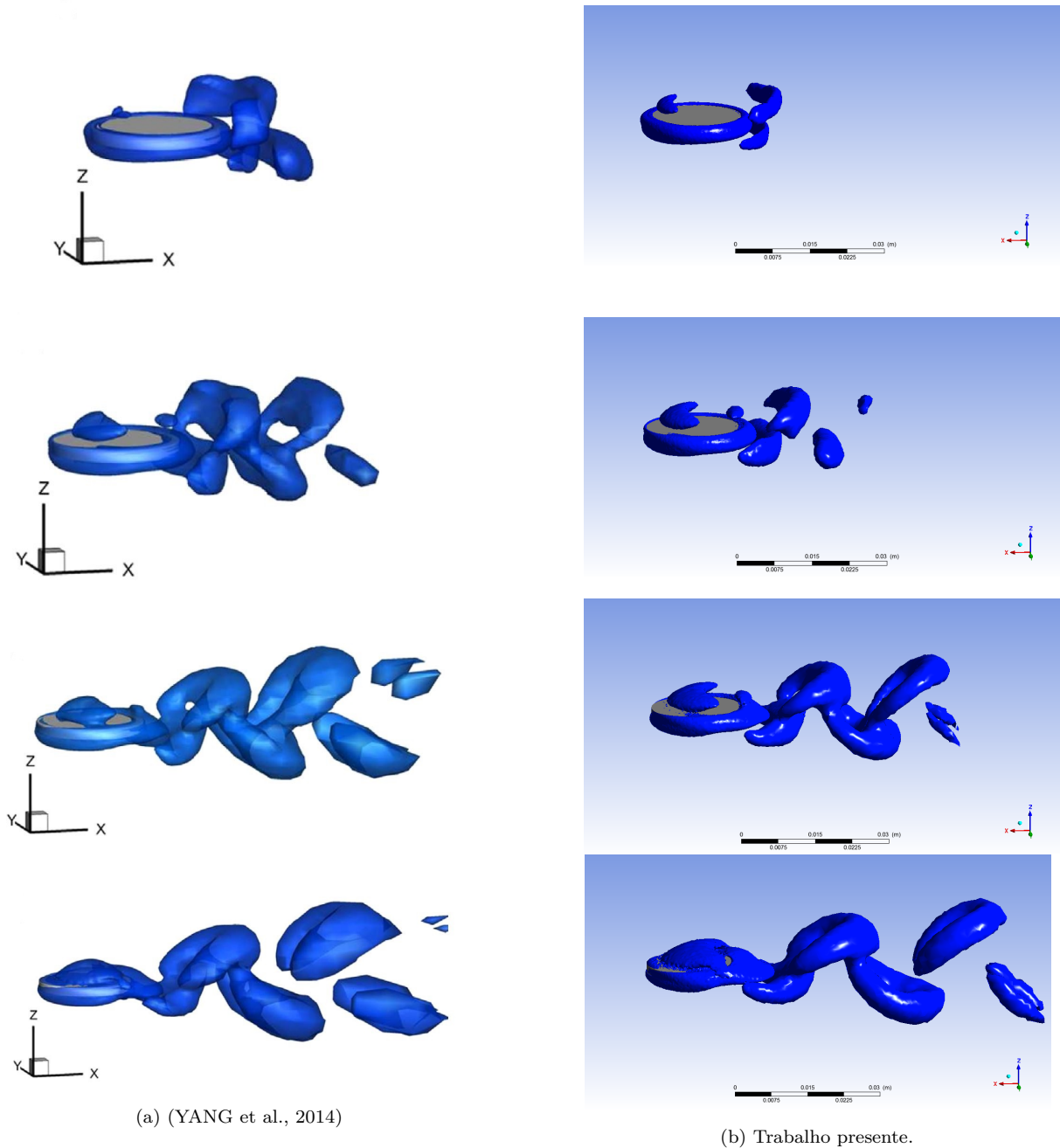


(b) Resultados para \overline{C}_x com todos os KC simulados.

Fonte: Autoria própria.

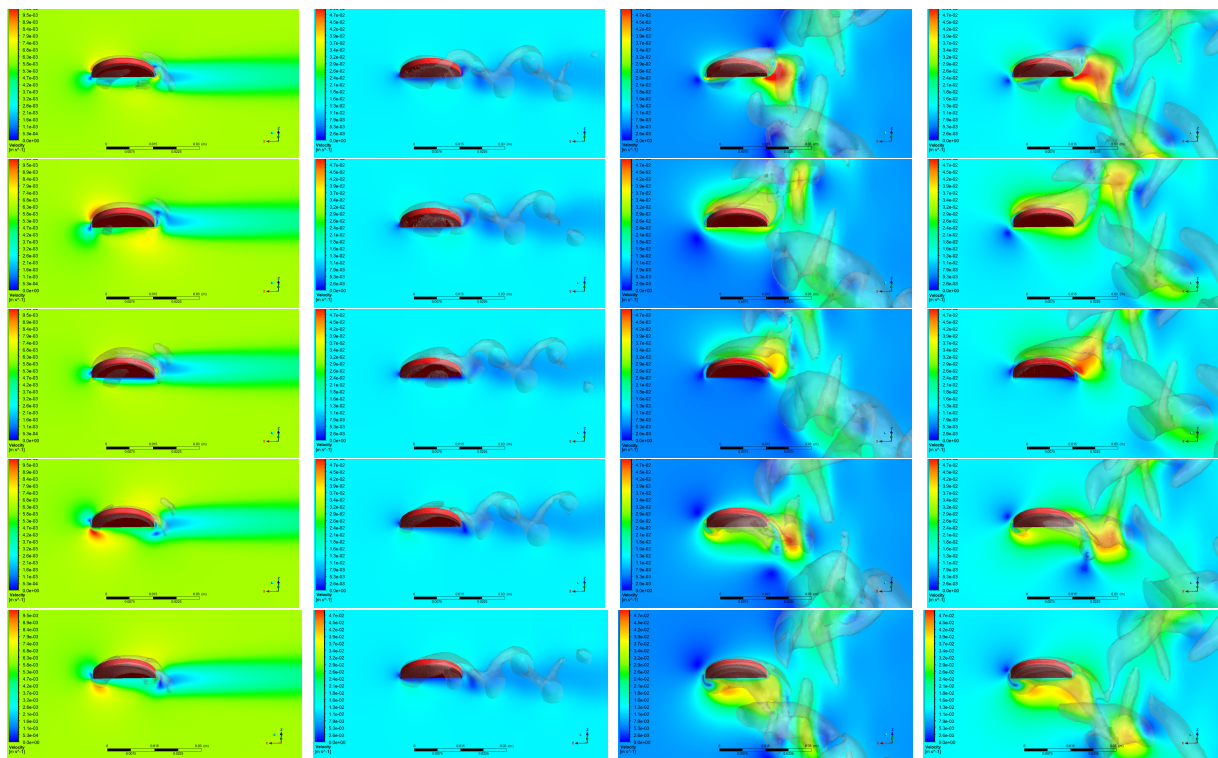
de geração de vórtices, sendo este efeito observado quando há valores maiores de KC em (c) e (d). Por outro lado, ao aumentar a correnteza em (b) também levou a uma maior geração de vórtices, mostrando a importância deste parâmetro para criação de vórtices em menor intensidade. Nas simulações (c) e (d), as velocidades impostas pela oscilação são predominantes, sendo observados, um formato do escoamento mais similar ao das simulações com apenas oscilação forçada. Neste caso, mais vórtices são gerados e carregados pela correnteza.

Figura 17: Comparação com (YANG et al., 2014) da visualização do escoamento para oscilação + correnteza de disco de $e/D = 0,1$ com $KC = 0,6$ em várias velocidades de correnteza quando o disco está na sua máxima velocidade axial. As estruturas dos vórtices estão presentes nas figuras utilizando de uma iso-superfície com $Q - criterion = 0,1s^{-1}$.



Fonte: Autoria própria.

Figura 18: Visualização instantâneas do escoamento de oscilação + correnteza em discos de $e/D = 0,1$, da esquerda para direita com (a) $V_r = 0,1$ e $KC = 0,5$ (b) $V_r = 0,2$ e $KC = 0,5$ (c) $V_r = 0,1$ e $KC = 3,0$ (d) $V_r = 0,2$ e $KC = 3,0$. Imagens no tempo $T/10, 3T/10, 5T/10, 7T/10$ e $9T/10$ para um T de simulação. Um controno dos campos de velocidades foi criado no eixo de simetria y e uma iso-superfície com $Q - criterion = 0,1 s^{-1}$ foi usada para visualizar os vórtices.

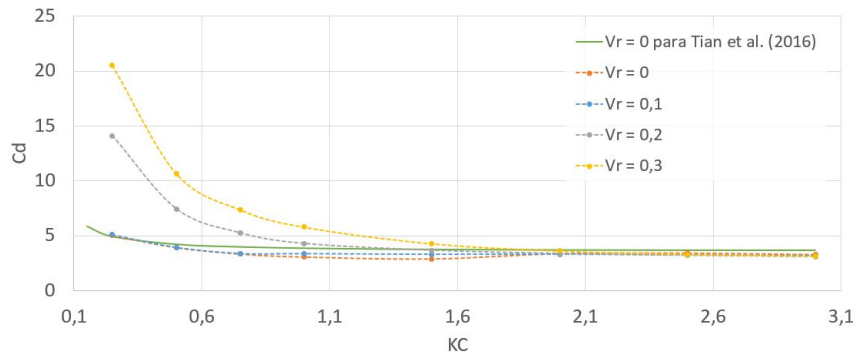
(a) $V_r = 0.1$ e $KC = 0.5$ (b) $V_r = 0.2$ e $KC = 0.5$ (c) $V_r = 0.1$ e $KC = 3.0$ (d) $V_r = 0.2$ e $KC = 3.0$

Fonte: Autoria própria.

6.2 Resultados para Altos Re

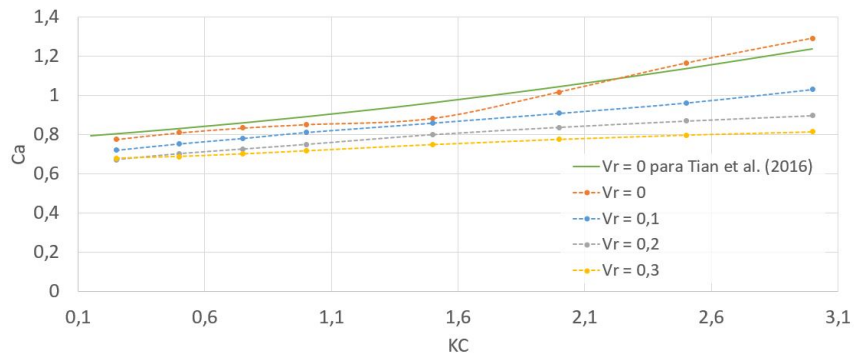
Com o modelo validado para simular os efeitos conjuntos da oscilação forçada com a correnteza, houve a sua aplicação para um disco com $e/D = 0,1$, configuração A7 de (TIAN et al., 2017a), com valores de Re_o similares às condições reais de operação, variando de 20 000 até 240 000, $\beta = 80 000$, para KC de 0,25 até 3 e com V_r de até 0,3. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 19,20 e 21. Na Tabela 6 os valores de C_d e C_a são comparados aos coeficientes para os casos com apenas oscilação forçada ($V_r = 0$).

Figura 19: Gráfico de C_d para simulações de oscilação + correnteza com disco em altos Re_o .



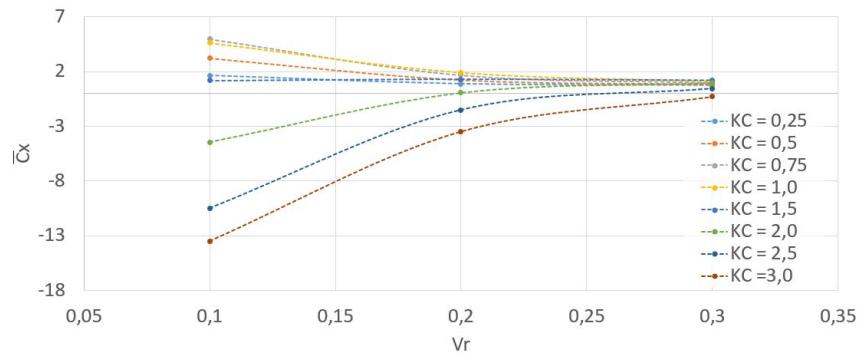
Fonte: Autoria própria.

Figura 20: Gráfico de C_a para simulações de oscilação + correnteza com disco em altos Re_o .



Fonte: Autoria própria.

Figura 21: Gráfico de \bar{C}_x para simulações de oscilação + correnteza com disco em altos Re_o .



Fonte: Autoria própria.

Tabela 6: Resultados das simulações de oscilação + correnteza de discos em altos Re_o e Re_c : Diferenças de C_d e C_a em relação aos resultados para $V_r = 0$ (oscilação pura).

V_r	KC	$C_d(\%)$	$C_a(\%)$
0,1	0,25	1,4	-7,3
	0,50	0,7	-7,1
	0,75	1,4	-6,5
	1,0	9,8	-4,9
	1,5	14,6	-2,8
	2,0	-1,6	-10,8
	2,5	-4,5	-17,5
	3,0	-3,1	-20,2
	0,2	0,25	181,4
0,50		90,4	-13,3
0,75		57,9	-13,0
1,0		39,9	-12,0
1,5		26,7	-9,5
2,0		-0,2	-17,8
2,5		-6,2	-25,4
3,0		-5,8	-30,5
0,3		0,25	315,1
	0,50	172,9	-15,2
	0,75	121,4	-16,0
	1,0	88,8	-15,9
	1,5	47,8	-15,3
	2,0	7,2	-23,8
	2,5	-3,3	-31,5
	3,0	-4,3	-36,9

Os resultados finais aplicando o modelo proposto para simulações com altos Re_o mostraram praticamente o mesmo comportamento das simulações com baixos Re_o de (YANG et al., 2014) para os coeficientes hidrodinâmicos. Para C_a , ao aumentar a correnteza

houve uma redução do C_a e da taxa de crescimento em relação ao KC . Para C_d , o aumento da correnteza ainda aumentou o seu valor, mas para $KC > 2,0$, não alterou os valores encontrados de C_d em relação às simulações com $V_r = 0$.

A visualização do escoamento para as três simulações pode ser vistas nas Figuras 22, com (a) $V_r = 0$ e $KC = 2,0$ (apenas oscilação) (b) $V_r = 0,1$ e $KC = 2,0$ (c) $V_r = 0,2$ e $KC = 2,0$, o escoamento se comportou bem similar às simulações com baixos Re . O formato anelar dos vórtices para as simulações com apenas oscilação rapidamente se perde com a adição da correnteza, um formato mais alongado de "minhoca" é arrastado pela correnteza, que ao ser aumentada, gera um aumento do tamanho dos vórtices gerados.

6.3 Estudo Aprofundado nos Casos com \overline{C}_x negativo

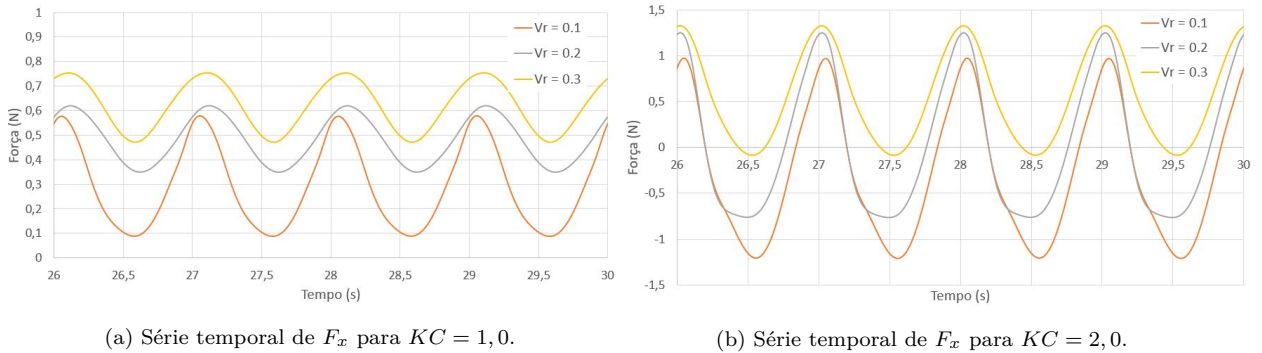
Os resultados do coeficiente \overline{C}_x das Figuras 16 e 21 mostram que para alguns casos simulados, com V_r pequenos e com KC altos, o valor negativo médio nos diria que o disco iria se movimentar contra a correnteza. Este foi um resultado não intuitivo, aparecendo apenas quando extrapolamos o intervalo de condições simuladas da validação experimental que utilizamos. Para entendermos esse fenômeno, um estudo foi realizado em alguns casos simulados, para V_r de 0,1 e 0,2 e KC de 1,0 e 2,0, para o disco com altos Re_o .

Os dois artigos encontrados que estudaram o efeito da correnteza na oscilação forçada, (YANG et al., 2014) e (GAO et al., 2020), não estudaram o coeficiente C_x ou não realizaram testes nas condições simuladas que ocorriam este fenômeno de \overline{C}_x negativo. Resultados parecidos somente foram encontrados em um relatório antigo de MOE; VERLEY, (1980), que investigou, de forma experimental, cilindros em oscilação forçada em águas calmas e em águas com correntezas. O foco do estudo foi para utilização no projeto de plataformas *offshore*, então as condições simuladas foram diferentes das realizadas pelo nosso trabalho. Neste relatório o autor também encontrou testes em que o coeficiente hidrodinâmico médio relacionado ao eixo da correnteza ficou negativo. No entanto, nenhuma explicação foi dada para estes resultados.

Analisando os valores de C_x e da série temporal de F_x nas Figuras 23 e 24, percebe-se a presença de grandes flutuações dos valores de C_x para essas condições de V_r e KC simulados. A série temporal de F_x mostra forças maiores conforme V_r aumenta, mas mais

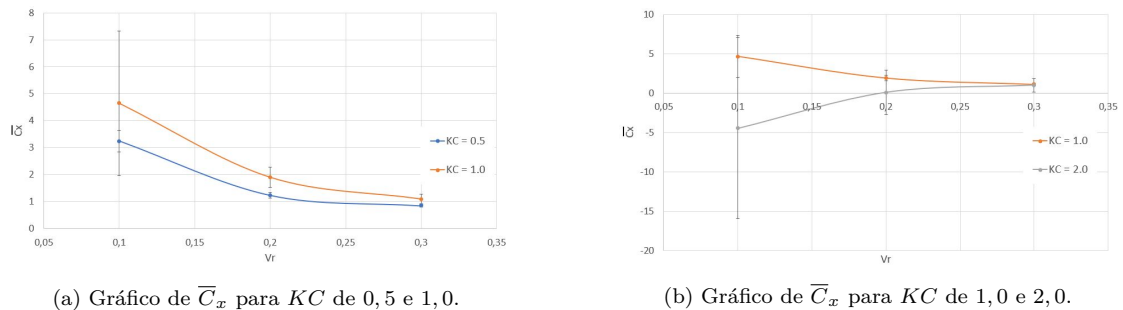
dispersões e forças negativas com V_r menores. Para $KC = 1,0$, não temos forças negativas, só mais dispersão dos valores quando $V_r = 0,1$ do que quando $V_r = 0,2$. Com $KC = 2,0$ temos resultados diferentes, com $V_r = 0,2$ o valor da força fica negativa, mas a média ainda é positiva. Enquanto que para $V_r = 0,1$ o valor da força fica negativo e a média fica negativa também.

Figura 23: Séries temporais da força F_x das simulações do disco com altos Re_o .



Fonte: Autoria própria.

Figura 24: Gráficos para o disco com altos Re_o de C_x mostrando a dispersão dos valores.

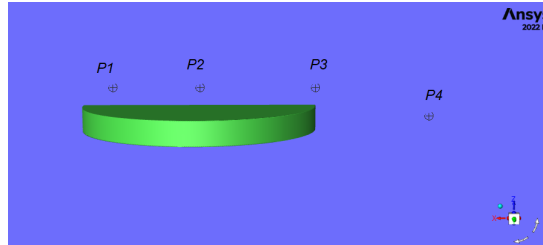


Fonte: Autoria própria.

Através da visualização de contornos de pressão em torno do disco, foi observado um comportamento característico da pressão nas simulações com correntezas, Figura 25. Ao longo do ciclo de oscilação, a pressão em cima e embaixo do disco varia, como é esperado. No entanto, diferente das simulações com apenas oscilação forçada, em que as pressões aumentam de uma forma simétrica pelo comprimento do disco, nas simulações com correnteza, as pressões aumentam da parte de trás em direção à frente. Foi verificado isso em praticamente todos os casos com correnteza. Percebeu-se que os valores das pressões variam também, por isso, para se analisar melhor essas diferenças, criou-se pontos

em cima do disco para ler a pressão ao longo do período de oscilação. Na Figura 26 é possível visualizar os pontos criados.

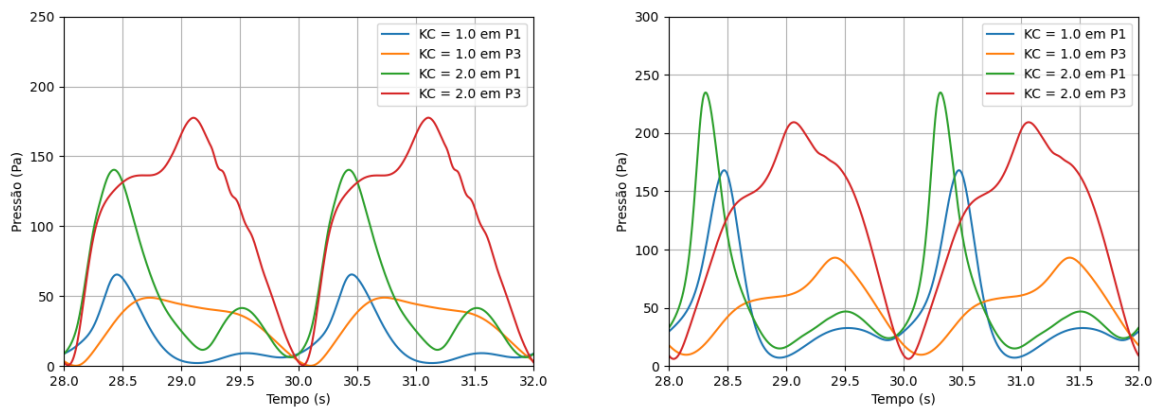
Figura 26: Pontos criados para leituras de algumas variáveis do escoamento ao longo do período de oscilação para as simulações do disco com Re_o altos.



Fonte: Autoria própria.

Criando gráficos para a pressão dinâmica nos pontos $P1$ e $P3$ é possível verificar mudanças no comportamento da pressão ao longo da simulação para os casos analisados. Nos gráficos da Figura 27, percebe-se que as pressões em $P1$ tem picos maiores que em $P3$ para os casos com $KC = 1,0$ para as duas correntezas. Para $KC = 2,0$ e $V_r = 0,2$, os picos em $P1$ e $P3$ chegam a ficar bem parecidos, mas somente com $KC = 2,0$ e $V_r = 0,1$ é possível perceber uma grande diferença nos picos. Essa diferença de pressões é o que acarreta as forças negativas, contrárias à correnteza, e nas médias negativas das forças na simulação com $V_r = 0,1$ e $KC = 2,0$, por apresentar pressões mais altas no $P3$ do que no $P1$.

Figura 27: Gráficos da pressão dinâmica das simulações para o disco em Re_o altos.



(a) $V_r = 0,1$ nos pontos $P1$ e $P3$.

(b) $V_r = 0,2$ nos pontos $P1$ e $P3$.

Fonte: Autoria própria.

O efeito descrito acima se relaciona diretamente ao *vortex shedding* já mostrado que ocorre no disco oscilando com correnteza. Dois desprendimentos de vórtices ocorrem, um na parte da frente do disco de menor intensidade, onde os vórtices são absorvidos/destruídos no meio do disco pelo movimento de oscilação e outro na parte de trás do disco de maior intensidade, onde os vórtices são arrastados pela correnteza e possuem formatos diferentes dependendo das condições de simulação. Não foram encontrados muitos estudos que analisem o *vortex shedding* de disco horizontais oscilando em um escoamento transversal, mas podemos comparar os modos de *vortex shedding* presentes em estudos com cilindros. Em (WILLIAMSON; ROSHKO, 1988),(CARBERRY; SHERIDAN; ROCKWELL, 2005),(MORSE; WILLIAMSON, 2009) e (XIONG; LIU, 2020) separa-se o *vortex shedding* em quatro modos:

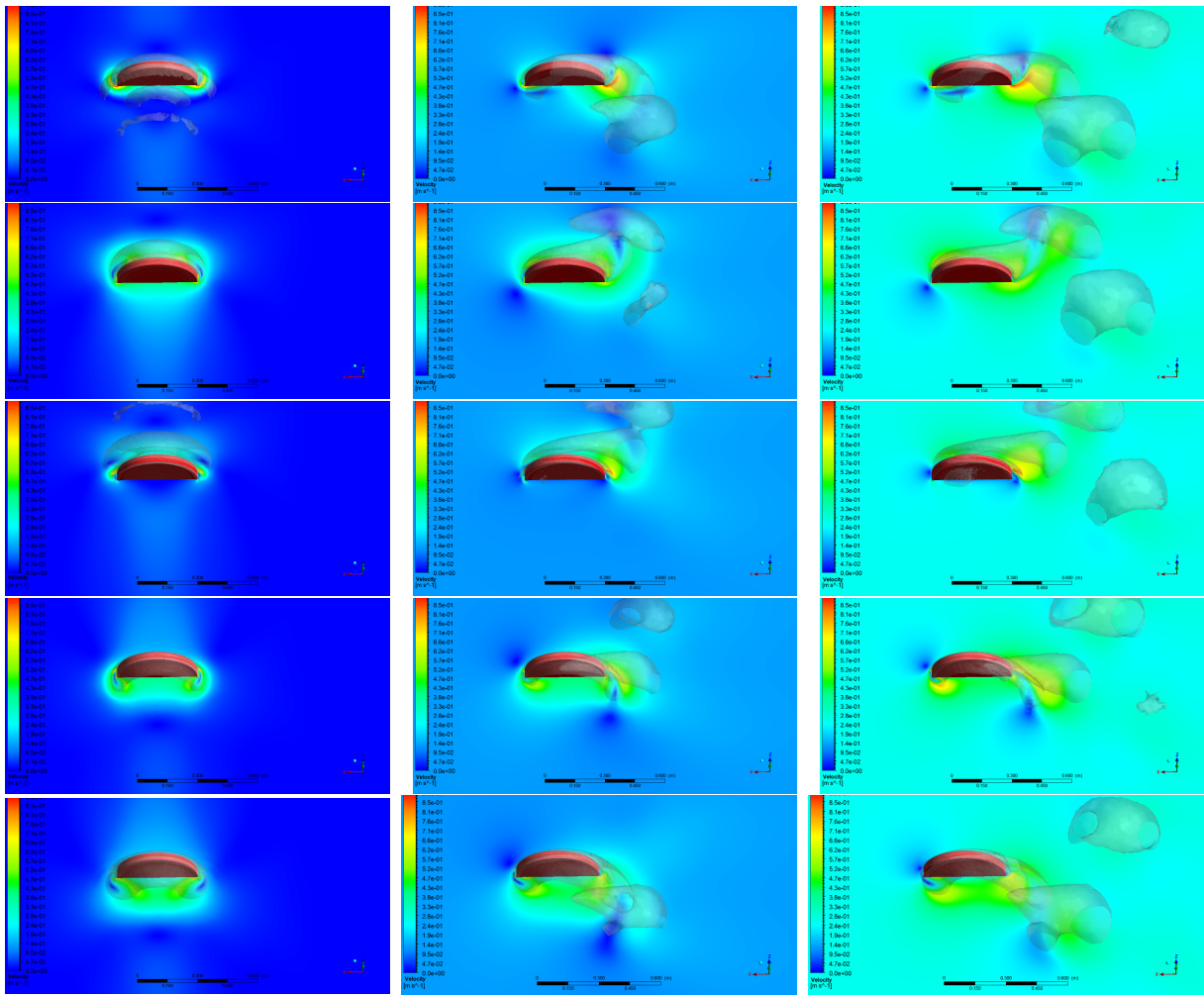
- $2S$: quando dois vórtices se desprendem a cada ciclo de oscilação;
- $2P$: quando dois pares de vórtices se desprendem a cada ciclo de oscilação;
- $P + S$: indica um modo assimétrico quando um par de vórtices aparece em um lado enquanto um vórtice único acontece no lado oposto;
- $2P_{overlap}$: indica um modo mais difícil de ser visualizado, sendo necessário boas resoluções de dados de experimentos ou simulações para perceber este modo, que é uma sobreposição de dois modos diferentes. Nele, dois pares de vórtices se desprendem a cada ciclo de oscilação. No entanto, um dos vórtices de cada par é menor, mais fraco em intensidade do que o outro.

Na Figura 28 visualiza-se a diferença dos modos de cada *vortex shedding* retirados do trabalho de MORSE; WILLIAMSON, (2009). Analisando os vórtices gerados nos quatro casos de interesse, Figuras 29 e 30, foi percebido mudanças no *vortex shedding* nas simulações que ocorrem o C_x negativo. Para as duas simulações com $KC = 1,0$, dois vórtices simples se desprendem de forma sincronizada com o período de oscilação, de acordo com o modo $2S$. Nas simulações com $KC = 2,0$ percebe-se a mudança para o modo $2P$ com $V_r = 0,2$ e para o modo $2P_{overlap}$ com $V_r = 0,1$.

Os resultados obtidos de $\overline{C_x}$ negativo das simulações são explicados pelas mudanças encontradas nas pressões e no *vortex shedding*. As interações fluidodinâmicas são complexas

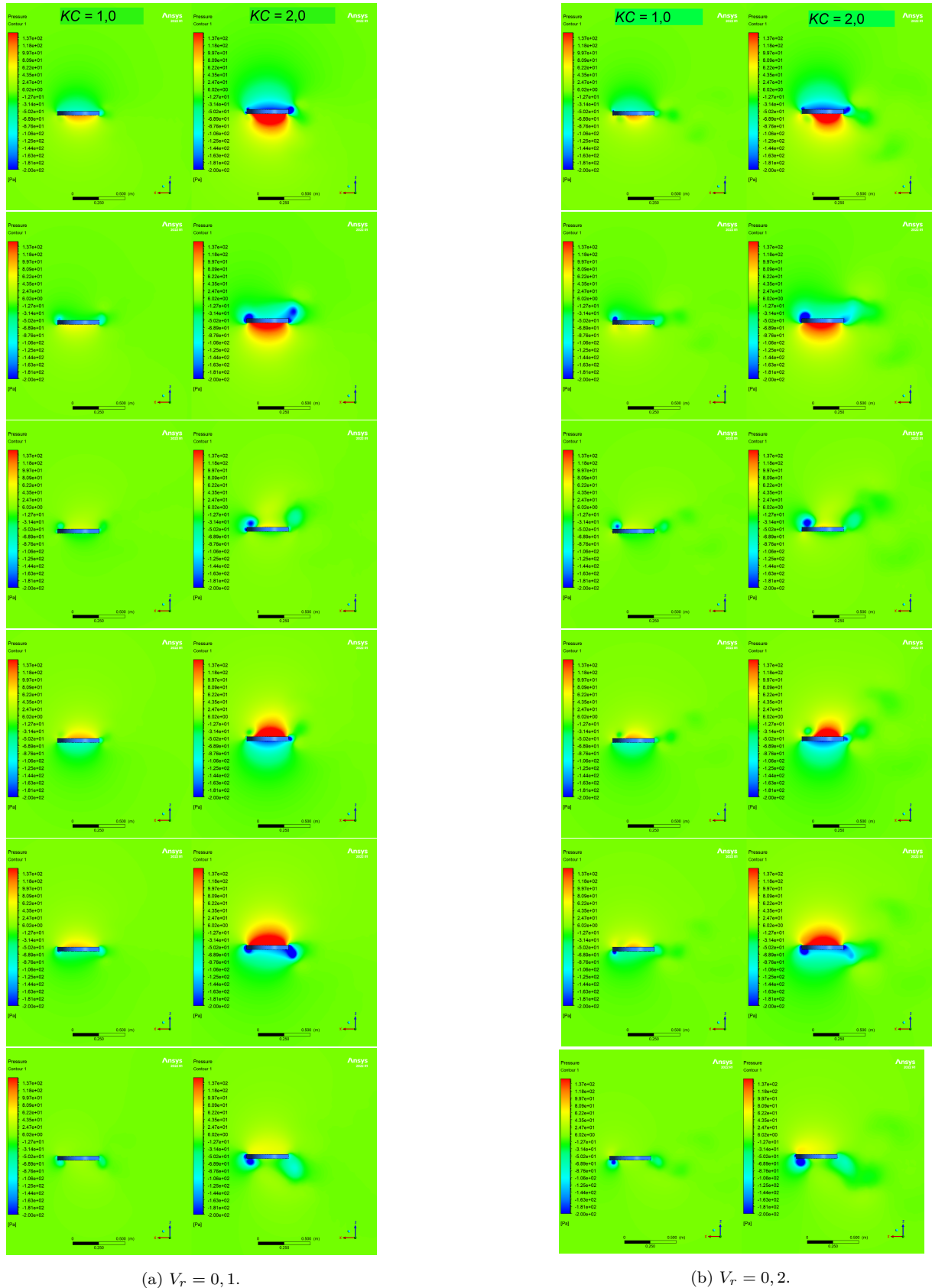
e dependem de vários fatores, como vistas nestes resultados. O resultado pouco intuitivo encontrado neste trabalho só foi encontrado em poucos estudos e para apenas algumas condições de simulações. É certo que mais trabalhos devem ser realizados mostrando a reprodução desses resultados de forma experimental e com foco no estudo do escoamento e da força F_x , diferentemente do nosso trabalho que teve como foco as forças no eixo da oscilação e a obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos.

Figura 22: Visualizações instantâneas de discos em oscilação + correnteza com $\epsilon/D = 0,02$ para simulações com altos Re , da esquerda para direita em (a) $V_r = 0$ e $KC = 2,0$ (apenas oscilação) (b) $V_r = 0,1$ e $KC = 2,0$ (c) $V_r = 0,2$ e $KC = 2,0$. Imagens no tempo $T/10, 3T/10, 5T/10, 7T/10$ e $9T/10$ para um T de simulação. Um contorno do campo de velocidades foi criado no eixo de simetria y e uma iso-superfície com $Q - criterion = 0,1 s^{-1}$ foi usada para visualização dos vórtices.

(a) $V_r = 0$ e $KC = 2,0$ (b) $V_r = 0,1$ e $KC = 2,0$ (c) $V_r = 0,2$ e $KC = 2,0$

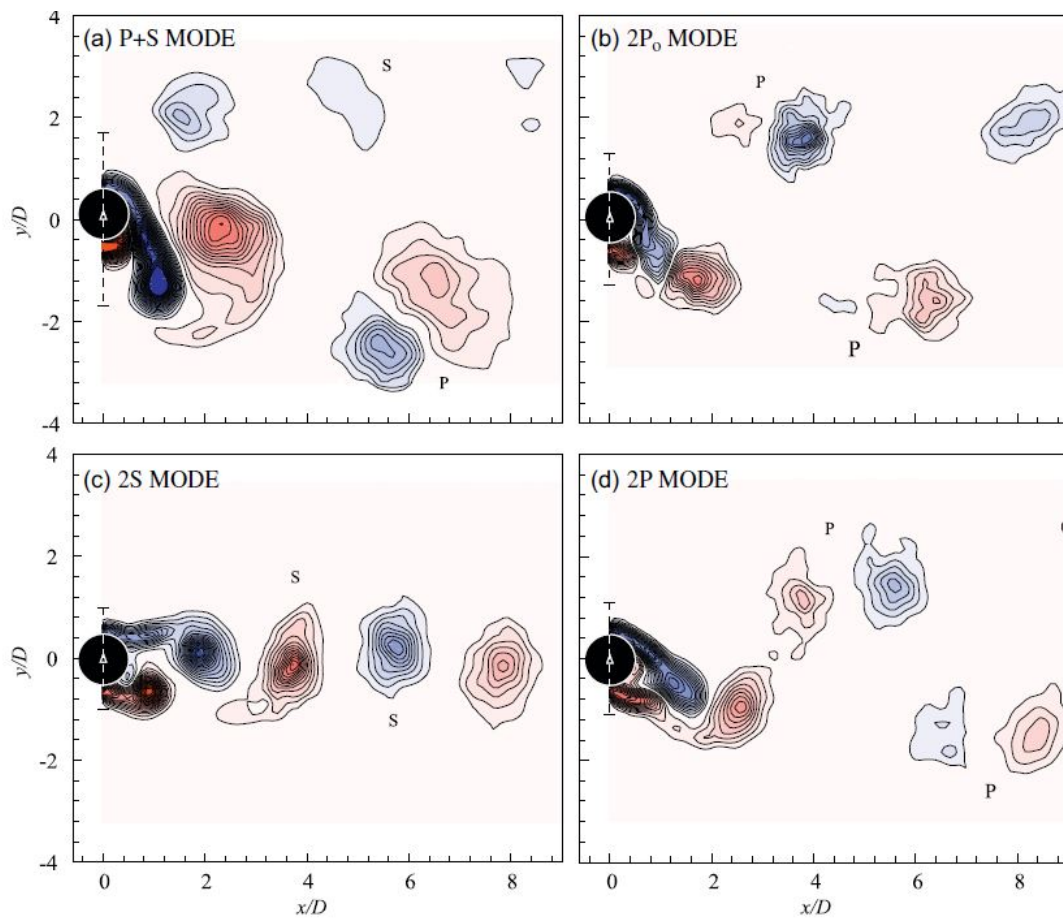
Fonte: Autoria própria.

Figura 25: Visualizações instantâneas de discos em oscilação + correnteza com $e/D = 0,02$ para simulações com altos Re , para $V_r = 0,1$ na esquerda em (a) e $V_r = 0,2$ na direita em (b). Imagens no tempo $T/20, 4T/20, 7T/20, 10T/20, 13T/20$ e $16T/20$ para um T de simulação. Contornos de pressão foram criados no plano de simetria do disco.



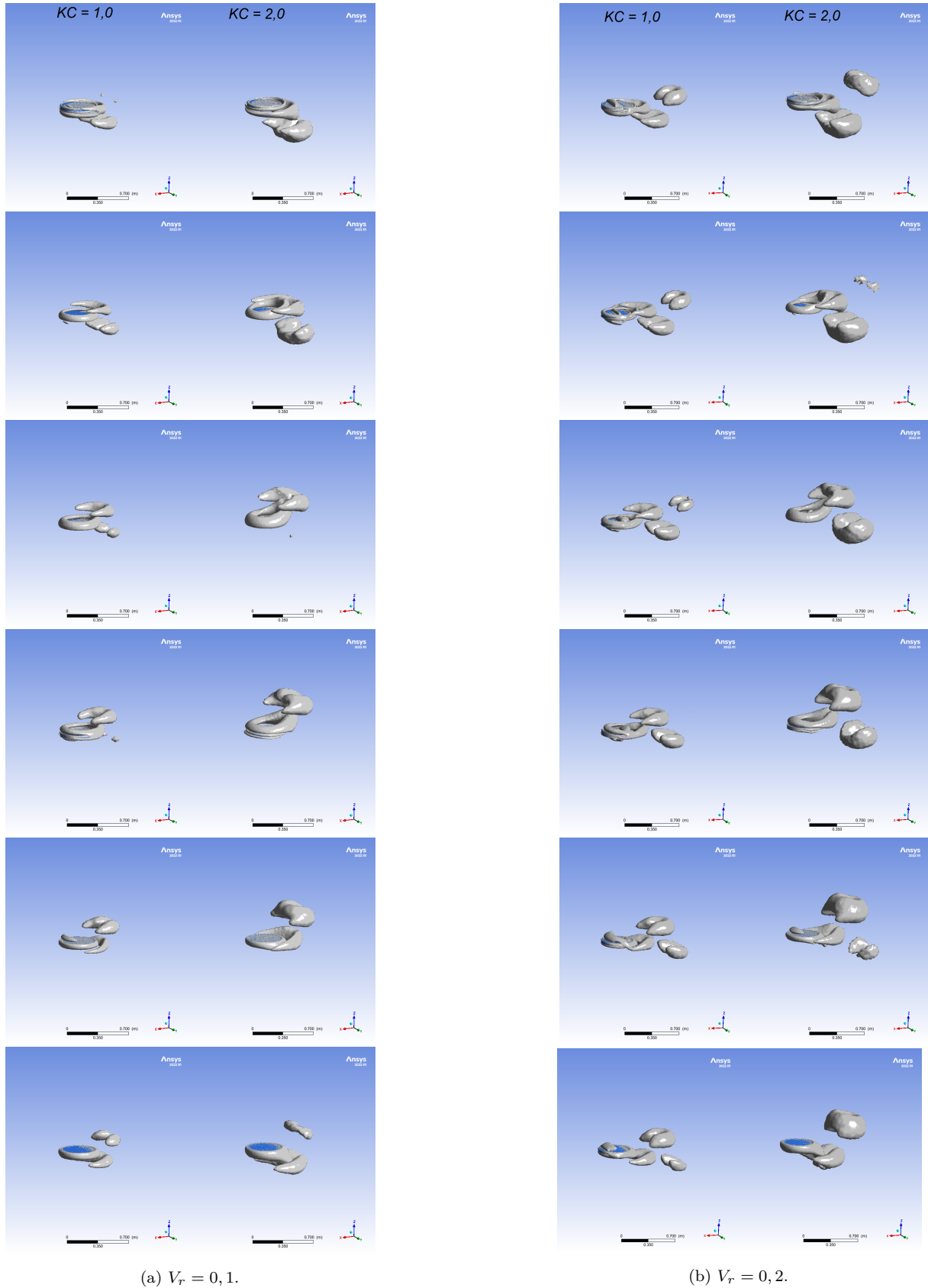
Fonte: Autoria própria.

Figura 28: Contornos de vórtices mostrando o *vortex shedding* para os modos $2S$, $2P$, $P + S$ e $2P_{overlap}$.



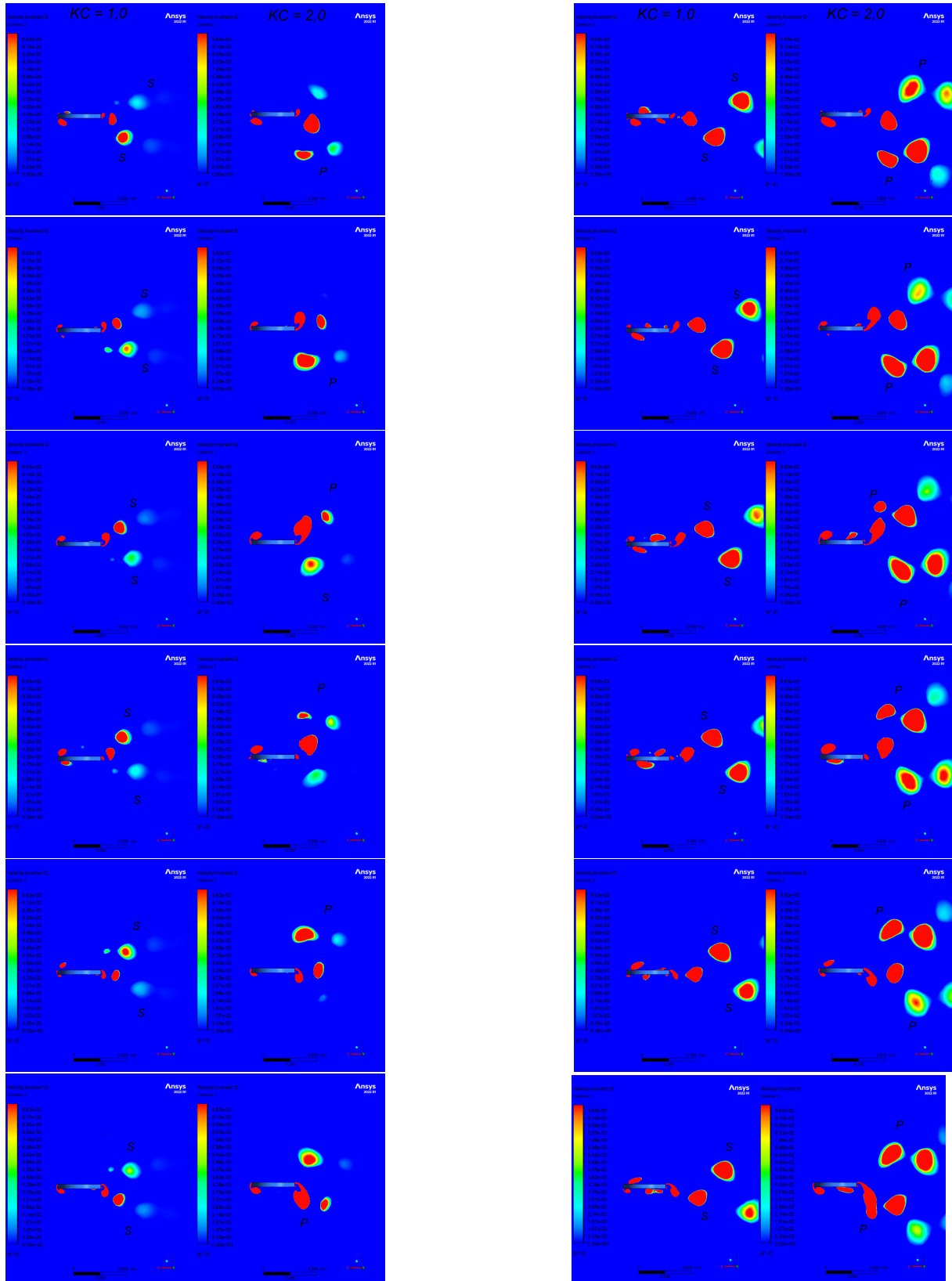
Fonte: (MORSE; WILLIAMSON, 2009)

Figura 29: Visualizações instantâneas de discos em oscilação + correnteza com $e/D = 0,02$ para simulações com altos Re , para $V_r = 0,1$ na esquerda em (a) e $V_r = 0,2$ na direita em (b). Imagens no tempo $T/20, 4T/20, 7T/20, 10T/20, 13T/20$ e $16T/20$ para um T de simulação. Uma iso-superfície com $Q - criterion = 0,1 s^{-1}$ foi usada para visualização dos vórtices.



Fonte: Autoria própria.

Figura 30: Visualizações instantâneas de discos em oscilação + correnteza com $e/D = 0,02$ para simulações com altos Re , para $V_r = 0,1$ na esquerda em (a) e $V_r = 0,2$ na direita em (b). Imagens no tempo $T/20$, $4T/20, 7T/20, 10T/20, 13T/20$ e $16T/20$ para um T de simulação. Contorno criado no plano de simetria do disco com $Q - criterion = 0,1 s^{-1}$ usado para visualização dos vórtices.

(a) $V_r = 0,1$.(b) $V_r = 0,2$.

Fonte: Autoria própria.

7 JANELA DE OPERAÇÃO DE INSTALAÇÃO

7.1 Programa *Splash Zone*

O programa *Splash Zone* serve para encontrar a janela de operação da instalação de equipamentos. Para tanto, ele se baseia na implementação dos procedimentos da norma DNV-RP-N103, (2017) para a instalação de equipamentos submarinos, especificamente utilizando os métodos da sessão 4 - *Lifting Through Wave Zone – Simplified Method*.

A sessão 4 da norma descreve um método simplificado para estimar as forças hidrodinâmicas em objetos sendo descidos através da superfície da água. Este método simplificado assume que o tamanho horizontal do objeto é relativamente pequeno em relação ao comprimento de onda, que só ocorre movimentos verticais no objeto e assume também que o movimento do objeto é o mesmo da ponta da lança do guindaste, ou seja, considera que o cabo seja rígido. Para encontrar as forças hidrodinâmicas, a norma descreve formas simplificadas para se estimar as cinemáticas da onda, do navio e as resultantes do movimento na ponta da lança do guindaste para assim calcular uma força hidrodinâmica no objeto dependente do tempo (Eq. 7.1) em função de quatro forças:

1. F_D = Força hidrodinâmica de arrasto característica $[N]$ (Eq. 7.2)

2. F_{slam} = Força de *slamming* característica $[N]$ (Eq. 7.3)

3. F_M = Força hidrodinâmica de massa característica $[N]$ (Eq. 7.4)

4. F_ρ = Força de empuxo variável característica $[N]$ (Eq. 7.5)

$$F_{hyd} = \sqrt{(F_D + F_{slam})^2 + (F_M + F_\rho)^2} \quad (7.1)$$

$$F_D = 0,5\rho C_D A_{pi} v_r^2 \quad (7.2)$$

$$F_{slam} = 0,5\rho C_s A_s V_s^2 \quad (7.3)$$

$$F_M = \sqrt{[(M + A_{33i}) \cdot a_{ct}]^2 + [(\rho V_i + A_{33i}) \cdot a_w]^2} \quad (7.4)$$

$$F_\rho = \rho \cdot \delta V \cdot g \quad (7.5)$$

Sendo A_{pi} a área da parte submersa do objeto projetado em um plano horizontal, v_r a velocidade relativa vertical característica entre o objeto e as partículas de água, C_s o coeficiente de *slamming*, A_s a área de *slamming*, v_s a velocidade de impacto de *slamming*, M a massa do objeto no ar, A_{33i} a massa adicional do objeto, a_{ct} a aceleração vertical de característica da ponta do guindaste, V_i o volume de água deslocada do objeto em relação ao nível de água parada, a_w a aceleração de partículas de água vertical característica e δV a mudança no volume de água deslocada da superfície da água parada para a crista da onda ou vale da onda. A norma fornece informações detalhadas de como encontrar essas variáveis.

Com a força hidrodinâmica encontrada, ela é somada com a força estática (Eq. 7.6) para termos a força característica total no objeto durante a operação de descida na superfície de água (Eq. 7.7).

$$F_{static} = Mg - \rho V g \quad (7.6)$$

$$F_{total} = F_{static} + F_{hyd} \quad (7.7)$$

Sendo M a massa do objeto no ar e V o volume de água deslocado em diferentes estágios no momento de entrada na água. Por fim, a força hidrodinâmica total é comparada com as capacidades máximas dos equipamentos e os critérios de segurança estabelecidos pela operação.

O programa implementa os procedimentos da norma baseado na seguinte metodologia:

1. Criação de uma condição de mar aleatória com o uso do espectro de *JONSWAP* (*JOint North Sea WAve Project*);
2. Transferência do movimento que as ondas geram numa embarcação específica, através da leitura do *RAO* (*Response Amplitude Operator*);
3. Transferência do movimento para a ponta de um guindaste específico da operação;
4. Leitura das resultantes dos deslocamentos, velocidades e acelerações no movimento de um equipamento a ser instalado preso ao guindaste durante a região de entrada na água, chamada de *splash zone*;
5. Cálculo das forças exercidas no equipamento e no guindaste a partir das resultantes dos movimentos.

O programa tem como entrada as características geométricas e hidrodinâmicas do equipamento a ser instalado, o *RAO* da embarcação, as características de operação do guindaste e um intervalo específico de período (T_p) e altura máxima da onda (H_s). O resultado da janela de operação irá mostrar para quais intervalos a operação será segura de ser realizada. Este cálculo é feito através dos resultados das forças estimadas pelo programa e analisado os critérios de segurança de operação estabelecidos pela norma.

Para utilizar os resultados dos coeficientes variáveis pelo *KC* encontrados nas seções anteriores do nosso estudo, implementações tiveram que ser realizadas no programa para o cálculo do *KC* da operação. Isso se deve ao fato da não utilização do *KC* pela norma, já que esta é limitada nas recomendações de coeficientes para utilização, incluindo apenas a sugestão de alguns valores fixos para poucas geometrias. Calculando o *KC* para cada ponto específico do intervalo de H_s e T_p , calcula-se o C_d e C_a utilizando a interpolação dos resultados dos gráficos encontrados.

7.2 Resultados da Janela de Operação para Discos

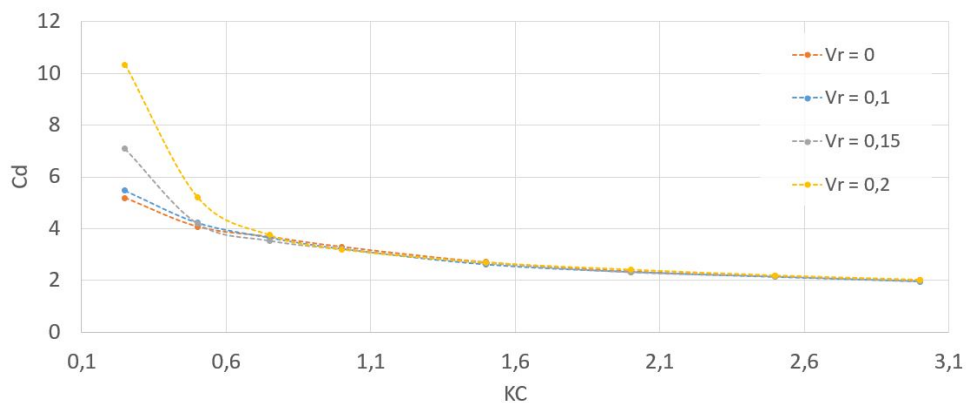
A janela de operação encontrada será uma tabela com os T_p analisados no eixo horizontal e as H_s no eixo vertical. Quatro critérios de segurança são verificados, se o

equipamento passar por todos os critérios para uma dada condição de H_s e T_p , o quadrado será pintado como verde. Caso não passe em qualquer um deles, será pintado de vermelho, indicando uma operação insegura. Os quatro critérios de segurança são:

1. Resistência do olhal de fixação, estimado pelo peso do equipamento;
2. Resistência do cabo que prende o equipamento ao guindaste;
3. Capacidade máxima do guindaste;
4. Não ocorrer solecamento. Para isso, as forças dinâmicas (Eq. 7.1) da operação devem ser menores que 90% das forças estáticas (Eq. 7.6), em concordância com a norma DNV-RP-N103, (2017).

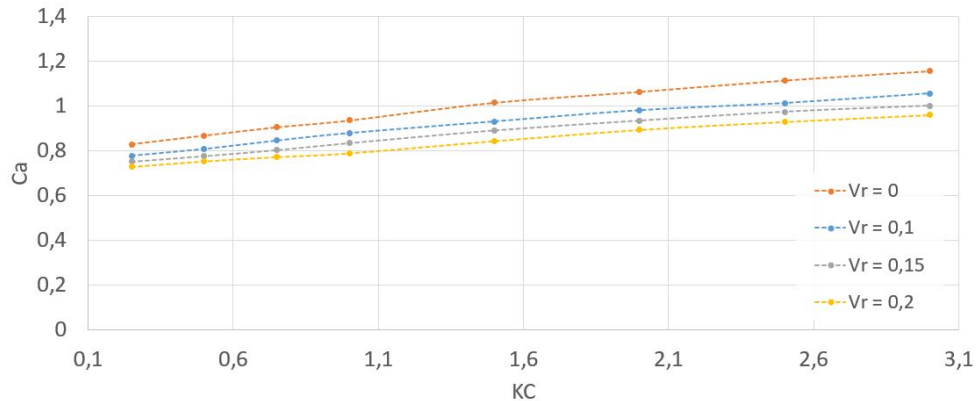
Foi escolhida uma embarcação e um guindaste típicos para instalação de equipamentos submarinos. Testou-se realizar a operação no disco com dimensões exatas ao simulado no capítulo 6.2. No entanto, sua pequena espessura e baixo peso dificultaram a instalação, encontrando janelas de operação muito pequenas por ocorrer solecamento facilmente. Para se trabalhar com uma janela de operação melhor, decidiu-se utilizar o modelo numérico deste trabalho em um disco de maior diâmetro e espessura, com $D = 3\text{ m}$ e $e = 0.9\text{ m}$. As simulações foram realizadas seguindo o mesmo processo, respeitando as condições de operação e números adimensionais utilizados anteriormente. Os resultados para os coeficientes desta geometria podem ser vistos nas Figuras 31 e 32.

Figura 31: Gráfico de C_d para simulações de oscilação + correnteza com disco de dimensões maiores em altos Re_o .



Fonte: Autoria própria.

Figura 32: Gráfico de C_a para simulações de oscilação + correnteza com disco de dimensões maiores em altos Re_o .

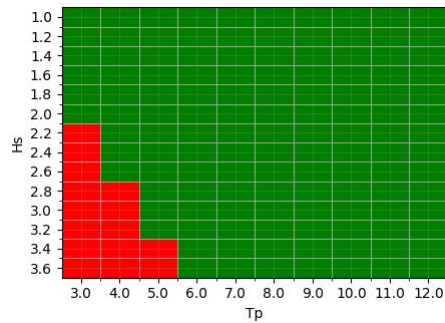


Fonte: Autoria própria.

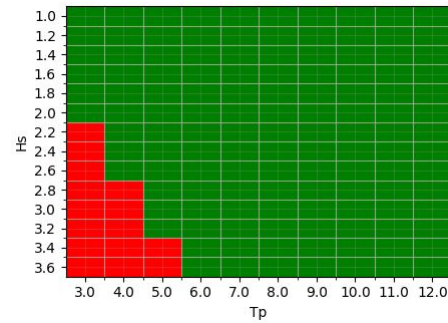
Na Figura 33 temos três janelas de operação criadas, em (a) considerando as recomendações de coeficientes constantes dados pela norma, em (b) foram utilizados os coeficientes simulados para casos de apenas oscilação forçada, $V_r = 0$. Por fim, foram consideradas janelas de operação com correntezas de $V_r = 0,1$ em (c) e $V_r = 0,2$ em (d). Esses resultados mostraram pouca relevância na utilização de coeficientes hidrodinâmicos em função do KC para obtenção de janelas de operação. Apenas considerando uma correnteza forte, com $V_r = 0,2$, alguns poucos pontos da janela foram mudados, levando à sua redução. Estes resultados foram contrários aos encontrados em alguns artigos que verificavam o conservadorismo da norma nas recomendações de coeficientes hidrodinâmicos, como de MINGUEZ et al., (2015).

Era esperado que a diferença encontrada de C_d e C_a para simulações com e sem correntezas mudasse de uma maneira mais significativa a janela de operação, no entanto, alguns pontos devem ser explicados sobre estes resultados. No programa *Splash Zone*, foram utilizados dados de uma operação real, com embarcações, guindastes e cabos reais, levando em consideração vários critérios de segurança, o que não foi visto em outros estudos. O cálculo do KC pode ser diferente do encontrado em uma operação, apenas com dados capturados no momento do processo poderia ser possível criar um modelo mais aproximado para este cálculo. Verificou-se que a geometria interfere bastante nas comparações das janelas, geometrias mais complexas tem coeficientes reais mais discrepantes às recomendações das normas, por isso, poderão ter resultados distintos. O coeficiente de *slamming*, C_s , é um coeficiente bem importante para a região de entrada

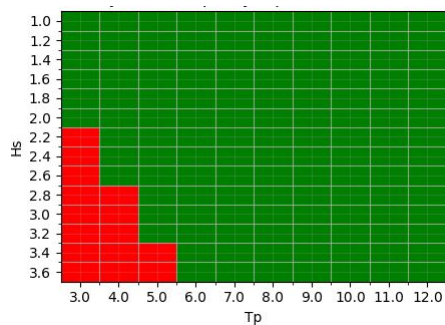
Figura 33: Resultados das janelas de operação encontradas para o disco com dimensões maiores com o uso do programa *Splash Zone*.



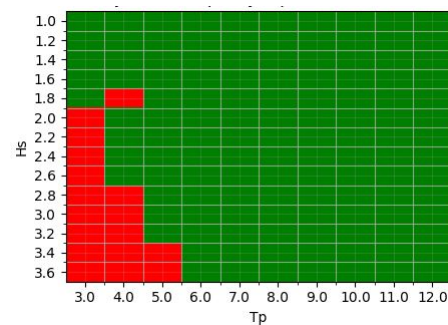
(a) Utilizando coeficientes fixos dados pela norma.



(b) Utilizando coeficientes variáveis pelo KC das simulações.



(c) Considerando correnteza com $V_r = 0.1$.



(d) Considerando correnteza com $V_r = 0.2$.

Fonte: Autoria própria.

na água. Por não fazer parte do escopo deste estudo, para este trabalho, foi utilizado o coeficiente recomendado pela norma, dado como constante.

Os resultados da Figura 33 mostram que a utilização das recomendações da norma para os coeficientes é aceitável, pelo menos para a região de entrada na água. Outros estudos analisaram a diferença de utilizar o C_d e C_a das normas com resultados próprios para a instalação na região chamada de *deep water*, que é posterior ao equipamento passar da linha d'água até chegar próximo ao leito oceânico. Diferenças significativas foram encontradas nas janelas de operação e nas forças máximas exercidas no cabo, como nos trabalhos de TOMMASINI et al., (2021) e PESTANA et al., (2021).

8 CONCLUSÃO

Um modelo numérico foi criado, de maneira bem sucedida, para simulações tridimensionais de geometrias simples em oscilação forçada com a adição de uma correnteza constante perpendicular ao eixo de oscilação. O modelo utilizando *RANS* provou ser viável e preciso para prever os coeficientes hidrodinâmicos de equipamentos durante essas condições. Devido à falta de resultados para validação com condições de operação similares às encontradas durante um processo de lançamento/içamento de equipamentos submarinos, foco deste trabalho, uma validação em etapas foi utilizada. Primeiro, o modelo foi validado apenas com oscilação forçada, com altos Re_o , depois com a combinação do efeito da correnteza para baixos Re_o . Finalmente, o modelo foi aplicado para encontrar a influência de dois parâmetros adimensionais, KC e V_r , nos coeficientes hidrodinâmicos C_d , C_a e \overline{C}_x de discos em oscilação forçada e com correntezas para altos números de Re_o e Re_c , em condições de operações similares as reais.

A influência do KC e V_r nas simulações pode ser vista nos coeficientes hidrodinâmicos, no escoamento e nos vórtices gerados. O comportamento encontrado foi de redução de C_a e aumento do C_d conforme V_r aumenta. Para altos valores de KC , V_r passa a não influenciar muito mais o C_d , tornando-se praticamente constante, pelo menos até os valores de V_r simulados aqui. O parâmetro de \overline{C}_x é muito menos importante e influente durante a operação real, então, menos atenção foi dada a ele.

Mesmo usando modelos de turbulência e malhas intermediárias de refino, o modelo alcançou resultados similares do *vortex shedding* se comparado às simulações *DNS* de validação do YANG et al., (2014). O KC e V_r influenciaram todos os aspectos da geração dos vórtices. Adicionando a correnteza na simulação, os vórtices perderam a simetria que tinham com simulações de apenas oscilação forçada. O transporte dos vórtices depende bastante da magnitude da correnteza, sendo alterado até o seu formato, conforme são

modificados os valores de KC e V_r .

Este trabalho mostrou diferenças significativas nos coeficientes, de até 300% para C_d e 36% para C_a , para discos durante condições reais de operação quando a correnteza é adicionada. Mesmo sendo uma grande diferença, esta não se traduziu em uma janela de operação muito maior ou menor do que a recomendada pela norma da DNV-RP-N103, (2017). Pelo trabalho que é necessário para incorporar e encontrar coeficientes hidrodinâmicos variáveis em função do KC , recomenda-se a utilização da norma por simplicidade. Para análise de outras partes da instalação e para equipamentos mais complexos, mais estudos são necessários para quantificar a influência dos coeficientes variáveis e do efeito da correnteza.

Algumas simulações mostraram um \bar{C}_x negativo, fazendo com que o disco se movimentasse contra a correnteza. Estes resultados foram explicados pela mudança no *vortex shedding* e nos campos de pressão do disco. Para algumas condições de simulação, V_r pequenos e KC altos, o *vortex shedding* muda, passando do modo $2S$ para um modo $2P$ ou $2P_{overlap}$. Isso acarreta em uma mudança nos campos de pressões gerados no disco, principalmente na parte de trás, que reflete deixando as forças F_x negativas e com valores mais dispersos. Estes resultados foram vistos em apenas algumas simulações e encontrados em poucos trabalhos. Por isso, mais trabalhos devem ser realizados para analisar o escoamento e as forças no eixo transversal de geometrias oscilando com a presença do efeito da correnteza.

A diferença encontrada considerando o efeito da correnteza é importante e pode influenciar o design do processo desse tipo de operação marítima. O presente trabalho é um passo à frente no entendimento dos fenômenos presentes neste tipo de operação naval, que a cada novo avanço se tornará mais segura e econômica. Trabalhos futuros incluem o uso de geometrias mais complexas, mais próximas às reais, uso de perfis de correntezas mais complexos, com estudo mais aprofundado do escoamento e dos vórtices gerados, além de estudos de outros efeitos adicionais, como o de pagamento de cabo.

REFERÊNCIAS

- CARBERRY, J.; SHERIDAN, J.; ROCKWELL, D. Controlled oscillations of a cylinder: forces and wake modes. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 538, p. 31–69, 2005.
- CHREIM, J. R. et al. Numerical study of the hydrodynamic coefficients of simple geometries under forced oscillations. In: *28 Th International Congress on Waterborne Transportation, shipbuilding and Offshore Constructions Proceedings*. [S.l.]: Galoá, 2020.
- CHREIM, J. R. et al. A study on the several methods for the calculation of the hydrodynamic coefficients in forced oscillation experiments. In: *28 Th International Congress on Waterborne Transportation, shipbuilding and Offshore Constructions Proceedings*. [S.l.]: Galoá, 2020.
- CHUA, K. H. et al. Model experiments of hydrodynamic forces on heave plates. In: . [S.l.: s.n.], 2005.
- DNV-RP-N103. *Modelling and Analysis of Marine Operations*. 2017. Offshore Installation of Heavy Package.
- DU, Y. et al. Experimental and numerical investigation of hydrodynamic coefficients of subsea manifolds. *Ships and Offshore Structures*, Taylor & Francis, v. 16, n. 6, p. 595–607, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1759492>>.
- EÇA, L.; HOEKSTRA, M. A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of cfd calculations based on grid refinement studies. *Journal of Computational Physics*, v. 262, p. 104–130, 2014. ISSN 0021-9991. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999114000278>>.
- FERNANDES, A.; MINEIRO, F. Assessment of hydrodynamic properties of bodies with complex shapes. *Applied Ocean Research*, v. 29, p. 155–166, 07 2007.
- FERZIGER, J.; PERIC, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics / J.H. Ferziger, M. Peric*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 3. ISBN 978-3-540-42074-3.
- FLUENT, A. *ANSYS fluent theory guide 15.0*. [S.l.], 2013.
- FLUENT, A. *ANSYS fluent user's guide 15.0*. [S.l.], 2013.
- FORTUNA, A. d. O. *Técnicas computacionais para dinâmica dos fluídos: conceitos básicos e aplicações*. [S.l.]: USP, 2000.
- FU, S.; XU, Y.; CHEN, Y. Seabed effects on the hydrodynamics of a circular cylinder undergoing vortex-induced vibration at high reynolds number. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 140, n. 3, p. 04014008, 2014. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\%28ASCE\%29WW.1943-5460.0000241>>.

GAO, Z. et al. Hydrodynamic damping of a circular cylinder at low kc : Experiments and an associated model. *Marine Structures*, v. 72, p. 102777, 2020. ISSN 0951-8339. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095183392030071X>>.

GHOZLANI, B.; HAFSIA, Z.; MAALEL, K. Numerical study of flow around an oscillating diamond prism and circular cylinder at low keulegan-carpenter number. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, v. 24, p. 767–775, 10 2012.

HOLMES, S. et al. Heave plate design with computational fluid dynamics. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-transactions of The Asme - J OFFSHORE MECH ARCTIC ENG*, v. 123, 02 2001.

JOURNÉE, J.; MASSIE, W. *Offshore Hydromechanics*. [S.l.: s.n.], 2001.

KEULEGAN, G. H.; CARPENTER, L. H. Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid. *Journal of research of the National Bureau of Standards*, v. 60, p. 423, 1958.

LI, J. et al. Experimental investigation of the hydrodynamic characteristics of heave plates using forced oscillation. *Ocean Engineering*, v. 66, p. 82–91, 2013. ISSN 0029-8018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801813001595>>.

MENDOZA, C. A. G. Hydrodynamic forces on heave plates for offshore systems oscillating close to the seabed or the free surface. In: . [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://oa.upm.es/36489/>>.

MENTZONI, F.; KRISTIENSEN, T. Two-dimensional experimental and numerical investigations of perforated plates in oscillating flow, orbital flow and incident waves. *Applied Ocean Research*, v. 97, p. 102078, 2020. ISSN 0141-1187. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118719307060>>.

MINGUEZ, M. et al. Cfd & basin test benchmarks for subsea lift analysis. In: . [S.l.: s.n.], 2015.

MIWA, I. Ensaio de arrasto e de oscilação forçada com modelos reduzidos de manifold. Technical Report of Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). 2005.

MOE, G.; VERLEY, R. Hydrodynamic damping of offshore structures in waves and currents. In: ONEPETRO. *Offshore Technology Conference*. [S.l.], 1980.

MORGENTHAL, G. Fluid-structure interaction in bluff-body aerodynamics and long-span bridge design: Phenomena and methods. 02 2022.

MORISON, J.; JOHNSON, J.; SCHAAF, S. The Force Exerted by Surface Waves on Piles. *Journal of Petroleum Technology*, v. 2, n. 05, p. 149–154, 05 1950. ISSN 0149-2136. Disponível em: <<https://doi.org/10.2118/950149-G>>.

MORSE, T.; WILLIAMSON, C. Fluid forcing, wake modes, and transitions for a cylinder undergoing controlled oscillations. *Journal of Fluids and Structures*, v. 25, n. 4, p. 697–712, may 2009.

- ORITSLAND, O. A summary of subsea module hydrodynamic data. *Marine Operations*, 1989.
- PATANKAR, S. V.; SPALDING, D. B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 15, p. 1787–1806, 1972.
- PESTANA, R. G. et al. Subsea manifold installation: Operational windows estimation based on hydrodynamic model testing. *Ocean Engineering*, v. 219, p. 108364, 2021. ISSN 0029-8018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801820312713>>.
- ROACHE, P. *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. [S.l.: s.n.], 1998.
- SARPKAYA, T. S. *Wave Forces on Offshore Structures*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2010.
- SOLAAS, F.; SANDVIK, P. C. Hydrodynamic coefficients for suction anchors during installation operations. In: . [S.l.: s.n.], 2017. (International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 9: Offshore Geotechnics; Torgeir Moan Honoring Symposium).
- SOUZA, M. C. de A. *A Corrente do Brasil ao largo de Santos : medições diretas*. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Oceanografia Física) — Universidade de São Paulo, 2000.
- TAO, L.; DRAY, D. Hydrodynamic performance of solid and porous heave plates. *Ocean Engineering*, v. 35, n. 10, p. 1006–1014, 2008. ISSN 0029-8018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801808000589>>.
- TAO, L.; THIAGARAJAN, K. Low kc flow regimes of oscillating sharp edges i. vortex shedding observation. *Applied Ocean Research*, p. 21–35, 01 2003 A.
- TAO, L.; THIAGARAJAN, K. Low kc flow regimes of oscillating sharp edges. ii. hydrodynamic forces. *Applied Ocean Research*, v. 25, n. 2, p. 53–62, 2003 B. ISSN 0141-1187. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118703000464>>.
- THIAGARAJAN, K. P.; TROESCH, A. W. Effects of Appendages and Small Currents on the Hydrodynamic Heave Damping of TLP Columns. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, v. 120, n. 1, p. 37–42, 02 1998. ISSN 0892-7219. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.2829518>>.
- TIAN, X. et al. Hydrodynamic coefficients of oscillating flat plates at $0.15 \leq kc \leq 3.15$. *Journal of Marine Science and Technology*, v. 22, p. 101–113, 2017. ISSN 1437-8213.
- TIAN, X. et al. Flow around an oscillating circular disk at low to moderate reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 812, p. 1119–1145, 2017.

TOMMASINI, R. B. et al. Nonlinear dynamics of deep water subsea lifting operations considering kc -dependent hydrodynamic coefficients. *Ocean Engineering*, v. 233, p. 109172, 2021. ISSN 0029-8018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801821006053>>.

WADHWA, H.; KRISHNAMOORTHY, B.; THIAGARAJAN, K. Variation of heave added mass and damping near seabed. In: . [S.l.: s.n.], 2010. v. 1.

WADHWA, H.; THIAGARAJAN, K. Experimental assessment of hydrodynamic coefficients of disks oscillating near a free surface. In: . [S.l.: s.n.], 2009. v. 4.

WALTERS, D.; COKLJAT, D. A three-equation eddy-viscosity model for reynolds-averaged navier–stokes simulations of transitional flow. *Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme - J FLUID ENG*, v. 130, 12 2008.

WILLIAMSON, C. H. K.; ROSHKO, A. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, v. 2, n. 4, p. 355–381, Jul 1988. ISSN 0889-9746. ZSCC: 0001458. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889974688900588>>.

XIONG, Z.; LIU, X. Very large-eddy simulations of the flow past an oscillating cylinder at a subcritical reynolds number. *Applied Sciences*, v. 10, p. 1870, 03 2020.

YANG, J. et al. Hydrodynamic characteristics of an oscillating circular disk under steady in-plane current conditions. *Ocean Engineering*, v. 75, p. 53–63, 2014. ISSN 0029-8018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801813003995>>.