



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

ADRIANA PORTO WALLBACH

**EXPERIMENTOS DE MOVIMENTO INDUZIDO PELO ESCOAMENTO EM
ARRANJOS DE CILINDROS COM SEÇÃO TRANSVERSAL QUADRADA A
REGIMES DE BAIXOS NÚMEROS DE REYNOLDS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Joinville
2024

Adriana Porto Wallbach

**EXPERIMENTOS DE MOVIMENTO INDUZIDO PELO ESCOAMENTO EM
ARRANJOS DE CILINDROS COM SEÇÃO TRANSVERSAL QUADRADA A
REGIMES DE BAIXOS NÚMEROS DE REYNOLDS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.
Orientador: Dr. André Luís Condino Fugarra

Joinville
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Wallbach, Adriana Porto
EXPERIMENTOS DE MOVIMENTO INDUZIDO PELO ESCOAMENTO EM
ARRANJOS DE CILINDROS COM SEÇÃO TRANSVERSAL QUADRADA A
REGIMES DE BAIXOS NÚMEROS DE REYNOLDS / Adriana Porto
Wallbach ; orientador, André Luís Condino Fugarra, 2024.
128 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Movimento
Induzido pelo escoamento (FIM). 3. Números de Reynolds
Baixos. 4. Arranjos de Cilindros de Seção Quadrada. I.
Fugarra, André Luís Condino. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e
Ciências Mecânicas. III. Título.

Adriana Porto Wallbach

**EXPERIMENTOS DE MOVIMENTO INDUZIDO PELO ESCOAMENTO EM
ARRANJOS DE CILINDROS COM SEÇÃO TRANSVERSAL QUADRADA A
REGIMES DE BAIXOS NÚMEROS DE REYNOLDS**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Dr. André Luís Condino Fugarra
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Talita Sauter Possamai
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Rodolfo Trentin Gonçalves
Universidade de Tóquio

Dr. Daniel Prata Vieira
Universidade de São Paulo

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que
foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências
Mecânicas.

Dr. Wagner Maurício Pachekoski
Coordenador do Programa

Dr. André Luís Condino Fugarra
Orientador

Joinville, 26 de fevereiro de 2024.

Este trabalho é carinhosamente dedicado a todas as pessoas queridas em minha vida que estiveram ao meu lado durante esta jornada. Seu apoio inabalável, incentivo e amor têm sido meus guias, fornecendo força e inspiração em cada passo do caminho. Para minha família, amigos e mentores, sua crença em mim foi um presente inestimável e sou eternamente grato por sua presença em minha vida. Além disso, estendo esta dedicação a todas as mulheres que dedicaram as suas vidas à ciência e à investigação. A sua resiliência, brilhantismo e espírito pioneiro abriram o caminho para as gerações futuras, quebrando barreiras e desafiando o status quo. As suas contribuições não só avançaram a nossa compreensão do mundo, mas também foram um farol de esperança e uma fonte de inspiração para mulheres jovens em todo o mundo para prosseguirem as suas paixões na ciência e na investigação. Que este trabalho honre o seu legado e o amor e apoio daqueles que tornaram esta jornada possível.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à minha família, especialmente aos meus pais, Cleusa, Nilson e João, seu apoio e amor infinitos têm sido a base do meu sucesso. Sem vocês essa jornada teria sido impossível. Seus sacrifícios e incentivo me transformaram na pessoa que sou hoje e, por isso, sou eternamente grata.

Estendo a minha mais profunda gratidão ao meu orientador, André Luís Condino Fugarra, pelos ensinamentos inestimáveis, orientação exemplar e crença inabalável nas minhas capacidades. Sua orientação foi a pedra angular de minha jornada acadêmica e sou profundamente grata por seu apoio e inspiração.

Ao Professor Alexandre Mikowski, agradeço sua gentileza e a exemplar disciplina e comprometimento com a ciência e a educação que demonstrou. Sua dedicação tem sido um farol de luz, guiando-me através dos desafios da pesquisa e do aprendizado.

Expresso minha gratidão ao CNPq pelo suporte financeiro ao projeto do Canal de Água Circulante à baixos números de Reynolds, processo número 437114/2018-0. Esse apoio foi essencial para o desenvolvimento e sucesso da minha pesquisa

Desejo também expressar minha sincera gratidão à Petrobras que, por meio de seu patrocínio vinculado à FEESC, me concedeu a bolsa que apoiou minha pesquisa de mestrado. Esta bolsa possibilitou a minha participação num projeto de intimamente relacionado com o meu tema de mestrado, que também é de interesse do FIM. A oportunidade de contribuir sendo apoiada por uma organização de tão prestígio tem sido uma parte inestimável do meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos meus queridos amigos, vocês são a família escolhida cuja presença enriqueceu cada momento desta trajetória. Seu apoio tem sido uma fonte de conforto e motivação, uma luz que me guia tanto nas provas quanto nas celebrações. Entre vocês, Francis merece destaque especial. Mais do que um amigo, ele foi um companheiro cuja visão e apoio foram inestimáveis.

Aos meus colegas de laboratório, Karen, pela camaradagem e lições aprendidas; Gabriel, pelas inúmeras horas dedicadas às nossas pesquisas no laboratório; Felipe, pela companhia e auxílio na impressão dos modelos e figuras desta dissertação; Lucas, pelo companheirismo e apoio; e Vittor, por ajudar com as impressões dos modelos. A prontidão e coleguismo de todos vocês tornaram nosso laboratório um ambiente estimulante e produtivo.

Um agradecimento especial à Monique, que foi pioneira no nosso trabalho de laboratório. Seus esforços para ajudar a construir o CAC e conduzir a série inicial de experimentos não foram apenas instrumentais, mas fundamentais para o sucesso do nosso laboratório e para a realização dos meus experimentos.

A todos vocês, seu apoio, amizade e sabedoria compartilhada enriqueceram

minha jornada de mestrado além da conta. Esta conquista não é apenas minha, mas uma prova do esforço coletivo e do espírito de companheirismo.

"Pior que não terminar uma viagem é nunca partir." (Amyr Klink)

RESUMO

As plataformas semissubmersíveis (SSP) de petróleo e gás (O&G) e turbinas eólicas offshore flutuantes (FOWT) do tipo semissubmersíveis (SS) são suportadas por arranjos de colunas, o que torna comum a presença de interações fluido-estruturais entre as mesmas e os agentes ambientais onde operam. Fenômenos de interação fluido-estrutural podem gerar movimentos indesejados, vibratórios ou oscilatórios, eventualmente de grandes amplitudes, em função da ação de ondas, correntes marítimas e ventos, os quais podem levar tais sistema à fadiga precoce. O fenômeno de Movimento Induzido pelo Escoamento (FIM) , é complexo que ocorre devido à interação entre o escoamento de um fluido e estruturas flexíveis ou elasticamente suportadas. Esse fenômeno pode ter consequências para os sistemas de engenharia afetados, e, por isso, deve ser considerado desde as fases iniciais do projeto. O FIM pode provocar oscilações com amplitudes próximas à dimensão característica do cilindro. Não há uma profusão de literatura sobre FIM em arranjos de cilindros de seção quadrada, especialmente em baixos números de Reynolds. Neste estudo, são realizados experimentos com modelos reduzidos de arranjos de três e quatro cilindros de seção transversal quadrada, com dois graus de liberdade (2GDL) , em três distâncias diferentes. Todos os arranjos têm a mesma razão de aspecto, $T/L = 2$, onde T é o calado e L a largura da face externa do cilindro, e a mesma massa reduzida, $m^* \cong 1,83$. As três distâncias entre os centros dos cilindros, S , são função de L , compondo razões inteiras $S/L = 2, 3$ e 4 . Além disso, para cada distância S , são considerados diferentes ângulos de ataque com o escoamento, $0, 90$ e 180 graus para arranjos com três cilindros, e 0 e 45 graus para arranjos com quatro cilindros. Os modelos foram testados em sete velocidades diferentes, resultando em velocidades reduzidas na faixa de $4,69$ a $11,87$, o que corresponde a números de Reynolds no intervalo de $597,50$ e $1317,50$. O exame dos resultados é conduzido avaliando a média das 10% maiores amplitudes de resposta adimensional nas direções do escoamento transversal e longitudinal, $A_y^{10\%}/D$ e $A_x^{10\%}/D$, respectivamente, juntamente com as frequências nessas direções, onde D é a dimensão característica do cilindro de acordo com a entrada do ângulo de ataque. Configurações com menor espaçamento, $S/L = 2$ exibiram amplitudes menores em comparação com outras, independente da configuração. A maior amplitude adimensional registrada foi na direção perpendicular ao escoamento, medindo $0,78$, para um arranjo de quatro cilindros, com S/L de 4 e um ângulo de ataque de 45 graus.

Palavras-chave: Movimento Induzido pelo Escoamento (FIM). Números de Reynolds Baixos. Arranjos de Cilindros de Seção Quadrada.

ABSTRACT

Semi-submersible platforms (SSP) for oil and gas (O&G) and floating offshore wind turbines (FOWT) of the semi-submersible (SS) type are supported by column arrangements, which makes the presence of fluid-structural interactions between them common and the agents environments where they operate. Fluid-structural interaction phenomena can generate unwanted, vibratory or oscillatory movements, possibly of large amplitudes, due to the action of waves, sea currents and winds, which can lead such systems to early fatigue. The phenomenon of Flow-Induced Motion (FIM) is a complex phenomenon that occurs due to the interaction between the fluid flow and a flexible or elastically supported structures. This phenomenon can have consequences for the affected engineering systems and, therefore, must be considered from the initial phases of the project. The FIM can cause oscillations with amplitudes close to the characteristic dimension of the cylinder. There is not a wealth of literature on FIM in square-section cylinder arrangements, especially at low Reynolds numbers. In this study, experiments are carried out with reduced models of arrangements of three and four cylinders with a square cross section, with two degrees of freedom (2GDL), at three different distances. All arrangements have the same aspect ratio, $T/L = 2$, where T is the draft and L the width of the external face of the cylinder, and the same reduced mass, $m^* \cong 1.83$. The three distances between the centers of the cylinders, S , are a function of L , composing integer ratios $S/L = 2, 3$ and 4 . Furthermore, for each distance S , different angles of attack with the fluid flow are considered, $0, 90$ and 180 degrees for arrangements with three cylinders, and 0 and 45 degrees for arrangements with four cylinders. The models were tested at seven different speeds, resulting in reduced speeds in the range of 4.69 to 11.87 , which correspond to Reynolds numbers in the range of 597.50 and 1317.50 . Examination of the results is conducted by evaluating the average of the 10% largest dimensionless response amplitudes in the transverse and longitudinal flow directions, $A_y^{10\%}/D$ and $A_x^{10\%}/D$, respectively, along with the frequencies in these directions, where D is the characteristic dimension of the cylinder due to the input angle of attack. Configurations with smaller spacing, $S/L = 2$ exhibited smaller amplitudes compared to others, regardless of configuration. The largest dimensionless amplitude recorded was in the direction transversal to the fluid flow, measuring 0.78 , for a four-cylinder arrangement, with S/L of 4 and an angle of attack of 45 degrees.

Keywords: Flow-Induced Motion (FIM). Low Reynolds Numbers. Square-Columns Arrangements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Plataformas fixas e plataformas flutuantes	36
Figura 2.2 – Plataforma semissubmersíveis	37
Figura 2.3 – Categorias de plataformas eólicas flutuantes	39
Figura 2.4 – Turbina eólica offshore flutuante (FOWT) em Fukushima	40
Figura 2.5 – Classificação de movimento induzido pelo escoamento	42
Figura 2.6 – Escoamento ao redor de um corpo esbelto e um corpo rombudo, respectivamente	43
Figura 2.7 – Regiões de escoamento perturbado pela presença do corpo rombudo	44
Figura 2.8 – Emissão de vórtices na esteira	45
Figura 2.9 – Regimes de escoamento em torno de um cilindro de seção circular liso em corrente estacionária	47
Figura 2.10 – Variação do número de Strouhal em função do número de Reynold	48
Figura 2.11 – Cilindro de seção transversal quadrada com ângulo de ataque α variável	50
Figura 2.12 – Comparação qualitativa entre amplitudes adimensionais em função das velocidades reduzidas	52
Figura 2.13 – VIM é um caso particular de VIV em cilindros com baixa relação de aspecto, pequena relação de massa, pelo menos 2GDL e altos números de Reynolds	54
Figura 2.14 – Amplitudes de resposta transversais em função do número de Rey- nolds	55
Figura 2.15 – Resposta transversal do cilindro para massas de quatro cilindros .	56
Figura 2.16 – Modelo de galloping com um grau de liberdade. O escoamento permanente é horizontal com magnitude U	58
Figura 2.17 – Seções estáveis e potencialmente instáveis ao galloping: (a) sus- tentação; (b) momento	60
Figura 2.18 – Inclinação dos coeficientes de força vertical para diversas seções	61
Figura 2.19 – Representação da interação do Galloping e do VIM	63
Figura 2.20 – Trajetórias nas direções X e Y: (a) escala real de seção quadrada, (b) escala real de cantos arredondados, (c) escala do modelo de seção quadrada e (d) escala do modelo de cantos arredondados .	70
Figura 2.21 – Características das amplitudes: (a) transversais ao escoamento A_y/D e (b) longitudinais ao escoamento, A_x/D	71
Figura 2.22 – Amplitude transversal, A_y/D , em ângulos de ataque de: (a) 0° , (b) 15° , (c) $22,5^\circ$ e (d) 45°	73
Figura 2.23 – Arranjos de 4 cilindros, ângulo de ataque de 0° e $S/L = 4, 3$ e 2 . .	74
Figura 2.24 – Arranjos de 4 cilindros, ângulo de ataque de 45° e $S/L = 4, 3$ e 2 .	74

Figura 2.25 – Amplitudes adimensionais na direção longitudinal do escoamento para um arranjo de 4 cilindros com razões S/L de: (a) 2, (b) 3 e (c) 4	75
Figura 2.26 – Amplitudes adimensionais na direção transversal do escoamento para um arranjo de 4 de cilindros com razões S/L de: (a) 2, (b) 3 e (c) 4	76
Figura 2.27 – Arranjos de três cilindros (circular, quadrada e diamante) nos ângulos de ataque: (a) 0° , (b) 90° e (c) 180°	77
Figura 2.28 – Arranjos de três cilindros, com ângulo de ataque de 0° com razões S/L de: (a) 2, (b) 3 e (c) 4	78
Figura 2.29 – Amplitudes adimensionais na direção longitudinal do escoamento para um arranjo de 3 cilindros com razões S/L de: (a) 2, (b) 3 e (c) 4	79
Figura 2.30 – Amplitudes adimensionais na direção transversal do escoamento para um arranjo de 3 cilindros com razões S/L de: (a) 2, (b) 3 e (c) 4	79
Figura 2.31 – Ilustração dos ângulos de ataque de cada arranjo considerando a a velocidade de escoamento U	80
Figura 2.32 – Amplitudes adimensionais na direção transversal ao escoamento para os arranjo de 3 cilindros com: (a) $\phi = 0^\circ$, (b) $\phi = 90^\circ$ e (c) $\phi = 180^\circ$	81
Figura 2.33 – Amplitudes adimensionais na direção transversal ao escoamento para os arranjo de 4 cilindros com: (a) $\phi = 0^\circ$ e (b) $\phi = 45^\circ$	81
Figura 2.34 – Amplitudes adimensionais na direção longitudinal ao escoamento para os arranjo de 3 cilindros com: (a) $\phi = 0^\circ$, (b) $\phi = 90^\circ$ e (c) $\phi = 180^\circ$	82
Figura 2.35 – Amplitudes adimensionais na direção longitudinal do escoamento para os arranjo de 4 cilindros com: (a) $\phi = 0^\circ$ e (b) $\phi = 45^\circ$	82
Figura 3.1 – CAC no LIFE da UFSC de Joinville, SC	84
Figura 3.2 – Representação de um arranjo de um sistema livre para oscilar em 2GDL, na direção transversal e longitudinal ao escoamento	85
Figura 3.3 – Sistema de Coordenadas adotado neste estudo	85
Figura 3.4 – Modelos de estudo: (a) seção quadrada; e (b) seção losango	86
Figura 3.5 – Definição dos parâmetros A , D e L	87
Figura 3.6 – Arranjo de 3 cilindros e ângulo de ataque 0° : (a) $S/L = 2$, (b) $S/L = 3$ e $S/L = 4$	88
Figura 3.7 – Arranjo de 3 cilindros e ângulo de ataque 90° : (a) $S/L = 2$, (b) $S/L = 3$ e $S/L = 4$	88
Figura 3.8 – Arranjo de 3 cilindros e ângulo de ataque 180° : (a) $S/L = 2$, (b) $S/L = 3$ e $S/L = 4$	88
Figura 3.9 – Arranjo de 4 cilindros e ângulo de ataque 0° : (a) $S/L = 2$, (b) $S/L = 3$ e $S/L = 4$	89

Figura 3.10 – Arranjo de 4 cilindros e ângulo de ataque 45° : (a) $S/L = 2$, (b) $S/L = 3$ e $S/L = 4$	89
Figura 3.11 – Modelos em escala reduzida dos arranjos de cilindros de seção quadrada	90
Figura 3.12 – Calibração: (a) referência de rastreamento, (b) regiões mapeadas nos gráficos e (c) varinha de calibração	91
Figura 4.1 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 2$	96
Figura 4.2 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 3$	97
Figura 4.3 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 4$	97
Figura 4.4 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 2$	99
Figura 4.5 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 3$	99
Figura 4.6 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 4$	100
Figura 4.7 – Frequência adimensional para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 2$	100
Figura 4.8 – Frequência adimensional para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 3$	101
Figura 4.9 – Frequência adimensional para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 4$	101
Figura 4.10 – Frequência adimensional para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 2$	102
Figura 4.11 – Frequência adimensional para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 3$	103
Figura 4.12 – Frequência adimensional para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 4$	103
Figura 4.13 – Arranjo de 3 cilindros com $\phi = 0^\circ$: (a) $A_y^{10\%}/D$, (b) $f_y^* = f_y/f_n$, (c) $A_x^{10\%}/D$ e (d) $f_x^* = f_x/f_n$	104
Figura 4.14 – Arranjo de 3 cilindros com $\phi = 180^\circ$: (a) $A_y^{10\%}/D$, (b) $f_y^* = f_y/f_n$, (c) $A_x^{10\%}/D$ e (d) $f_x^* = f_x/f_n$	105
Figura 4.15 – Arranjo de 3 cilindros com $\phi = 90^\circ$: (a) $A_y^{10\%}/D$, (b) $f_y^* = f_y/f_n$, (c) $A_x^{10\%}/D$ e (d) $f_x^* = f_x/f_n$	106
Figura 4.16 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 2$	107

Figura 4.17 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 3$	107
Figura 4.18 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 4$	108
Figura 4.19 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 2$	108
Figura 4.20 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 3$	109
Figura 4.21 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 4$	109
Figura 4.22 – Frequência adimensional para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 4 colunas com $S/L = 2$	110
Figura 4.23 – Frequência adimensional para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 4 colunas com $S/L = 3$	111
Figura 4.24 – Frequência adimensional para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 4 colunas com $S/L = 4$	111
Figura 4.25 – Frequência adimensional para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 2$	112
Figura 4.26 – Frequência adimensional para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 3$	112
Figura 4.27 – Frequência adimensional para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 4$	113
Figura 4.28 – Arranjo de 4 cilindros com $\phi = 0^\circ$: (a) $A_y^{10\%}/D$, (b) $f_y^* = f_y/f_n$, (c) $A_x^{10\%}/D$ e (d) $f_x^* = f_x/f_n$	114
Figura 4.29 – Arranjo de 4 cilindros com $\phi = 45^\circ$: (a) $A_y^{10\%}/D$, (b) $f_y^* = f_y/f_n$, (c) $A_x^{10\%}/D$ e (d) $f_x^* = f_x/f_n$	116
Figura 4.30 – Históricos temporais de deslocamentos em linha e transversal com o escoamento, matriz de 3 cilindros, $\phi = 90^\circ$, $V_r = 5,33$	118
Figura 4.31 – Históricos temporais de deslocamentos em linha e transversal com o escoamento, matriz de 3 cilindros, $\phi = 90^\circ$, $V_r = 8,35$	118
Figura 4.32 – Históricos temporais de deslocamentos no sentido longitudinal e transversal ao escoamento, conjunto de 3 cilindros, $\phi = 90^\circ$, $V_r = 11,76$	119
Figura 4.33 – Histórico de trajetórias no plano-XY para: (a) arranjo de 3 cilindros $S/L = 4$, $\phi = 0^\circ$ e $V_R = 9,93$ e (b) arranjo de 4 cilindros, $S/L = 4$, $\phi = 0^\circ$ e $V_R = 9,85$	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Artigo, Número de cilindros do arranjo, Número de Reynolds, Re e Ângulo de Ataque, ϕ	68
Tabela 3.1 – Profundidades, velocidades de escoamento e números de Reynolds dos arranjos testados	87
Tabela 3.2 – Matriz dos 105 testes repetidos três vezes cada	92
Tabela 4.1 – Teste de Decaimento e valores de amortecimento (ζ)	96
Tabela 4.2 – Médias dos 10% maiores picos na direção-Y, $A_y^{10\%}/D$, nas diferentes profundidades	115
Tabela 4.3 – Médias dos 10% maiores picos na direção-X, $A_x^{10\%}/D$	115
Tabela 4.4 – Média das 10% principais de incertezas expandidas na direção-Y, $u(A_y^{10\%})/D$	117
Tabela 4.5 – Média das 10% principais de incertezas expandidas na direção-X, $u(A_x^{10\%})/D$	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SSP	Plataformas semissubmersíveis	13
O&G	Petróleo e gás	13
FOWT	Turbinas eólicas offshore flutuantes	13
SS	Semissubmersíveis	13
FIM	Movimento Induzido pelo Escoamento	13
2GDL	Dois graus de liberdade	13
WoodMac	Wood Mackenzie	30
VIV	Vibração Induzida por Vórtices	31
VIM	Movimento Induzido por Vórtices	31
CAC	Canal de Águas Circulantes	32
PF	Plataforma Fixa	35
CT	Torre Compatível	35
TLP	Tension Leg Platform	35
SP	Plataformas Spar	36
ABS	American Bureau of Shipping	37
CO2	Dióxido de carbono	38
RMS	Raiz quadrada média	64
IDDES	Simulação melhorada de vórtices desacoplados	71
DDES	Simulação de vórtices desacoplados com atraso	72
CFD	Dinâmica de Fluidos Computacional	79
LIFE	Laboratório de Interação Fluido-Estrutura	83
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina	83
USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo	83
1GDL	Um grau de Liberdade	84
PLA	Plástico poliácido láctico	88
csv	Comma separated value	90
EMG	Eletromiógrafo	90
FFT	Transformada Rápida de Fourier	92
GUM	Guia para a Expressão de Incerteza na Medição	93
f.d.p.	Função de densidade de probabilidade	93
PIV	Velocimetria de Imagem de Partículas	101

LISTA DE SÍMBOLOS

m^*	Massa reduzida	13
T	Calado	13
L	Largura da face externa do cilindro	13
T/L	Razão de aspecto	13
S	Distâncias entre os centros dos cilindros	13
S/L	Razão de espaçamento	13
$A_y^{10\%}/D$	Amplitude de resposta adimensional na direção transversal do escoamento	13
$A_x^{10\%}/D$	Amplitude de resposta adimensional na direção longitudinal do escoamento	13
D	Dimensão característica do cilindro de acordo com a entrada do ângulo de ataque	13
Re	Número de Reynolds	32
V_R	Velocidade reduzida	33
A_x/D	Amplitude na direção longitudinal do escoamento	33
A_y/D	Amplitude na direção transversal do escoamento	33
U	Velocidade do escoamento livre	43
ν	Viscosidade cinemática do fluido	45
ρ	Massa específica do fluido	45
μ	Viscosidade dinâmica	45
f_s	Frequência de emissão de vórtices	48
St	Número de Strouhal	48
ϕ	Ângulo de ataque	51
f_y	Frequência transversal ao escoamento	53
f_x	Frequência longitudinal ao escoamento	53
m	Massa	55
f_n	Frequência natural de vibração	57
F_L	Força de sustentação	57
C_L	Coeficiente de sustentação	57
F_D	Força de arrasto	57
C_D	Coeficiente de arrasto	57
k_y	Rigidez da mola	58
\dot{y}	Velocidade vertical	58
U_{rel}	Velocidade relativa do escoamento	58
F_y	Força resultante na direção vertical do movimento do corpo	59
C_y	Ceficiente de força vertical	59
ζ	Fator de amortecimento	59

U_{crit}	Velocidade crítica	59
V_c	Velocidade típica de desprendimento de vórtices	62
V_0	Velocidade de disparo do galloping	62
m_{est}	Massa da estrutura	64
m_f	Massa do fluido deslocado pelo corpo	64
A_y	Amplitude de deslocamento transversal	64
y_{max}	Deslocamento máximo do movimento transversal	64
x_{rms}	Deslocamento na direção longitudinal do escoamento	64
A_x	Amplitude de deslocamento longitudinal	65
f^*	Razão de frequência	65
f	Frequência de vibração	65
p_d	Pressão dinâmica	65
A_p	Área projetada	65
c	Amortecimento estrutural	65
M	Massa equivalente do sistema	65
m_a	Massa adicional	65
ω_n	Frequência angular natural	65
T/L_{cr}	Razão de aspecto crítica	67
u	incerteza-padrão	94
σ	Desvio-padrão	94
n	Número de medições repetidas	94
U^*	Incerteza expandida	94
k	Fator de abrangência	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	OBJETIVOS	32
1.1.1	Objetivo Geral	32
1.1.2	Objetivos Específicos	32
1.2	JUSTIFICATIVA	33
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
2.1	OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS OFFSHORE	35
2.2	TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE FLUTUANTES (FOWT)	38
2.3	INTERAÇÃO FLUÍDO-ESTRUTURA	39
2.4	ESCOAMENTO EXTERNO	42
2.5	EMISSÃO DE VÓRTICES	43
2.6	NÚMERO DE STROUHAL	46
2.7	MOVIMENTO INDUZIDO PELO ESCOAMENTO (FIM)	49
2.8	MOVIMENTO INDUZIDO POR VÓRTICES (VIM) E VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES (VIV)	51
2.9	GALLOPING	56
2.10	MOVIMENTO INDUZIDO POR VÓRTICES (VIM) E GALLOPING	62
2.11	GRANDEZAS ADIMENSIONAIS	64
2.12	ESTADO DA ARTE	66
2.12.1	Trabalho de Chen e Chen (2016)	68
2.12.2	Trabalho de Liang et al. (2017)	69
2.12.3	Trabalho de Zhang et al. (2017)	71
2.12.4	Trabalho de Gonçalves et al. (2020a)	72
2.12.5	Trabalho de Gonçalves et al. (2020b)	76
2.12.6	Trabalho de Bruner et al. (2023)	78
3	METODOLOGIA	83
3.1	CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE (CAC)	83
3.2	GRAUS DE LIBERDADE E SISTEMA DE COORDENADAS	84
3.3	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	86
3.4	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DO MOVIMENTO INDUZIDO PELO ESCOAMENTO (FIM)	89
3.5	ENSAIOS	91
3.6	METODOLOGIA DE ANÁLISE	91
3.7	ANÁLISE DE INCERTEZAS	93
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
5	CONCLUSÃO	121
	REFERÊNCIAS	125

1 INTRODUÇÃO

Os hidrocarbonetos fósseis derivam da fossilização de organismos vegetais e animais que ocorreu ao longo de milhões de anos. Dada a sua elevada densidade energética e capacidade produtiva, esses recursos são amplamente empregados na indústria desde a era da Revolução Industrial. Mesmo que seu uso cause impactos negativos ao meio ambiente, sua utilização continuará em destaque por um longo período. Importante salientar que os hidrocarbonetos fósseis são considerados uma fonte de energia não renovável, pois sua renovação natural é muito lenta e, portanto, inadequada para atender às necessidades humanas. Segundo Souza (2020), no atual contexto global de energia, os hidrocarbonetos fósseis, incluindo petróleo, gás natural e carvão mineral, continuam a manter uma posição dominante no mercado energético.

No ano de 2022, a Indústria de Óleo e Gás (O&G) alcançou lucros excepcionais, gerando amplo fluxo de caixa para viabilizar suas estratégias em 2023. Apesar disso, as empresas do setor reconhecem a existência de incertezas geopolíticas e macroeconômicas, que podem afetar suas operações. Essas organizações também foram instruídas a garantir o fornecimento de hidrocarbonetos no curto prazo, enquanto se aguarda a transição gradual para fontes de energia mais limpas, tais como a energia eólica offshore, que devem ser amplamente utilizadas a longo prazo (DELOITTE, 2023).

A instabilidade estrutural das plataformas tende a aumentar em águas profundas. Diante dessa situação, as plataformas flutuantes surgiram como uma solução viável, sendo essas estruturas instaladas por meio de um sistema de ancoragem Qiao (2010). Dentro desse grupo, destacam-se as plataformas semissubmersíveis, que são compostas por um ou mais conveses, apoiadas em flutuadores submersos.

Essas plataformas enfrentam desafios operacionais em condições de mares adversos, sujeitas a movimentos ocasionados pelas ondas, correntezas e ventos, o que pode ocasionar danos aos equipamentos, como perfuradores. Por conseguinte, o projeto dessas estruturas demanda conhecimentos aprofundados em mecânica estrutural e hidrodinâmica, com o objetivo de assegurar seu posicionamento adequado na superfície do mar, dentro dos limites de tolerância estabelecidos por normas de sociedades classificadoras.

Inicialmente as plataformas foram projetadas para serem operadas com suas colunas assentadas no leito marinho. Atualmente, as semissubmersíveis são reconhecidas como plataformas mais estáveis e frequentemente selecionadas para lidar com condições adversas, em virtude de sua excelente estabilidade em águas agitadas, notadamente em poços situados em águas ultraprofundas (CINTRA, 2023).

Por outro lado, a energia eólica offshore é uma fonte de energia renovável e de baixo impacto ambiental, cuja produção é derivada do vento intenso e constante

encontrado em alto mar. Tal característica contribui significativamente para a geração de eletricidade de forma eficiente e sustentável (REIS, 2020).

A energia eólica offshore é gerada por turbinas eólicas instaladas no alto mar, embora o termo offshore se refira a no mar ou em alto mar. A geração de eletricidade é maximizada pela implantação de turbinas eólicas de potência significativamente maior do que em projetos terrestres, com quase o dobro da capacidade gerada em terra, o que tem despertado interesse entre os principais promotores de projetos eólicos. Além disso, o vento no mar tem velocidades constantes, permitindo a exploração do recurso de forma altamente eficiente (REIS, 2020).

A implantação de turbina eólica FOWT é uma tendência em expansão nos próximos anos, globalmente, já que os investimentos em energia eólica offshore aumentaram mais de quatro vezes desde 2020, apesar do impacto econômico sem precedentes causado pela pandemia de coronavírus. O crescimento da energia eólica offshore contribuiu para um aumento de 5% no investimento global em energia renovável, atingindo US\$ 132,4 bilhões (NOGUEIRA, 2020).

Os parques eólicos em alto mar representam alguns dos maiores investimentos já realizados em energia eólica offshore. Por exemplo, a matriz da Hollandse Kust Zuid, localizada na costa da Holanda, tem um custo estimado em US\$ 3,9 bilhões para a empresa sueca Vattenfall. Já o projeto Seagreen da SSE, localizado em Firth of Forth, na Escócia, está avaliado em US\$ 3,8 bilhões (NOGUEIRA, 2020). Na China, o número de projetos de energia eólica offshore aprovados aumentou para 17 no primeiro semestre de 2023, com destaque para o projeto Yangjiang Yangxi Shapaat, da Guangdong Yudean Group, com um investimento de US\$ 1,8 bilhão (NOGUEIRA, 2020).

O Floating Wind Offshore Wind Task Force indica que até onze portos, em todo o Reino Unido precisam ser convertidos em centros industriais para permitir a implantação em grande escala da energia eólica offshore flutuante o mais rápido possível. O relatório estima a instalação de 34 GW de energia eólica flutuante nas águas do Reino Unido até 2040, caso o governo adote medidas rápidas e decisivas. Até o momento, os ministros do Reino Unido estabeleceram a meta de 5 GW até 2030 (AJDIN, 2023).

O Japão inaugurou recentemente o primeiro parque eólico offshore fixo de grande escala em Akita, sendo um marco importante no caminho para a adoção da energia renovável no país. Três parques eólicos, com uma capacidade combinada de produção de 1,7 GW, sendo dois na província de Akita e um na província de Chiba, são os primeiros projetos de energia eólica offshore a avançar no país (INOUE et al., 2023).

De acordo com uma análise da consultoria Wood Mackenzie (WoodMac), a indústria eólica offshore deve atrair quase US\$ 1 trilhão em investimentos na próxima

década. Até 2030, é esperado que 24 países instalem parques eólicos offshore de grande escala, um aumento significativo em relação aos nove países atuais. A energia eólica offshore está se consolidando como uma das principais tecnologias para impulsionar a descarbonização da economia global, sendo uma tecnologia comprovada e já em operação em diversos países (MACHADO, 2022).

Dado que as plataformas semissubmersíveis (SSP) de O&G e FOWT do tipo SS são suportadas por colunas, é comum realizar estudos fluido-estruturais para analisar o comportamento dinâmico e os efeitos de suas colunas. É fundamental prever, tanto do ponto de vista de projeto quanto operacional, as forças hidrodinâmicas e movimentos das estruturas oceânicas causados pelo acoplamento fluido-estrutura (JAIMAN, 2009).

Estruturas como essas, ao entrarem em contato com o escoamento, sejam naturais (vento e correntes oceânicas) ou artificiais, são inevitavelmente submetidas a forças e Vibração Induzida por Vórtices (VIV) . Essa fenomenologia é observada em diversas estruturas, desde folhas de plantas até sinais de trânsito, passando por elementos estruturais mais robustos, como tabuleiros e estais de pontes, bem como tubos de troca de calor (PAÏDOUSSIS; PRICE; LANGRE, 2010).

As estruturas sujeitas ao fenômeno de VIV apresentam oscilações em determinadas velocidades de escoamento, devido à presença de turbulência ou desprendimento de vórtices. Caso essas oscilações ocorram em baixa amplitude, podem provocar fadiga ou desgaste por atrito ao longo do tempo. No entanto, em determinadas circunstâncias, a amplitude de vibração pode atingir valores significativos, acarretando danos em curto prazo, em questão de horas ou semanas. Além disso, é importante ressaltar que as vibrações podem ser auto-excitadas, o que aumenta ainda mais a sua intensidade (PAÏDOUSSIS; PRICE; LANGRE, 2010).

Sabe-se que o fenômeno de Movimento Induzido por Vórtices (VIM) é um caso particular de VIV, compartilhando o mesmo mecanismo de interação fluido-estrutura e o comportamento auto-excitado e auto-limitado. Entretanto, a designação VIM é restrita a grandes estruturas offshore flutuantes, devido aos seus períodos de oscilação que podem ultrapassar os dez segundos. Isso se deve, em grande parte, ao acoplamento complexo entre os movimentos da plataforma e as forças hidrodinâmicas, que podem influenciar significativamente o comportamento dinâmico das estruturas (FUJARRA et al., 2012).

Em ambos os casos, a energia fornecida pelo escoamento do fluido é equilibrada pela energia dissipada pelo amortecimento presente no sistema, que pode ser um cilindro rombudo ou uma unidade flutuante. Como resultado, ocorre uma oscilação auto-limitada com amplitude próxima à seção transversal, desencadeada pela frequência do desprendimento de vórtices, que é aproximadamente igual a uma das frequências naturais envolvidas (FUJARRA et al., 2012).

As SSP de O&G e as FOWTs do tipo SSP apresentam, além das colunas

circulares amplamente utilizadas, colunas com seções transversais quadradas. Essa geometria de seção quadrada é especialmente vantajosa em termos de flexibilidade construtiva, possibilitando uma maior adaptabilidade durante a fase de construção.

No estudo de configurações envolvendo cilindros de seção quadrada, além das VIM, o fenômeno do galloping também é encontrado. A origem deste fenômeno está na oscilação da força de sustentação, que se deve a mudanças no ângulo de ataque do escoamento em relação à estrutura. Normalmente, isso resulta em oscilações de alta amplitude em frequências próximas à frequência natural da estrutura, ocorrendo em faixas de baixa frequência.

Devido à alta complexidade que envolve as interações hidrodinâmicas e os movimentos das estruturas oceânicas, bem como a escassez de estudos, especialmente em relação a seções transversais quadradas com números de Reynolds baixos, é de extrema importância investigar e analisar o fenômeno de FIM nessas estruturas. Nesse contexto, a presente dissertação tem os objetivos delineados a seguir.

1.1 OBJETIVOS

Com base no exposto, são delineados e apresentados a seguir o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste estudo é investigar o efeitos do fenômeno FIM ao redor de cilindros de SSP de O&G e as FOWTs do tipo SSP, por meio da análise de arranjos de seção quadrada, considerando diferentes ângulos de ataque e diferentes distâncias relativas entre os cilindros, através de modelos em escala ultra-reduzidas testados em um Canal de Águas Circulantes (CAC) com baixo Número de Reynold (Re), de 597,50 a 1317,50.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste estudo são os seguintes:

- Caracterizar os arranjos de cilindros de seção quadrada em uma faixa de velocidades reduzidas, V_R , de 4,69 a 11,87;
- Verificar as amplitudes na direção longitudinal do escoamento, A_x/D e na direção transversal ao escoamento, A_y/D , dos arranjos de três e quatro cilindros, considerando os três razões de espaçamento entre elas ($S/L = 2, 3$ e 4) e diferentes ângulos de ataque;
- Avaliar as respostas em FIM para cada um dos arranjos analisados;

- Analisar a influência dos espaçamentos entre os cilindros e dos ângulos de ataque nas respostas do FIM; e
- Realizar comparações teórico-experimentais com os encontrados na literatura.

1.2 JUSTIFICATIVA

O FIM apresenta uma escassez de experimentos em cilindros de seção quadrado com números de Reynolds baixos. Ao conduzir a revisão bibliográfica inicial, por meio da pesquisa em bases de artigos científicos publicados e disponíveis no SciELO e Scopus, foi constatada um escasso número de estudos experimentais relacionados a esse tema.

A estratégia adotada neste trabalho consiste em utilizar o CAC de baixo Número de Reynolds como uma ferramenta de seleção. Essa abordagem é mais econômica e rápida em comparação com um tanque de provas. Embora o canal possua um número de Reynolds inferior ao real, é importante ressaltar que o número de Reynolds em um tanque de provas também é reduzido. Embora existam efeitos de escala no CAC, eles não comprometem a essência do fenômeno de FIM.

A realização de experimentos em tanques de provas resulta nos mesmos resultados ou qualitativamente nas mesmas conclusões. Como elemento de triagem, levando em consideração as dificuldades operacionais de um tanque de provas, como o tamanho do modelo, a dificuldade de manusear, a quantidade grande de lastro e o número de pessoas necessárias para operá-lo, é mais viável realizar ensaios em um modelo menor, onde uma única pessoa pode conduzir o experimento, como é o caso deste estudo.

Para investigar o fenômeno de FIM, há duas opções: a abordagem numérica e a experimental. A abordagem numérica requer um custo maior e uma capacidade computacional considerável. Já a abordagem experimental em CAC serve como um método de triagem e validação para os estudos numéricos em uma ampla faixa de Reynolds.

Dessa forma, a abordagem experimental feita em um CAC permite calibrar os estudos numéricos para uma faixa de Reynolds mais abrangente, o que, em princípio, proporciona maior precisão e possibilita uma extrapolação para os números de Reynolds reais.

É importante ressaltar que este trabalho faz parte de um estudo mais amplo. Um exame de arranjos de cilindros circulares foi realizado na pesquisa de Bruner (2022) e Bruner et al. (2023). Neste estudo, amplia-se o escopo realizando experimentos em arranjos de cilindros de seção quadrada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo fornecer uma revisão bibliográfica que abrange teorias e ferramentas fundamentais para o suporte e embasamento deste trabalho. Busca-se construir o conhecimento teórico relacionado ao fenômeno Movimento Induzido pelo Escoamento (FIM). Além disso, faz-se uma revisão da literatura para coletar subsídios científicos, com foco principal em abordagens experimentais.

É importante ressaltar que este trabalho não seguirá uma ordem cronológica na apresentação das informações, em vez disso, as informações essenciais serão fornecidas quando necessárias, visando garantir que o leitor compreenda adequadamente o fenômeno do FIM.

2.1 OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS OFFSHORE

As estruturas offshore são largamente utilizadas em todo o mundo para diversas funções, em diferentes profundidades de água e ambientes. Dentre essas funções, destacam-se a exploração e produção de óleo e gás (O&G), navegação e suporte de pontes. A produção de petróleo e gás offshore apresenta desafios relevantes para os engenheiros de projeto.

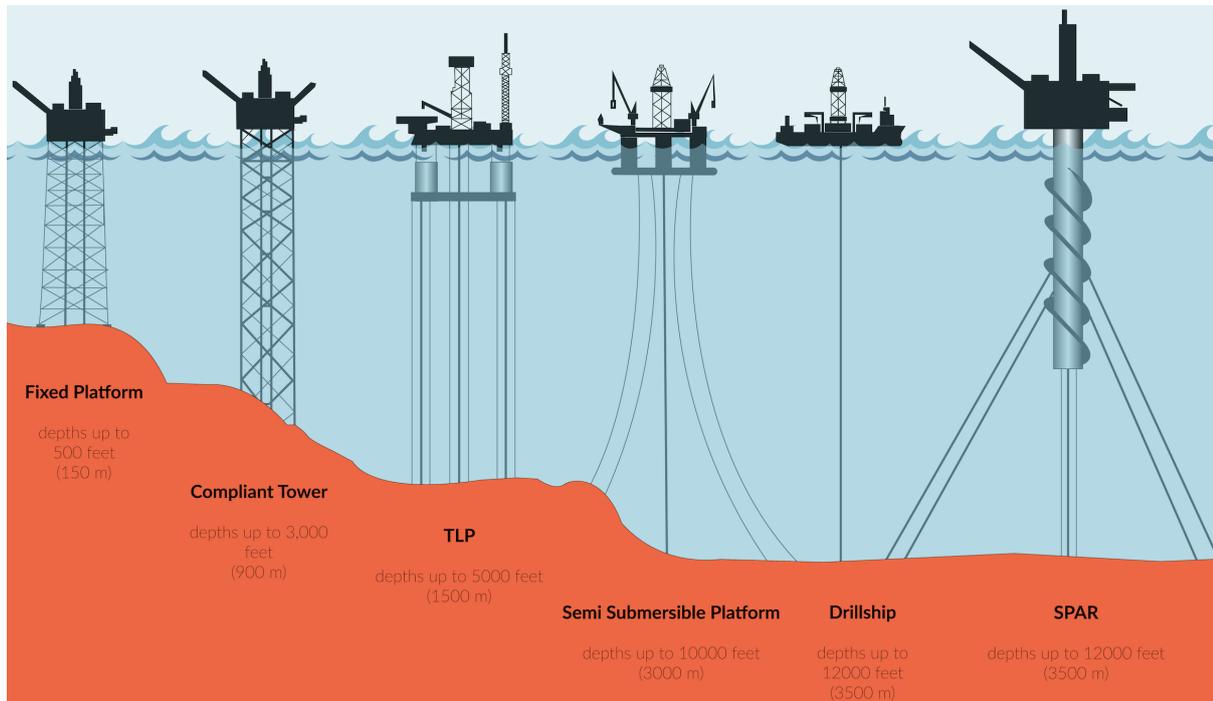
Os sistemas de produção utilizados na produção offshore de óleo e gás são classificados em plataformas fixas e plataformas flutuantes, segundo sua forma, conforme ilustrado na Figura 2.1. As plataformas fixas são fixadas diretamente no fundo do mar, enquanto as plataformas flutuantes permitem movimentos no plano da superfície livre, em relação a uma posição de equilíbrio.

A Plataforma Fixa (PF) é caracterizada por uma estrutura composta por elementos tubulares de aço dispostos verticalmente, conhecida como jaqueta, conta com estacas ancoradas profundamente no fundo do oceano para manter a estabilidade. Tais plataformas são viáveis para implantação em ambientes marinhos onde a profundidade da água não excede 1.500 pés (aproximadamente 455 metros).

Em contraste, o design de uma Torre Compatível (CT) permite absorver forças laterais substanciais sustentando deflexões laterais significativas. Essa flexibilidade o torna adequado para uso em regiões onde o mar atinge profundidades de até 3.000 pés (cerca de 900 metros) (DEEPTREKKER, 2023).

A arquitetura de uma Tension Leg Platform (TLP) distingue-se pela sua natureza flutuante, firmemente ancorada ao fundo do oceano através de uma rede de cabos tensionados verticalmente. Este mecanismo de tensionamento exclusivo permite flexibilidade operacional em uma vasta gama de profundidades de água, reduzindo significativamente a suscetibilidade da plataforma ao deslocamento vertical. As TLPs são instaladas em águas profundas atingindo profundidades próximas de 5.000 pés (cerca de 1.500 metros).

Figura 2.1 – Plataformas fixas e plataformas flutuantes



Fonte: DeepTrekker (2023).

As plataformas semissubmersíveis (SSP) são predominantemente utilizados em operações de perfuração offshore. Essas plataformas integram um sistema de perfuração flutuante composto por colunas e pontões estrategicamente projetados. Este sistema capitaliza o princípio da manipulação da flutuabilidade, semelhante ao utilizado pelas plataformas submersíveis, permitindo um controle preciso da profundidade da plataforma ajustando o volume de água dentro dos pontões. Este método mostra-se mais eficaz em águas com profundidades de até 10.000 pés (aproximadamente 3.000 metros).

Os navios de perfuração, projetados especificamente para a tarefa de perfuração, estão equipados para transportar equipamentos de perfuração para locais offshore. Essas embarcações são capazes de operar em profundidades de até 12.000 pés (aproximadamente 3.500 metros).

As Plataformas Spar (SP) distinguem-se pelo seu tamanho gigantesco. Consistem em uma grande estrutura cilíndrica que sustenta uma plataforma fixa convencional, não atingindo o fundo do mar, mas ancorada de forma segura por uma rede de cabos e linhas. Essas plataformas são adequadas para funcionar em ambientes marinhos de até 12.000 pés (aproximadamente 3.500 metros) de profundidade.

Nos últimos anos, a exploração offshore de petróleo e gás tem se expandido para áreas de águas profundas e ultraprofundas, o que tem levado a um aumento na demanda por sistemas flutuantes. De acordo com a DNV (2018), padrão publi-

cado pela DNV GL para estruturas flutuantes de turbinas eólicas, a determinação da vida útil à fadiga de projeto de componentes estruturais deve ser embasada na vida útil especificada da estrutura. Recomenda-se utilizar, no mínimo, um período de 20 anos, independentemente da duração real da vida útil, visando garantir a integridade estrutural.

Essas estruturas devem operar com segurança durante sua vida útil projetada, apesar dos ambientes marinhos hostis. Dentre as considerações de projeto importantes, destacam-se os picos de carregamento e a fadiga gerada pelo escoamento ao longo da vida útil da plataforma, bem como os movimentos da plataforma.

No presente trabalho, o foco será nas plataformas semissubmersíveis. Inicialmente concebidas como plataformas fixas, atualmente tais unidades são empregadas na produção offshore de petróleo e gás em águas profundas e ultraprofundas. A Figura 2.2 mostra a primeira plataforma de produção e armazenamento SSP em águas profundas de 100.000 toneladas do mundo construída, certificada pela American Bureau of Shipping (ABS), que foi lançada na China.

Figura 2.2 – Plataforma semissubmersíveis



Fonte: OEDigital (2021).

As semissubmersíveis são frequentemente escolhidas para condições adversas devido à sua excelente estabilidade em mar aberto. A estabilidade é controlada por sistemas de ancoragem como âncoras, cabos e correntes, e sistemas de posicionamento

dinâmico, com propulsores instalados no casco. Elas possuem grande mobilidade, permitindo a rápida movimentação de um campo de produção para outro. A sua estrutura é formada por um ou mais conveses, apoiados por colunas em flutuadores submersos (PETROBRAS, 2015).

2.2 TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE FLUTUANTES (FOWT)

A energia eólica é uma fonte renovável em rápido crescimento, com um aumento da taxa anual de 30%. A maior parte da geração de energia eólica ocorre onshore, porém, o crescimento dessas instalações é restrito devido principalmente à escassez de terrenos acessíveis e de baixo custo nas proximidades de centros populacionais e também devido ao impacto visual causado pelas grandes turbinas eólicas (SCLAVOUNOS D.P.; LEE, 2008).

Com a necessidade de ajustar a matriz energética e diante do esgotamento dos recursos energéticos fósseis, a energia eólica tem emergido como uma importante fonte renovável e sustentável nos últimos anos. O desenvolvimento e a utilização dessa forma de energia tornaram-se princípios fundamentais nas políticas energéticas adotadas em todo o mundo. As turbinas eólicas, como um meio eficiente de aproveitamento da energia dos ventos, têm sido objeto de estudo por pesquisadores de diferentes países, impulsionando o rápido crescimento da indústria eólica (ZHANG et al., 2020).

A utilização de fontes de energia renovável desempenha um papel essencial na redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂). As FOWTs são amplamente reconhecidas como a solução mais viável e econômica para aproveitar a energia renovável em águas profundas (ZHANG et al., 2020).

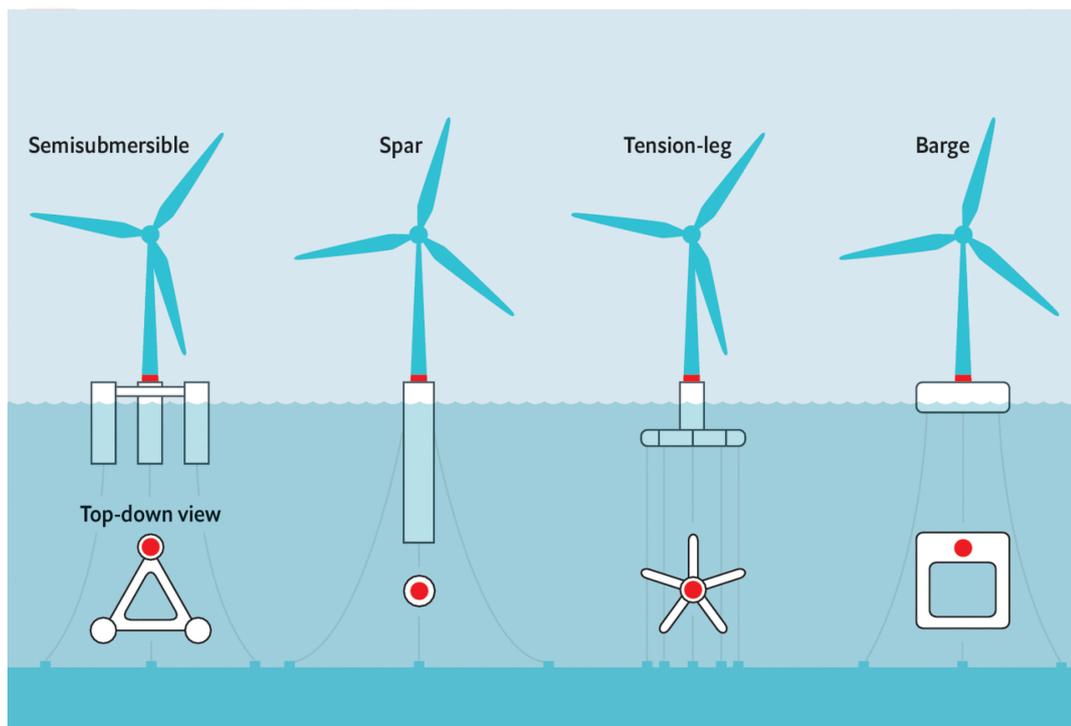
As FOWTs de acordo com sua abordagem para alcançar estabilidade hidrostática, podem ser classificadas em quatro categorias principais, conforme ilustrado na Figura 2.3. Entre essas categorias, destaca-se o tipo semissubmersível, por sua ampla faixa de profundidades de água e pelo seu bom desempenho hidrodinâmico. Tornando-se uma tecnologia altamente promissora para a utilização de energia eólica em ambientes marítimos (MEI; XIONG, 2021).

Segundo Jiang (2021) a Figura 2.3 apresenta uma categorização de FOWT em quatro grupos principais com base na abordagem para alcançar a estabilidade hidrostática. A primeira, conhecida como spar garante o equilíbrio de rotação (roll) e inclinação (pitch) através do uso de lastro.

A tipo barcaça constitui a segunda categoria, aproveitando sua extensa área de plano de água para flutuabilidade e manutenção da estabilidade. Uma terceira categoria, a plataforma tension legs (TLP), depende de cabos de amarração firmemente fixados para estabilização.

Por último, a categoria semissubmersível, caracterizada pela sua dependência da flutuabilidade para estabilidade, destaca-se pela sua adaptabilidade em várias

Figura 2.3 – Categorias de plataformas eólicas flutuantes



Fonte: Mei e Xiong (2021).

profundidades de água e desempenho hidrodinâmico superior. Esta versatilidade e eficiência tornam o projeto SS uma solução excepcionalmente promissora para a implantação de tecnologia eólica flutuante.

A FOWT do tipo semissubmersível (SS), ilustrada na Figura 2.4, possui grande parte de sua forma de casco (70 – 85%) submersa. Devido a sua baixa linha d'água, a SS é menos afetada pelas ondas em comparação com um navio convencional. No entanto, um lastro adequado é necessário para obter o ajuste e a estabilidade desejados (SHARMA et al., 2010).

As semissubmersíveis apresentam movimentos significativamente reduzidos em relação às ondas, tornando-os adequados para tarefas que exigem movimentos rigorosos. Essas plataformas oferecem melhores características de movimento em ondas, vento e corrente, capacidade de suportar um sistema de amarração e uma extensa área de convés (SHARMA et al., 2010).

2.3 INTERAÇÃO FLUÍDO-ESTRUTURA

Segundo Zdravkovich (1997) ao ocorrer o escoamento de um fluido em torno de um corpo estacionário, ou quando um corpo se desloca em um fluido em repouso, é inevitável a formação de uma região de escoamento perturbado ao redor do corpo.

Figura 2.4 – Turbina eólica offshore flutuante (FOWT) em Fukushima



Fonte: PowerTechnology (2015).

A extensão dessa região perturbada é muito dependente das características do corpo, do seu formato, orientação e tamanho, além da velocidade e viscosidade do fluido. Além disso, essa região pode ser influenciada por uma ampla variedade de pequenas perturbações.

Tanto a interação entre a estrutura e o fluido quanto suas características individuais podem influenciar a região perturbada. A parte estrutural, em geral, pode ser modelada resultando em uma única equação linear quando um grau de liberdade é excitado pela força do escoamento, ou um sistema linear de equações quando a estrutura possui mais de um grau de liberdade. Por outro lado, o comportamento do fluido, devido à sua natureza não linear e seus múltiplos graus de liberdade, só pode ser modelado por meio da combinação de princípios básicos e dados experimentais (BLEVINS, 2001).

A mecânica é considerada a ciência física mais antiga, responsável pelo estudo do comportamento de corpos sob a influência de forças, tanto estacionários quanto em movimento. A mecânica dos fluidos, por sua vez, é a parte da mecânica que se dedica ao estudo do comportamento de fluidos em duas situações distintas: quando estão em repouso, o que é conhecido como estática dos fluidos, e quando estão em movimento, caracterizando a dinâmica dos fluidos (ÇENGEL; CIMBALA, 2010).

Além disso, essa área de estudo abrange a análise da interação entre fluidos e sólidos, bem como entre diferentes fluidos nas fronteiras. Dentro do contexto da mecânica dos fluidos uma substância no estado líquido ou gasoso é denominada fluido (ÇENGEL; CIMBALA, 2010).

As interações fluido-estruturais referem-se ao acoplamento de leis que descrevem a mecânica estrutural e a dinâmica dos fluidos, e são caracterizadas por fenômenos resultantes das interações entre uma estrutura deformável ou em movimento e o escoamento de um fluido, seja ele interno ou externo à estrutura (KANEKO et al., 2008). Essas interações envolvem a influência entre as forças exercidas pelo fluido sobre a estrutura e a resposta da estrutura às ações do fluido. O estudo dessas interações busca compreender os efeitos decorrentes dessa interação fluido-estrutura, como as vibrações induzidas pelo escoamento em um cilindro.

Os fenômenos de interação fluido-estrutura são extensamente observados em estruturas oceânicas, como plataformas, risers e FOWT. Essas interações podem resultar em movimentos indesejados e vibrações de grande amplitude, causados pela influência de ondas, correntes e ventos, o que pode levar a danos por fadiga nas estruturas, comprometendo a segurança e a integridade das estruturas.

Esses fenômenos representam desafios importantes para o projeto, a construção e a operação dessas estruturas marítimas. A interação entre o escoamento, como as ondas do mar e as correntes marítimas, e a resposta dinâmica da estrutura pode levar a efeitos complexos e imprevisíveis.

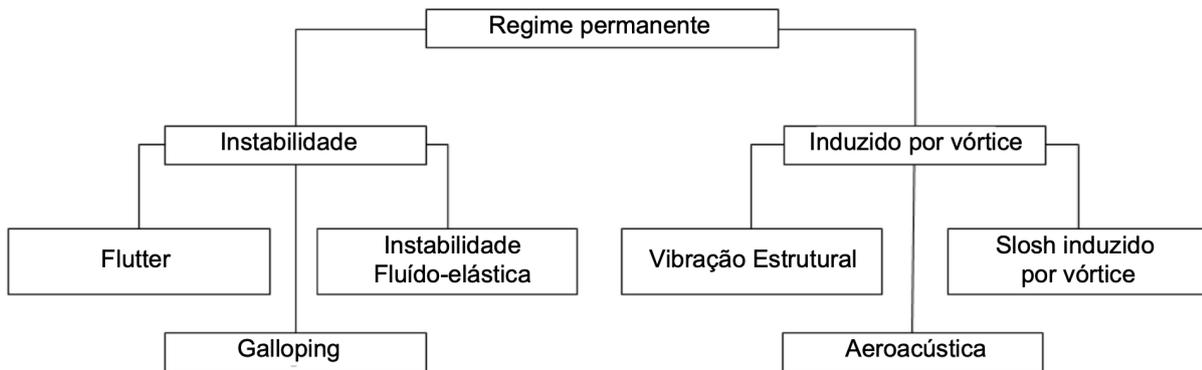
Portanto, compreender e mitigar esses fenômenos de interação fluido-estrutura é fundamental para garantir a confiabilidade e a durabilidade dessas estruturas. Uma metodologia para investigar esses fenômenos envolve experimentos em escala reduzida, a fim de projetar estruturas adequadas para resistir aos efeitos adversos causados pelo ambiente marítimo e garantir a operação segura e eficiente ao longo do tempo.

Nas discussões sobre movimentos induzidos por interações fluido-estrutura, os aspectos fundamentais dependem das características do escoamento e da estrutura envolvida. O escoamento ao redor uma estrutura aplica forças que podem deslocá-la ou deformá-la, alterando a sua orientação em relação ao escoamento (BLEVINS, 2001). Em cenários onde o regime é permanente, a dinâmica do movimento resultante pode ser categorizada conforme ilustrado na Figura 2.5.

Segundo Blevins (2001) (Figura 2.5) os movimentos induzidos pelo regime permanente podem ser divididos em instabilidade e induzidos por vórtices. Os movimentos induzidos por instabilidades podem ser agrupados em Galloping, Flutter e Instabilidade Fluido-elástica. Já os movimentos induzidos por vórtice são agrupados em Vibração estrutural, Slosh induzido por vórtice e Aeroacústica.

No contexto de estruturas com seções transversais quadradas, os fenômenos de VIM e galloping destacam-se como considerações significativas. Estas respostas

Figura 2.5 – Classificação de movimento induzido pelo escoamento



Fonte: Adaptada e traduzida de Blevins (2001).

dinâmicas são fundamentais para a compreensão da interação entre os escoamentos e essas estruturas geometricamente definidas.

2.4 ESCOAMENTO EXTERNO

No corpo abrangente da literatura contemporânea, os estudiosos delineiam regiões de escoamento perturbadas como aquelas que retêm as características inerentes do escoamento original, mas modificadas pela presença de um objeto. A geometria deste objeto pode categorizá-lo como esbeltos ou rombudos.

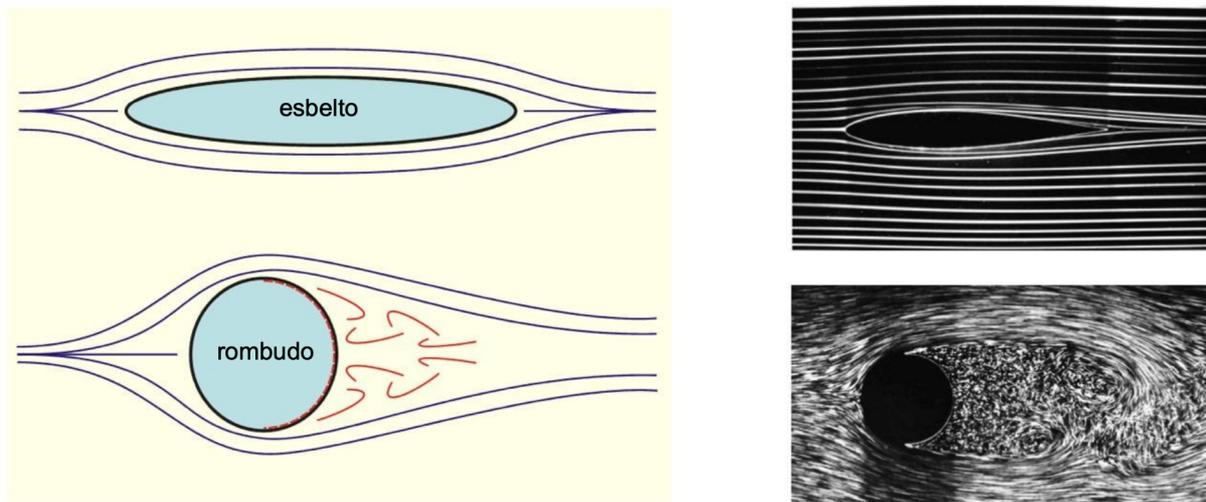
Corpos esbeltos são definidos como aqueles que podem ser submersos no escoamento sem causar perturbações significativas. Neste cenário, o fluido demonstra um gradiente de velocidade apenas próximo à parede estrutural, resultando em linhas de escoamento que correm paralelas à própria estrutura, conforme ilustrado na Figura 2.6.

Bearman (1984) explica que um corpo rombudo, quando imerso em uma corrente de fluido, induz uma separação do escoamento. Esta separação manifesta-se numa porção substancial da superfície em contato com o próprio corpo, conforme ilustrado na Figura 2.6.

A Figura 2.6 representa as linhas de escoamento aderindo a um corpo esbelto e a região de escoamento separada a jusante de um objeto rombudo. Em termos gerais, o escoamento em torno de objetos rombudos normalmente exibe regiões de escoamento perturbadas devido à presença do objeto, conforme categorizado por (ZDRAVKOVICH, 1997). A Figura 2.7 ilustra as várias regiões ao redor do escoamento, que incluem:

- A região 1 é caracterizada como uma área de escoamento lento resultante do ponto de estagnação frontal do objeto;

Figura 2.6 – Escoamento ao redor de um corpo esbelto e um corpo rombudo, respectivamente



Fonte: Adaptada e traduzida de Dyke (1982).

- A região 2 é identificada como a camada limite aderida à superfície do objeto. Quando o gradiente de pressão se torna desfavorável à aderência das camadas limites, elas se desprendem e formam camadas de cisalhamento livres que definem a esteira próxima;
- A região 3 consiste no escoamento que é desviado e acelerado pelo objeto, onde a velocidade média do escoamento excede a do escoamento de entrada;
- A Região 4 faz parte do escoamento perturbado conhecido como esteira, que apresenta escoamento completamente separado com velocidade média inferior ao escoamento de entrada.

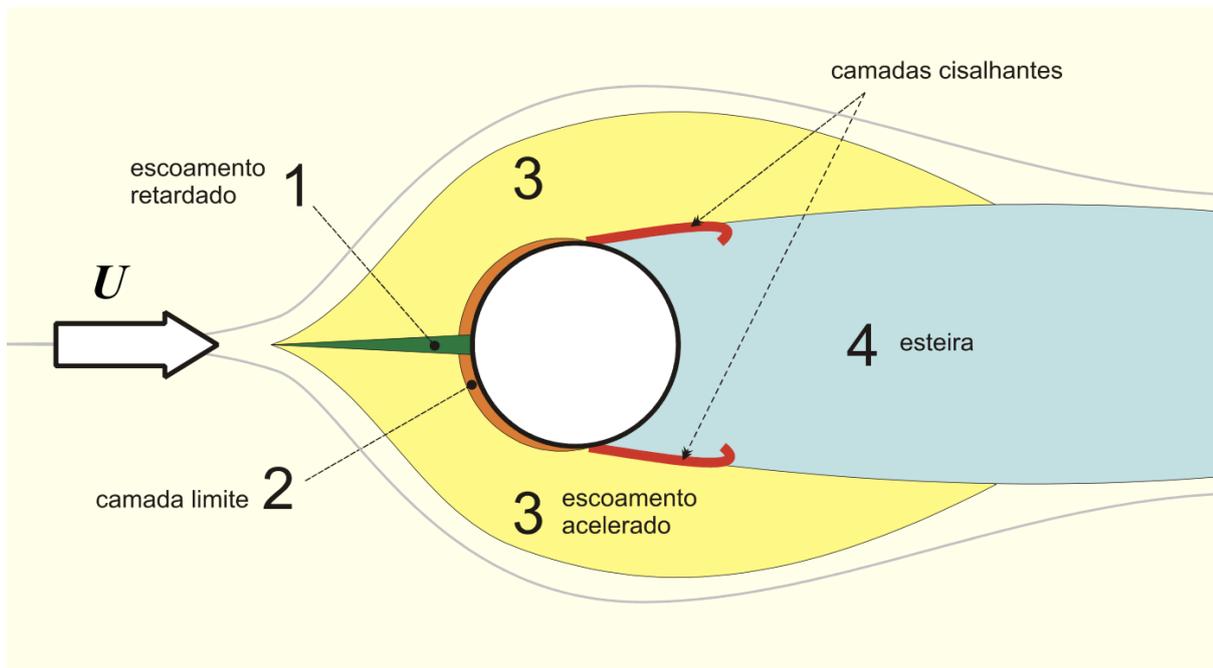
A região próxima da esteira, área de esteira adjacente ao objeto, é onde se originam os fenômenos primários responsáveis pelos movimentos induzidos pelo escoamento.

A Figura 2.7 mostra o escoamento ao redor de um cilindro infinito, onde U representa a velocidade do escoamento uniforme. Regiões de escoamento perturbado foram definidas como áreas onde as características originais do escoamento são modificadas pela presença de um corpo (ZDRAVKOVICH, 1997).

2.5 EMISSÃO DE VÓRTICES

Quando sujeitos a um escoamento, alguns corpos apresentam separação em uma porção substancial de sua superfície, sendo classificados como corpos rombudos. Em corpos esbeltos com bordas afiadas, a separação ocorre nas saliências, enquanto em corpos rombudos com curvatura de superfície contínua, a localização da separação

Figura 2.7 – Regiões de escoamento perturbado pela presença do corpo rombudo



Fonte: Adaptada e traduzida de Zdravkovich (1997).

depende de dois principais fatores: a forma do próprio corpo e o estado da camada limite.

O desprendimento de vórtices e a turbulência resultante da esteira geram variações de pressão na superfície do corpo rombudo, podendo causar oscilações se o corpo for flexível. As oscilações induzidas pela liberação de vórtices geralmente ocorrem na direção perpendicular ao escoamento, com amplitudes da ordem de 1,5 a 2 vezes o diâmetro do corpo (BEARMAN, 1984).

Além disso, corpos localizados na esteira de um corpo rombudo sujeito ao escoamento também podem ser forçados a oscilar, com flutuações nas forças resultantes da turbulência que podem levar a oscilações de amplitude ainda maior do que as do corpo à montante. De acordo com Bearman (1984) com instabilidades fluidodinâmicas, onde os movimentos do corpo rombudo são impulsionados por forças em fase com sua velocidade, podem resultar em grandes amplitudes de oscilação.

Um fator crucial na formação de um padrão regular de vórtices, conhecido como esteira de vórtice é a interação mútua entre as duas camadas de cisalhamento e de separação. Segundo Bearman (1984) um vórtice continua a se desenvolver, alimentado pela circulação em sua camada de cisalhamento conectada, até que se torne suficientemente forte para atrair a camada de cisalhamento oposta através da esteira próxima. A aproximação de vórtices com sinais opostos, em concentração adequada, interrompe o fornecimento adicional de circulação para o vórtice em crescimento, liberando-o e

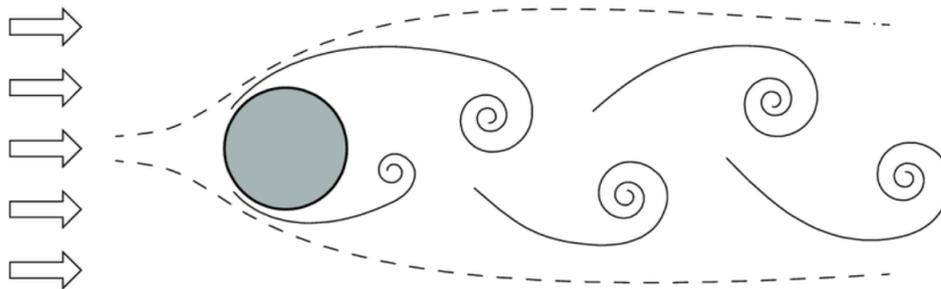
movendo-o para jusante.

Quando um escoamento passa ao redor de um cilindro ou uma estrutura similar, forma-se uma camada limite associada ao corpo ou à estrutura. Hipoteticamente, considera-se que dentro da camada limite ocorre atrito entre o fluido e a parede do cilindro, ou estrutura, pois as partículas de fluido nessa região estão sujeitas a um campo de pressões externo (SUMER et al., 2006).

Com o surgimento do atrito, atua uma força dissipativa que resulta em perda de energia cinética na camada limite. Essa dissipação significativa de energia impede que as partículas do fluido suportem o aumento de pressão associado às linhas de escoamento mais próximas. Esse mecanismo, por sua vez, leva a um movimento contrário ao escoamento, ocasionando a separação da camada limite e o desprendimento de vórtices, assim como a subsequente formação de vórtices (LIE et al., 2007).

A Figura 2.8 ilustra a formação de vórtices em um cilindro de seção circular e a subsequente formação da esteira de vórtices alternados, conhecida como esteira de von Kármán, de forma simplificada.

Figura 2.8 – Emissão de vórtices na esteira



Fonte: Ježov (2013).

O número de Reynolds, Re , tem influência em vários parâmetros adimensionais que caracterizam o escoamento em torno de um cilindro, indicando que mudanças no regime de escoamento ocorrem à medida que este número aumenta. Especificamente, para um cilindro, o número de Reynolds crítico é identificado como 40.

As grandezas adimensionais que descrevem o escoamento em torno de um cilindro circular liso, assim como a emissão de vórtices, dependem do número de Reynolds, Re , do cilindro, como definido pela Equação (2.1):

$$Re = \frac{UD}{\nu} = \frac{\rho UD}{\mu}, \quad (2.1)$$

onde U é a velocidade do escoamento livre, D é o diâmetro do cilindro, ν é a vis-

cosidade cinemática do fluido, ρ é a massa específica do fluido e μ é viscosidade dinâmica.

A Figura 2.9 sintetiza os principais regimes de desprendimento de vórtices observados em um cilindro de superfície lisa, em relação ao número de Reynolds. A formação de vórtices pode resultar em vibrações e movimentos indesejados em corpos, dando origem a fenômenos conhecidos como o VIV e o VIM. A ocorrência desses fenômenos está principalmente relacionada ao número de Reynolds característico do escoamento.

Como mostra a Figura 2.9 a separação no escoamento começa a se manifestar em números de Reynolds maiores que 5. Na faixa de $5 < Re < 40$, um par de vórtices simétricos se forma na esteira e, à medida que o número de Reynolds aumenta, o tamanho desses vórtices também aumenta.

Para números de Reynolds entre 40 e 200, a esteira do vórtice permanece laminar, exibindo desprendimento quase bidimensional. A turbulência de transição dentro da região da esteira começa a aparecer entre os números de Reynolds de 200 e 300, tornando-se totalmente turbulenta quando o número de Reynolds excede 300.

Nesta fase, surge o regime de escoamento subcrítico, caracterizado por uma camada limite laminar até $Re < 3 \times 10^5$. Além deste limite, a camada limite começa a apresentar turbulência crescente com o aumento dos números de Reynolds, com a transição ocorrendo no ponto de separação.

Dentro da faixa de $3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^5$, conhecido como regime crítico, a turbulência dentro da camada limite ocorre no ponto de separação em um lado do cilindro, enquanto o outro lado permanece laminar. Essa assimetria afeta o coeficiente de sustentação ao longo do tempo, cuja média não é mais zero.

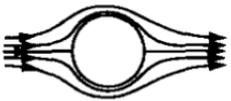
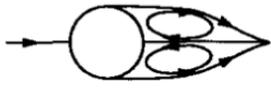
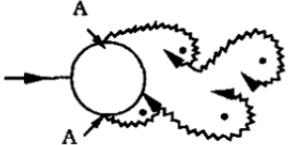
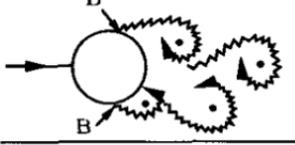
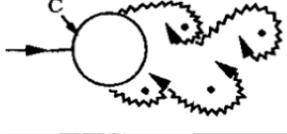
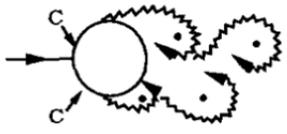
O regime supercrítico abrange números de Reynolds de 3×10^5 a $1,5 \times 10^6$. Aqui, a separação da camada limite é turbulenta em ambos os lados do cilindro, mas ainda não ocorre uma transição completa da camada limite, mantendo uma região de transição entre os pontos de estagnação e de separação da camada limite.

A turbulência completa na camada limite só é alcançada para números de Reynolds maiores que $1,5 \times 10^6$, afetando apenas um lado do cilindro enquanto o outro exibe uma camada limite parcialmente turbulenta e parcialmente laminar. Esta fase, conhecida como regime de transição superior, estende-se até números de Reynolds de 4×10^6 . À medida que o número de Reynolds aumenta ainda mais, o regime transcrito, 4×10^6 , é alcançado, onde a camada limite se torna totalmente turbulenta, marcando um marco significativo na compreensão da dinâmica do escoamento em torno de cilindros.

2.6 NÚMERO DE STROUHAL

A esteira formada pelos vórtices é comumente conhecida como esteira de von Kármán, e a frequência de emissão dos vórtices é caracterizada pelo número de

Figura 2.9 – Regimes de escoamento em torno de um cilindro de seção circular liso em corrente estacionária

a)		<p>No separation. Creeping flow</p> <p>$Re < 5$</p>
b)		<p>A fixed pair of symmetric vortices</p> <p>$5 < Re < 40$</p>
c)		<p>Laminar vortex street</p> <p>$40 < Re < 200$</p>
d)		<p>Transition to turbulence in the wake</p> <p>$200 < Re < 300$</p>
e)		<p>Wake completely turbulent. A: Laminar boundary layer separation</p> <p>$300 < Re < 3 \times 10^5$</p> <p>Subcritical</p>
f)		<p>A: Laminar boundary layer separation B: Turbulent boundary layer separation; but boundary layer laminar</p> <p>$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$</p> <p>Critical (Lower transition)</p>
g)		<p>B: Turbulent boundary layer separation; the boundary layer partly laminar partly turbulent</p> <p>$3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$</p> <p>Supercritical</p>
h)		<p>C: Boundary layer com- pletely turbulent at one side</p> <p>$1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$</p> <p>Upper transition</p>
i)		<p>C: Boundary layer comple- tely turbulent at two sides</p> <p>$4 \times 10^6 < Re$</p> <p>Transcritical</p>

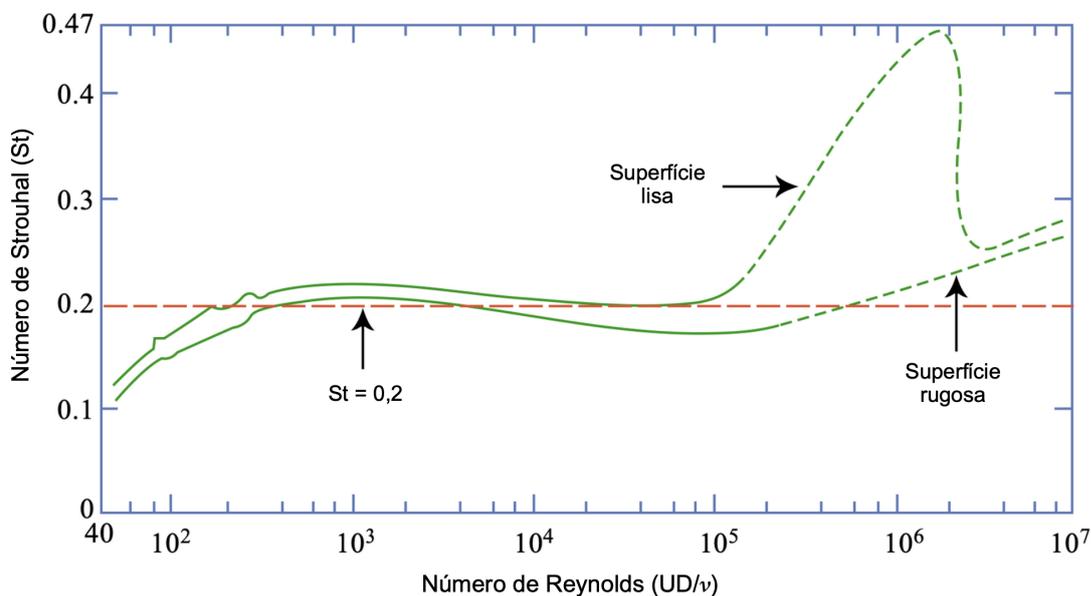
Fonte: Sumer et al. (2006).

Strouhal, *St*. Esse número adimensional relaciona o tempo característico ao período de oscilação, pela seguinte Equação (2.2):

$$f_s = \frac{StU}{D}, \quad (2.2)$$

onde, f_s é a frequência de emissão de vórtices, D é o diâmetro do cilindro e U é a velocidade do escoamento livre. Segundo Blevins (2001), o número de Strouhal varia de acordo com o número de Reynolds, e varia com o mesmo em cada um dos regimes do escoamento ao redor de um cilindro, como mostra a Figura 2.10.

Figura 2.10 – Variação do número de Strouhal em função do número de Reynold



Fonte: Adaptado e traduzido de Blevins (2001).

Na Figura 2.10 observa-se a relação entre o número de Strouhal e o número de Reynolds, que foi estabelecida experimentalmente para um cilindro circular. É importante destacar que o número de Strouhal permanece próximo de 0,2 em uma ampla gama de números de Reynolds. Além disso, reconhece-se que o número de Strouhal também é influenciado por vários outros fatores, incluindo a rugosidade da superfície do cilindro, a intensidade da turbulência no escoamento livre e a razão de aspecto do cilindro (BLEVINS, 2001).

O desprendimento de vórtices de um cilindro começa em um número de Reynolds (Re) de 40, com a frequência de desprendimento normalizada de $St \approx 0,1$. A partir deste ponto, há um aumento gradual no número de Strouhal à medida que o número de Reynolds aumenta, atingindo um valor aproximado de 0,2 em $Re \approx 300$. Posteriormente, o valor de Strouhal permanece praticamente inalterado ao longo do regime subcrítico. É importante reconhecer um aumento acentuado no número de

Strouhal dentro da faixa do número de Reynolds que caracteriza o regime de regime de escoamento crítico (BLEVINS, 2001).

De acordo com a interação das camadas de cisalhamento livres, a formação da esteira é altamente semelhante, independentemente da geometria da estrutura sujeita ao escoamento. Uma sugestão é utilizar a dimensão D como a distância entre os pontos de separação, em vez da largura da seção, permitindo assim estabelecer um número de Strouhal universal para o cilindro de seção circular, aproximadamente igual a 0,2, abrangendo uma ampla faixa de números de Reynolds (BLEVINS, 2001).

2.7 MOVIMENTO INDUZIDO PELO ESCOAMENTO (FIM)

É crucial esclarecer e delimitar o significado desse termo a fim de contextualizar adequadamente o problema em estudo. A expressão FIM é frequentemente encontrada na literatura de dinâmica de fluidos sem uma definição precisa. Comumente, essa expressão é utilizada para descrever as forças resultantes do movimento de um corpo em um fluido.

Segundo Steckley (1989) FIM são aquelas forças hidroaerodinâmicas que surgem devido à movimentação da estrutura em relação a um referencial inercial. Essas forças poderiam ser mais adequadamente denominadas como forças hidroaerodinâmicas associadas ao movimento.

Essa definição não busca ser universal, uma vez que em outras aplicações podem existir diferentes restrições mais ou menos distintas. O termo, conforme utilizado na definição anterior, implica em uma dependência matemática não trivial entre as forças hidroaerodinâmicas e o movimento da estrutura. As forças induzidas pelo movimento podem não estar apenas relacionadas às forças hidroaeroelásticas.

A hidroaeroelasticidade envolve o estudo de fenômenos nos quais há uma interação considerável entre o movimento estrutural do sistema e as forças hidroaerodinâmicas. Sendo assim, é evidente que os fenômenos hidroaeroelásticos estão incontestavelmente relacionados às forças induzidas pelo movimento.

O termo FIM, portanto, não se limita apenas às forças geradas pelo desprendimento de vórtices. Elas podem estar presentes mesmo em uma estrutura estacionária, onde não há movimento, como evidenciado em testes de túnel de vento com modelos rígidos. Por outro lado, o fenômeno de lock-in pode ocorrer quando a estrutura oscila, nesse caso, as forças de desprendimento de vórtices se tornam, pelo menos em parte, forças induzidas pelo movimento. No entanto, as forças estruturais e hidroaerodinâmicas que desempenham um papel importante nos fenômenos hidroaeroelásticos permanecem presentes.

Em uma abordagem mais específica, o fenômeno de FIM representa um fenômeno de grande energia e abrangência. Trata-se de um fenômeno complexo, originado a partir da interação fluido-estrutura, podendo ocorrer em diversas superfícies, tais

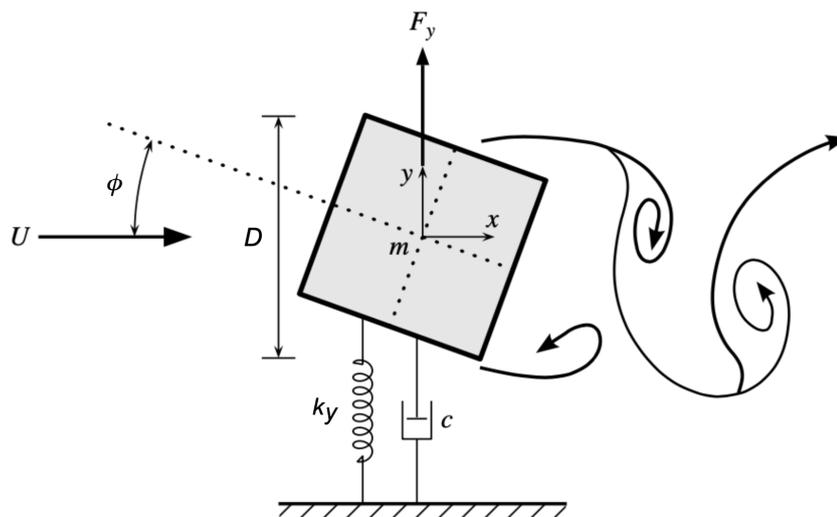
como pontes extensas, plataformas offshore e risers em águas profundas, entre outras.

Há vários fenômenos relacionados às forças induzidas pelo movimento, que são classificados como hidrodinâmicos. Esses fenômenos englobam o desprendimento de VIV, galloping e vibração. Esses exemplos demonstram a diversidade e a complexidade dos efeitos causados pelo FIM, ressaltando a importância de sua compreensão para o desenvolvimento de estruturas mais seguras e eficientes.

A ampla ocorrência e a relevância do FIM em estruturas navais têm despertado um grande interesse nas últimas décadas. Isso levou a extensas investigações com o objetivo de compreender, antecipar e mitigar o FIM em corpos rombudos. Dada a sua poderosa capacidade de causar danos significativos nessas estruturas, é de suma importância realizar estudos aprofundados sobre o FIM.

Este estudo apresenta os resultados de experimentos sobre o escoamento passando por um cilindro de seção quadrada, como mostra a Figura 2.11. Segundo Zhao et al. (2014) essa geometria específica apresenta uma predisposição a dois fenômenos predominantes de FIM: o VIV, que ocorre quando a frequência do desprendimento periódico de vórtices se sincroniza com a frequência de oscilação do corpo; e o Galloping, uma instabilidade hidrodinâmica causada por variações no ângulo de ataque, provocadas pelo movimento do corpo, resultando em forças hidrodinâmicas na mesma direção do deslocamento.

Figura 2.11 – Cilindro de seção transversal quadrada com ângulo de ataque α variável



Fonte: Adaptado de Zhao et al. (2014).

A Figura 2.11 apresenta uma representação esquemática de um cilindro de seção transversal quadrada, submetido a um ângulo de ataque variável, ϕ , e obrigado

a oscilar através de um escoamento. Este diagrama oferece uma visão abrangente dos vários regimes de escoamentos, influenciados tanto pelo ângulo de ataque (ϕ) quanto pela velocidade do escoamento incidente (U).

Considerando a natureza altamente impactante e destrutiva do fenômeno FIM em tais estruturas, é essencial realizar estudos abrangentes, especialmente em relação às suas duas formas distintas: VIM e Galloping. Neste trabalho, nossa ênfase será direcionada especificamente a essas duas formas de FIM.

2.8 MOVIMENTO INDUZIDO POR VÓRTICES (VIM) E VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES (VIV)

As plataformas FOWTs são sistemas flutuantes complexos, com conceitos similares aos das semissubmersíveis. Uma das principais questões a serem consideradas nas plataformas semissubmersíveis e nas FOWTs é o VIM. Essas plataformas são projetadas para condições extremas de ondas, sendo fundamental compreender suas características de movimento nessas situações. Estes são parâmetros importantes para o projeto. Para investigar essas questões, são realizados ensaios com modelos em escala reduzida.

Segundo Liu et al. (2017), a geometria das plataformas semissubmersíveis também é propensa ao VIM, que é ainda mais complexo do que o observado em estruturas monocolunas, como plataformas do tipo spar. No contexto de plataformas multicolunas, o desprendimento de vórtices ocorre em torno de cada coluna, assim, a interação entre os padrões de esteira forma um sofisticado modelo de desprendimento de vórtices. Esta complexidade é influenciada por vários fatores, principalmente o ângulo de ataque com o escoamento incidente.

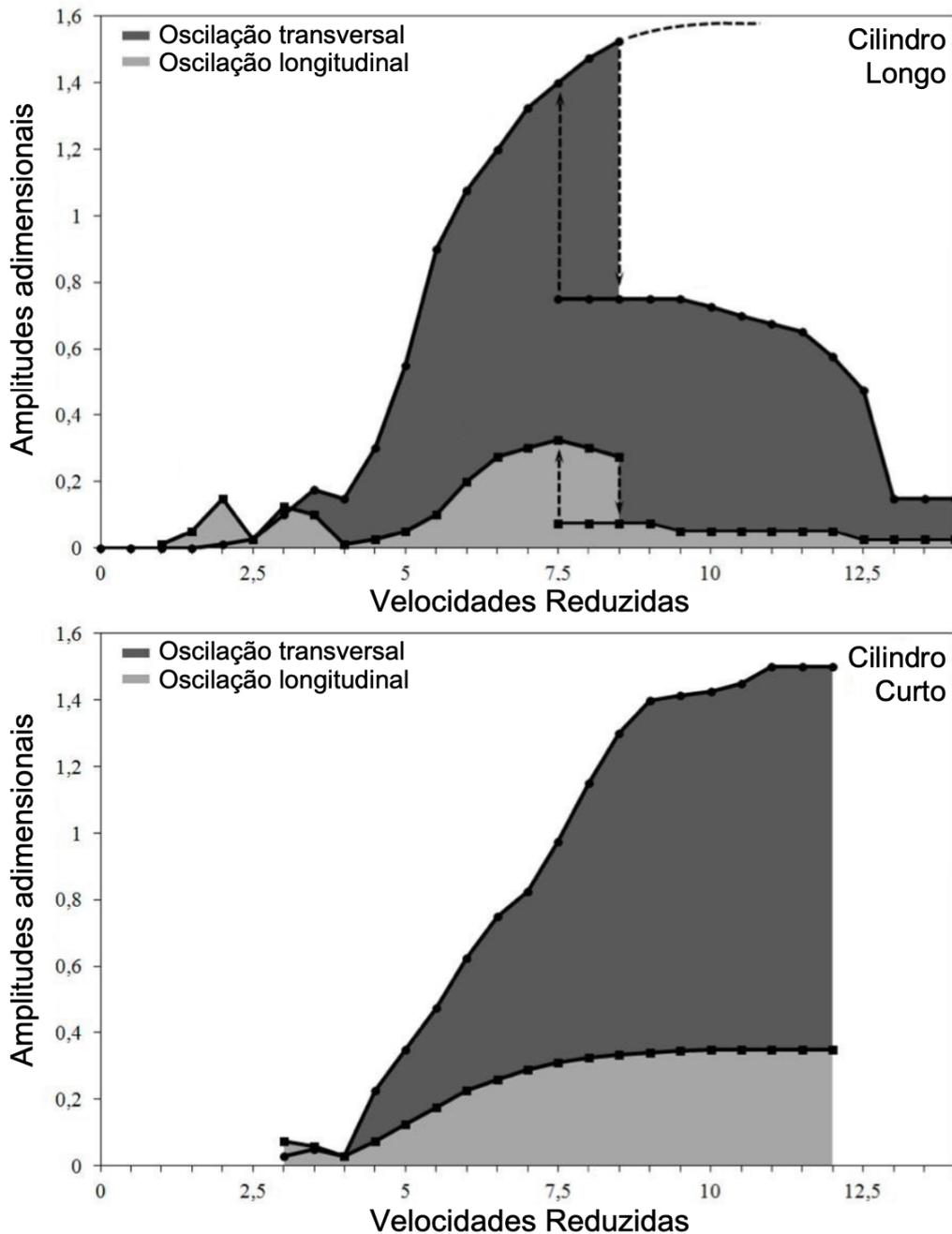
O VIM e VIV são fenômenos que possuem características semelhantes, sendo resultado de um comportamento, autoexcitados e autolimitados, ressonantes originado pela interação entre o fluido e a estrutura. Tanto no caso do VIM quanto no caso do VIV, ocorre um equilíbrio entre a energia fornecida pelo escoamento e a energia dissipada pelo amortecimento presente no sistema, seja ele um cilindro esbelto ou uma unidade flutuante. Esse equilíbrio resulta em uma oscilação autolimitada com amplitude próxima à dimensão da seção transversal da estrutura, que é desencadeada pela frequência de desprendimento de vórtices, aproximadamente igual a uma das frequências naturais envolvidas no sistema (FUJARRA et al., 2012).

De acordo com o estudo realizado por Fujarra et al. (2012), VIM é considerado um caso específico de VIV. A distinção primordial reside na aplicação do termo VIM, que é comumente utilizado para grandes estruturas flutuantes offshore sujeitas a um escoamento, principalmente devido aos períodos de oscilação mais longos, que excedem 10 segundos.

Nesse contexto, observa-se um comportamento auto-excitado e que se caracte-

riza pela sincronização entre a frequência de desprendimento de vórtices e uma das frequências naturais de movimento do sistema. Essa sincronização persiste em uma ampla faixa de velocidades de escoamento, dentro da qual as oscilações transversais e longitudinais podem apresentar diversos ramos de resposta, inter-relacionados entre si, conforme evidenciado na Figura 2.12 (FUJARRA et al., 2012).

Figura 2.12 – Comparação qualitativa entre amplitudes adimensionais em função das velocidades reduzidas



Fonte: Adaptado e traduzido de Fujarra et al. (2012).

Conforme ilustrado na Figura 2.12, o VIM é capaz de gerar amplitudes de resposta que excedem a dimensão da seção transversal do cilindro por um fator de até 1,5. Este fenômeno não depende do comprimento do cilindro, seja ele longo ou curto, apresentando interações significativas com oscilações que ocorrem no sentido longitudinal do escoamento. Além disso, nota-se um aumento na amplitude transversal a partir de uma velocidade reduzida próxima de 4 para cilindros longos e curtos. Essa escalada é atribuída aos fenômenos de sincronização, $f_y \approx f_n \approx f_s$, onde f_y é a frequência transversal ao escoamento incidente, f_x frequência longitudinal ao escoamento incidente e f_s é a frequência de emissão de vórtices.

De acordo com Kaneko et al. (2008) a vibração autoexcitada é um fenômeno que ocorre quando um sistema oscila devido à influência de sua própria fonte de energia, proveniente de seus mecanismos físicos internos. Existem diversos exemplos de fontes de energia que podem desencadear esse tipo de vibração, tais como: escoamento constante, sistema em rotação com velocidade constante e um sistema mecânico sujeito a uma carga externa.

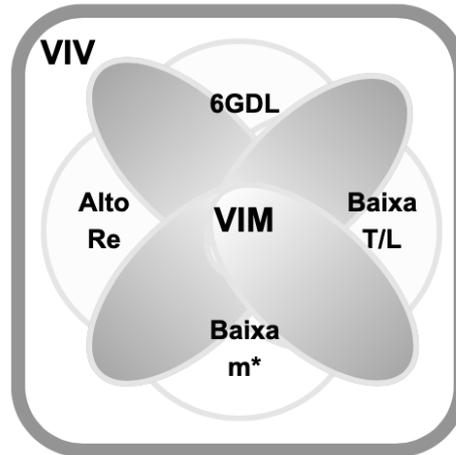
Conforme Figura 2.13, pode-se observar que o VIM, embora seja considerado um caso específico do fenômeno VIV, apresenta características dinâmicas distintas. Essas diferenças são influenciadas por números de Reynolds mais elevados, em pelo menos dois graus de liberdade (2GDL), resultando em oscilações em múltiplos graus de liberdade. Além disso, o VIM exibe características intrínsecas de baixa razão de aspecto (T/L), onde T é o calado e L a largura da face externa do cilindro, que são definidas de forma específica para cada caso de unidade flutuante. Outro aspecto relevante é a razão de massa muito reduzida, que pode ser inferior à unidade em algumas plataformas.

Fazendo referência à Figura 2.13, o VIM surge como um caso particular de VIV, distinguida por seu comportamento dinâmico. Este comportamento é caracterizado por números de Reynolds elevados e oscilações em vários graus de liberdade. Além disso, é marcado pelas baixas razões de aspecto específicas adaptadas ao caso de cada estrutura flutuante e pelas razões de massa pequenas, que, em certas plataformas, podem até ser abaixo de um.

Fujarra et al. (2012) destaca que plataformas monociliunadas em escala real apresentam números de Reynolds superiores a 10^7 na faixa supercrítica ($3,5 \times 10^5 < Re < 1,5 \times 10^6$). Complementarmente, Blevins e Coughran (2009) elucida a correlação direta entre o número de Reynolds e os picos das amplitudes transversais em cilindros, observando uma relação específica para cilindros com razão de massa, $m^* = 5,3$ com números de Reynolds variando de 200 a 100.000.

Roddier, Finnigan e Liapis (2009) forneceu conclusões esclarecedoras de suas investigações sobre modelos de plataforma tipo spar com razões de aspecto (T/L) de 1,7. Eles postularam que experimentos em escala reduzida de estruturas

Figura 2.13 – VIM é um caso particular de VIV em cilindros com baixa relação de aspecto, pequena relação de massa, pelo menos 2GDL e altos números de Reynolds



Fonte: Adaptado e traduzido de Fajarra et al. (2012).

flutuantes oferecem um método confiável para examinar os efeitos do VIM. Além disso, foi identificado que a realização de testes no regime de escoamento subcrítico ($300 < Re < 3 \times 10^5$) é permissível e ligeiramente conservadora, com discrepâncias insignificantes observadas para velocidades reduzidas (V_R) superiores a 7 neste regime.

Quando se busca semelhança entre comportamentos hidrodinâmicos manifestados por modelos em escala reduzida e suas contrapartes em escala real, o número de Reynolds surge como o parâmetro central a ser considerado. No entanto, no contexto de unidades flutuantes sujeitas ao VIM, alcançar a similaridade do número de Reynolds entre o modelo em escala e o sistema real revela-se impraticável.

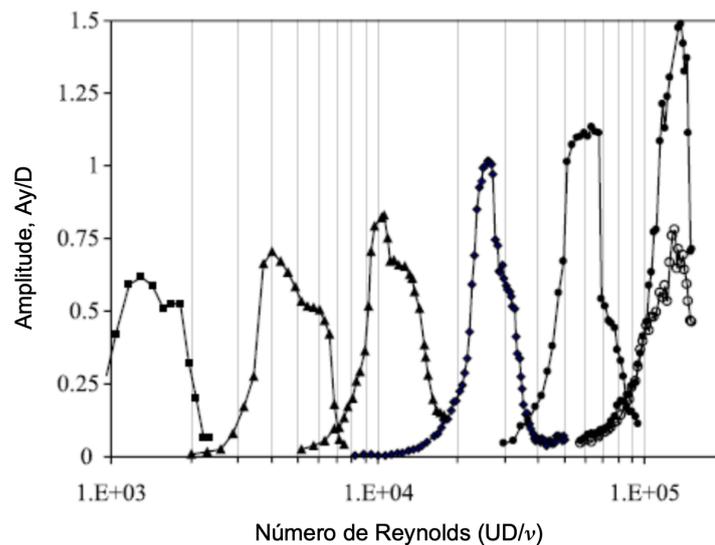
Esta impraticabilidade decorre da necessidade de realizar testes em velocidades proibitivamente altas para alcançar tal similaridade, velocidades que são inviáveis dentro dos limites até mesmo de um tanque de provas. Conseqüentemente, mesmo os experimentos conduzidos em tanques de provas operarão invariavelmente com números de Reynolds inferiores aos observados em condições da vida real.

Na sua publicação, Blevins e Coughran (2009) realizam uma análise detalhada da dinâmica de cilindros elásticos através de uma série de testes experimentais. Os experimentos abrangem uma faixa de números de Reynolds de 170 a 150.000. Este estudo contribui para a criação de um banco de dados sistemático, catalogando respostas unidimensionais e bidimensionais em relação à amplitude, frequência e arrasto, enquanto examina variações nas propriedades do sistema, como coeficientes de amortecimento e razões de massa.

A Figura 2.14 destaca uma descoberta importante sobre o efeito das variações

do número de Reynolds na amplitude de resposta do sistema. Observou-se que um incremento no número de Reynolds leva a um aumento na amplitude da resposta, embora o padrão geral do fenômeno permaneça inalterado.

Figura 2.14 – Amplitudes de resposta transversais em função do número de Reynolds



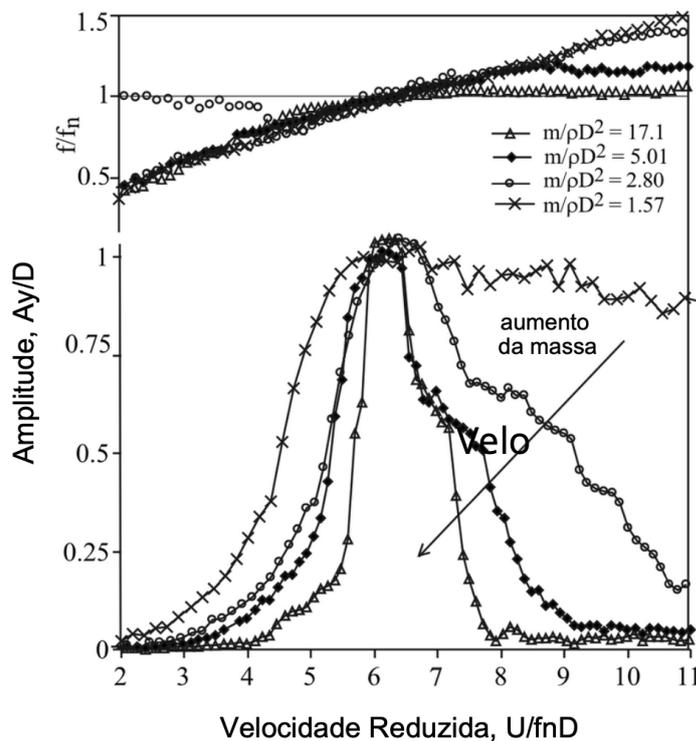
Fonte: Adaptado e traduzido de Blevins e Coughran (2009).

A capacidade de oscilar em múltiplos graus de liberdade desempenha um papel importante na resposta do VIM em unidades flutuantes. No entanto, existem poucas pesquisas específicas sobre esse tema para plataformas, o que resulta em muitas observações baseadas no fenômeno VIV em cilindros com apenas dois graus de liberdade (2GDL). É bem estabelecido que a simples coexistência de oscilações transversais e axiais ao escoamento traz mudanças significativas no comportamento dinâmico (FUJARRA et al., 2012). Portanto, a abordagem fundamental apresentada neste contexto é focada na análise do VIM em cilindros de seção quadrada com 2GDL.

Quando a frequência de despreendimento de vórtices se aproxima da frequência natural da estrutura, surge o fenômeno conhecido como lock-in. Durante esse fenômeno, os deslocamentos experimentam amplificação. Na Figura 2.15 pode-se visualizar o fenômeno de lock-in em um cilindro, ensaiado por Blevins e Coughran (2009), incluindo quatro razões de massa ($m/\rho D^2$), onde m é a massa.

As amplitudes máximas são praticamente idênticas e ocorrem em velocidades reduzidas praticamente iguais, apesar das variações no amortecimento e na massa por um fator de dez. Esses resultados sugerem que a amplitude transversal máxima é exclusivamente influenciada pelo amortecimento reduzido, considerando um número de Reynolds constante.

Figura 2.15 – Resposta transversal do cilindro para massas de quatro cilindros



Fonte: Adaptado e traduzido de Blevins e Coughran (2009).

2.9 GALLOPING

Segundo Blevins (2001) uma estrutura que possui uma seção transversal não simétrica é submetida a uma força do fluido que varia conforme a orientação do escoamento. Conforme a estrutura vibra, sua orientação se altera e a força exercida pelo escoamento oscila. Caso essa força oscilante tenha a tendência de aumentar a vibração, a estrutura se torna hidrodinamicamente instável, o que pode resultar em uma amplitude de vibração muito alta. O galloping é o termo para descrever a instabilidade de estruturas rombudas com algum grau de liberdade sujeitas a ventos e correntes.

Todas as formas geométricas não simétricas estão sujeitas ao galloping. Por exemplo, linhas elétricas que estão cobertas de gelo podem oscilar intensamente durante ventos de inverno. Da mesma forma, os tabuleiros de pontes também podem sofrer galloping. Até mesmo estruturas marinhas podem experimentar esse fenômeno nas correntes oceânicas. Asas também podem tremer devido a essa instabilidade (BLEVINS, 2001).

Segundo Blevins (2001), em estudos sobre galloping, a maioria das análises emprega a abordagem da dinâmica de fluidos quase estacionária. Essa abordagem pressupõe que a força exercida pelo fluido na estrutura é determinada exclusivamente pela velocidade relativa instantânea, permitindo que as forças do fluido sejam avaliadas

por testes em canais utilizando modelos estacionários em diferentes ângulos.

No entanto, é importante ressaltar que essa suposição de quase estacionariedade é válida apenas quando a frequência dos componentes periódicos da força do fluido, relacionados aos efeitos de desprendimento de vórtices ou intervalo de tempo, está consideravelmente acima da frequência de vibração da estrutura em questão ($f_s \gg f_n$). Esse requisito é constantemente satisfeito em velocidades reduzidas mais elevadas, o que implica que (Equação 2.3):

$$\frac{U}{f_n D} > 20, \quad (2.3)$$

onde U é a velocidade do escoamento livre, f_n é a frequência natural de vibração e D é a largura da seção transversal normal ao escoamento livre.

Infelizmente, muitas estruturas de importância prática têm instabilidades semelhantes ao galloping na faixa de velocidades reduzidas $1 < U/(f_n D) < 20$, onde a suposição quase estacionária é questionável.

Na Figura 2.16, pode-se observar um modelo representando um edifício que é sustentado por uma mola e está exposto a um escoamento de velocidade e densidade constantes. Essa mola possui uma rigidez por unidade de comprimento. Nesse contexto, é importante mencionar as forças dinâmicas do escoamento que atuam constantemente na seção, as quais são a força de sustentação (Equação 2.4) e a força de arrasto por unidade de comprimento (Equação 2.5):

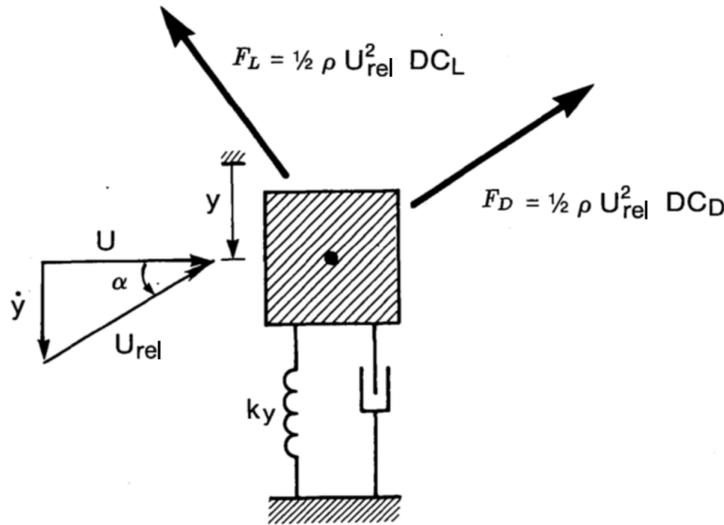
$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_L \quad (2.4)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_D \quad (2.5)$$

A força de sustentação exerce sua ação perpendicularmente ao escoamento médio, enquanto a força de arrasto é a componente da força que atua paralelamente a esse escoamento médio. Para uma análise mais aprofundada, a largura D é uma dimensão que é tomada como referência para a adimensionalização dos coeficientes hidroaerodinâmicos de sustentação (C_L) e arrasto (C_D).

A figura 2.16 ilustra um objeto de formato arbitrário submetido a um escoamento com velocidade uniforme U e massa específica ρ , suportado por uma mola com rigidez k_y . A investigação da estabilidade do modelo apresentado na Figura 2.16 envolve a formulação de um modelo de força hidroaerodinâmica quase estacionário, seguido pela avaliação do seu comportamento sob pequenas perturbações de equilíbrio. No

Figura 2.16 – Modelo de galloping com um grau de liberdade. O escoamento permanente é horizontal com magnitude U



Fonte: Blevins (2001).

cenário onde o modelo se desloca na direção positiva do eixo, o ângulo do escoamento em relação ao modelo é descrito como (Equação 2.6):

$$\phi = \arctan \frac{\dot{y}}{U}, \quad (2.6)$$

onde ϕ é o ângulo de ataque, \dot{y} é a velocidade vertical e U é a velocidade do escoamento. Aqui $\phi = 0$ foi referenciado a posição de equilíbrio $\dot{y} = 0$. A convenção de sinais é usada para ϕ e \dot{y} . Girar o modelo no sentido horário em um escoamento da esquerda para a direita aumenta o ângulo de ataque. A velocidade vertical \dot{y} é positiva para baixo.

É comum que a força exercida pelo escoamento seja medida em diferentes ângulos de ataque em um canal de teste, sendo posteriormente resolvida em coeficientes de sustentação e arrasto utilizando as Equações 2.4 e 2.5, respectivamente. Essa abordagem permite uma compreensão mais precisa e quantitativa das características hidrodinâmicas do sistema em estudo.

O módulo da velocidade relativa do fluido para o modelo é dada pela resultante entre a velocidade vertical e a velocidade do escoamento livre (Equação 2.7):

$$U_{rel}^2 = \dot{y}^2 + U^2 \quad (2.7)$$

A força resultante na direção vertical do movimento do corpo, F_y , é dada pela

soma das componentes das forças de sustentação e arrasto no plano vertical, positivo para baixo (Equação 2.8):

$$F_y = F_L \cos\phi - F_D \sin\phi = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_y \quad (2.8)$$

Onde o coeficiente de força vertical é (Equação 2.9):

$$C_y = -\frac{U_{rel}^2}{U^2} (C_L \cos\phi + C_D \sin\phi) \quad (2.9)$$

C_y , como C_L e C_D , é uma função da forma, ângulo de ataque e número de Reynolds.

Em ângulo de ataque zero ($\phi = 0$) o coeficiente de força vertical é o negativo do coeficiente de sustentação $C_y = -C_L$, pois a força vertical é definida positiva para baixo e a sustentação é positivo para cima.

A componente oscilatória pode apresentar um aumento ao longo do tempo, indicativo de vibração instável, ou uma diminuição, sinalizando vibração estável, dependendo do sinal do coeficiente de amortecimento líquido, ζ . As vibrações serão atenuadas ao longo do tempo para todos os ângulos de ataque onde a condição $\zeta > 0$ for atendida, especificamente se a inclinação do coeficiente de força vertical for negativa. Portanto, o modelo será estável se (Equação 2.10):

$$\frac{\partial C_y}{\partial \phi} < 0, \quad \text{ou equivalentemente} \quad \frac{\partial C_L}{\partial \phi} + C_D > 0, \quad \text{para estabilidade,} \quad (2.10)$$

e potencialmente instável sob diferentes condições. Uma seção só pode se tornar instável em na decendente o coeficiente de sustentação diminuir a uma taxa que ultrapasse o coeficiente de arrasto à medida que o ângulo de ataque aumenta, conforme a Figura 2.17.

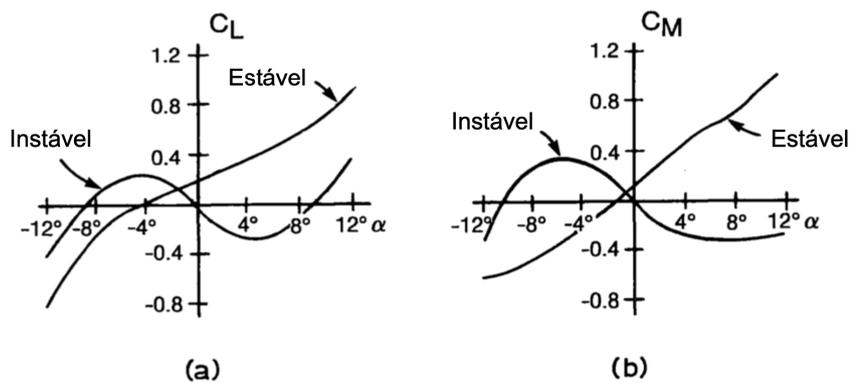
As seções que não são circulares exibirão faixas ϕ onde $\partial C_y / \partial \phi > 0$ onde a condição é atendida e tais seções podem ser potencialmente instáveis. A instabilidade surgirá se ζ passar de zero e se tornar negativa. Ao definir ζ como zero, a velocidade crítica para o início da instabilidade do galloping é determinada como instável (Equação 2.11).

$$\frac{\partial U_{crit}}{f_y D} = \frac{4m(2\pi\zeta)}{\rho D^2} / \frac{\partial C_y}{\partial \phi}, \quad (2.11)$$

onde f_y é a frequência natural do plano em hertz e ζ é o fator de amortecimento.

Contudo, na maior parte, a magnitude do valor $\partial C_y / \partial \phi$ dentro da faixa instável não é significativa. Esta observação, juntamente com a rigidez relativamente alta (proporcional ao $f_y m$) das estruturas mais comuns, como edifícios e vigas, resulta em uma

Figura 2.17 – Seções estáveis e potencialmente instáveis ao galloping: (a) sustentação; (b) momento



Fonte: Traduzido de Blevins (2001).

alta velocidade limite para o início do galloping (Equação 2.11). Isto explica por que estruturas principalmente leves, minimamente amortecidas e flexíveis, incluindo sinalização, chaminés, torres, tabuleiros de pontes suspensas e linhas de energia cobertas de gelo, são propensas a galopar com ventos fortes.

A Figura 2.18 mostra a inclinação dos coeficientes de força vertical para diversas seções. Um amplo espectro de seções, abrangendo perfis quadrados, retangulares, em ângulo reto, seção D , canais, octogonais, poligonais, aerofólios estagnados, seção H e irregulares, são suscetíveis à instabilidade e têm sido associados a desafios práticos de galloping.

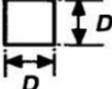
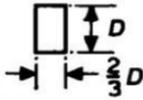
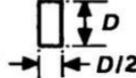
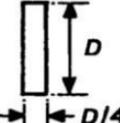
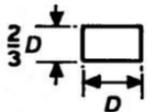
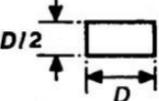
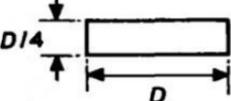
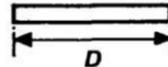
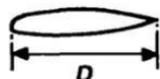
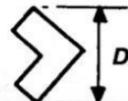
Observa-se que uma parcela predominante das estruturas possui capacidade de movimento translacional. Tal movimento está intrinsecamente ligado através do acoplamento hidroaerodinâmico, que é significativamente influenciado pelo ângulo de incidência. Além disso, o fenômeno do movimento pode sofrer acoplamento inercial nos casos em que o eixo elástico da área da seção transversal não consegue alinhar-se com o centro de massa da estrutura.

No presente estudo, a estrutura é dotada de dois graus de liberdade, permitindo que ela se mova tanto na direção do escoamento quanto perpendicular ao escoamento. Esta mobilidade de eixo duplo é essencial para a compreensão da resposta do FIM sob diversas condições de dinâmica de fluidos, destacando a intrincada interação entre as forças dos fluidos e as respostas estruturais.

A principal restrição na teoria do galloping articulada até agora reside na suposição de que os coeficientes hidroaerodinâmicos variam apenas com o ângulo de incidência. No entanto, a evidência empírica sugere que estes coeficientes são significativamente influenciados pela turbulência e pela esteira de vórtices.

Segundo Blevins (2001) uma investigação revelou que a turbulência, em média, pode mitigar ou exacerbar a propensão para a instabilidade de galloping em seções

Figura 2.18 – Inclinação dos coeficientes de força vertical para diversas seções

Seção	$\partial C_y / \partial \phi$		Número de Reynolds
	Escoamento Laminar	Escoamento Turbulento	
	3.0	3.5	10^5
	0.	-0.7	10^5
	-0.5	0.2	10^5
	-0.15	0.	10^5
	1.3	1.2	66 000
	2.8	-2.0	33 000
	-10.	—	2 000–20 000
	-6.3	-6.3	$>10^3$
	-6.3	-6.3	$>10^3$
	-0.1	0.	66 000
	-0.5	2.9	51 000
	0.66	—	75 000

Fonte: Traduzido de Blevins (2001).

rombudas. Esta visão sublinha a complexidade das interações hidroaerodinâmicas e destaca a necessidade de considerar um espectro mais amplo de fatores além do ângulo de ataque ao analisar fenômenos de galloping.

A suposição quase estacionária empregada dentro da estrutura da teoria do galloping (conforme referenciado na Equação 2.7) exige que a frequência de des-

prendimento de vórtices supere significativamente a frequência natural da estrutura, garantindo que o fluido possa reagir rapidamente a quaisquer movimentos estruturais. Através de medições de vibração forçada realizadas em seções quadradas e retangulares, Bearman et al. (1987) deduziram que o parâmetro de velocidade reduzida ($U/f_n D$), onde D representa a dimensão característica do corpo devido ao ângulo de ataque e f_n a frequência natural do sistema, deve exceder 20. Além disso, concluíram que a amplitude de vibração não deve ultrapassar 0,1 a 0,2 vezes a altura da seção (D) para que a teoria quase estacionária seja aplicável.

Este sistema aplica forças de vórtice que são sincronizadas, mas não em fase, do movimento (BEARMAN et al., 1987). Esses sistemas de vórtices duplos podem coexistir e fundir-se em um único sistema em ressonância com o desprendimento natural do vórtice. Tanto o desprendimento de vórtices quanto o galloping podem induzir vibrações em seções quadradas, seções retangulares, seções anguladas, tabuleiros de pontes e hidroaerofólios estolados.

Essas estruturas respondem ao desprendimento de vórtices próximo à ressonância do vórtice, onde $U/f_n D = 5$, e ao galloping clássico em velocidades reduzidas mais altas, $U/f_n D > 20$. O início do galloping pode ser levado até ou abaixo da ressonância de desprendimento do vórtice reduzindo o amortecimento. Segundo Blevins (2001) o método mais confiável para explicar os efeitos de vórtices instáveis e acoplados em seções não circulares é dimensionar a partir de resultados de testes em modelos ou estruturas comparáveis.

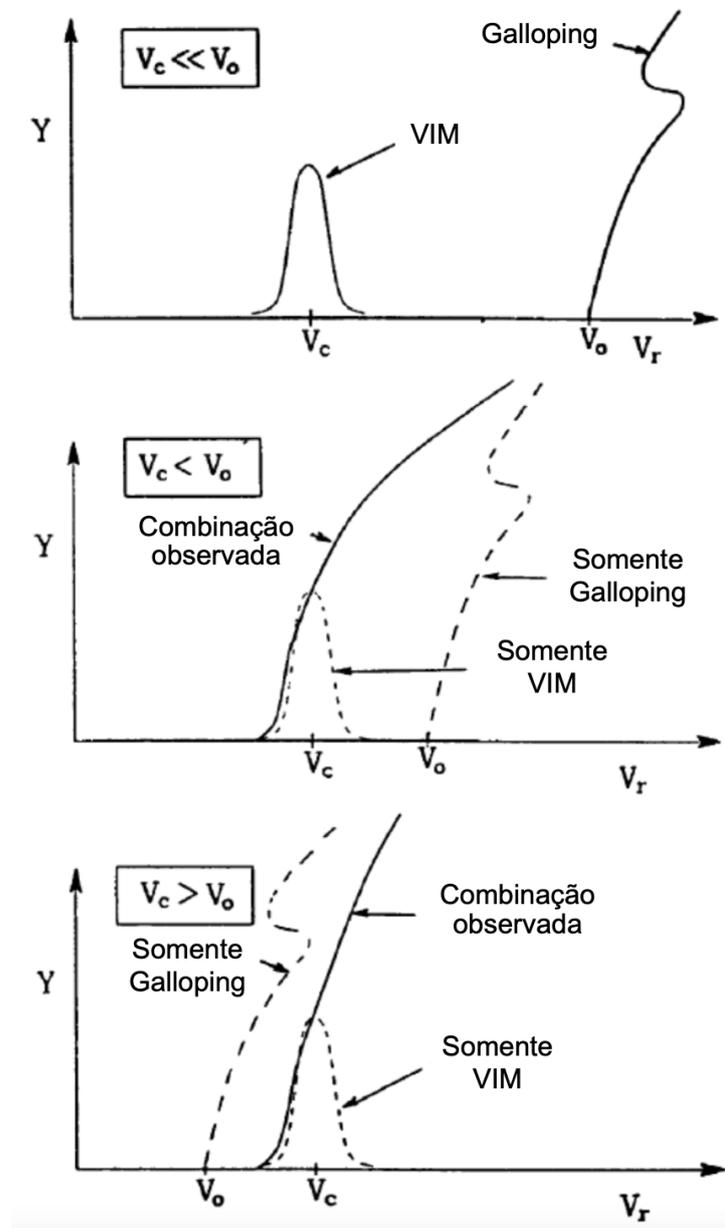
2.10 MOVIMENTO INDUZIDO POR VÓRTICES (VIM) E GALLOPING

Existem inúmeras variedades de interação fluido-estrutura, cada uma ligada a um fenômeno dinâmico de fluido específico ou combinações dos mesmos, e podem ser categorizadas com base em suas características inerentes. Ao contrário do VIM, uma vez iniciado o galloping, suas amplitudes de oscilação podem aumentar indefinidamente à medida que a velocidade do escoamento aumenta, atingindo potencialmente até dez vezes o valor da dimensão característica da seção transversal.

A ocorrência simultânea de galloping e VIM introduz uma camada adicional de complexidade aos problemas de interação fluido-estrutura. Este cenário se desenrola quando a velocidade do escoamento (U) se alinha de tal forma que a frequência de desprendimento de vórtices se aproxima da frequência natural da estrutura, enquanto, ao mesmo tempo, as forças dinâmicas dos fluidos desenvolvem um componente de magnitude suficiente e oposição de fase à velocidade, facilitando a diminuição do efeito dissipativo da estrutura.

A Figura 2.19 mostra o mecanismo de interação entre o fenômeno VIM, com a velocidade típica de desprendimento de vórtices (V_c) associada ao pico ressonante, e o galloping, iniciado em uma velocidade de disparo do galloping (V_0).

Figura 2.19 – Representação da interação do Galloping e do VIM



Fonte: Adaptado e traduzido de AMATO (2009).

Como mencionado anteriormente, a teoria quase estacionária aplica-se apenas nos casos em que a frequência de excitação da força do fluido excede em muito a frequência natural de oscilação do corpo. Portanto, observa-se que quando a velocidade do início do galloping é próxima ou menor que a velocidade crítica do VIM, $V_0 < V_c$, surge uma resposta combinada, aumentando significativamente as amplitudes da velocidade de início do VIM. Esta teoria de combinação quase estacionária deixa de ser aplicada quando $V_0 \gg V_c$.

2.11 GRANDEZAS ADIMENSIONAIS

De acordo com Sumer et al. (2006) é benéfico adimensionalizar parâmetros, para facilitar comparações entre resultados, independentemente das condições de simulação. Variáveis adimensionais carregam significado físico que delinea propriedades específicas do sistema, apoiando a análise das características do escoamento e das respostas hidrodinâmicas do corpo.

Algumas definições adimensionais são muito utilizadas. A seguir, oito definições serão apresentadas, conforme Williamson e Govardhan (2004).

A massa reduzida é um parâmetro crítico nas análises 2GDL, dado o impacto substancial da massa estrutural do corpo nas respostas dinâmicas do sistema. A massa reduzida, m^* , correlaciona a massa da estrutura, m_{est} , com a massa do fluido deslocado pelo corpo, m_f , e é definida conforme a Equação 2.12.

$$m^* = \frac{m_{est}}{m_f} \quad (2.12)$$

A velocidade reduzida (ou razão de velocidade), V_R , é definida como razão entre a velocidade do escoamento pelo produto entre a frequência natural do sistema e a dimensão característica do corpo devido ao ângulo de ataque, conforme a Equação 2.13.

$$V_R = \frac{U}{f_n D} \quad (2.13)$$

A amplitude de deslocamento transversal (A_y) do corpo é definido pela razão entre o deslocamento máximo do movimento transversal, y_{max} , e a dimensão característica do cilindro devido ao ângulo de ataque (D), conforme definido na Equação 2.14.

$$A_y = \frac{y_{max}}{D} \quad (2.14)$$

A amplitude de deslocamento do corpo na direção longitudinal do escoamento é definido pela razão entre o valor da raiz quadrada média (RMS) do movimento na direção longitudinal do escoamento, x_{rms} , e o comprimento característico do cilindro, conforme descrito na Equação 2.15 (BLEVINS, 2001). Este estudo empregará o valor RMS para deslocamento na direção longitudinal do escoamento, em vez de sua amplitude máxima, para comparação com a literatura existente, já que os valores de x_{rms} são relatados com mais prevalência (Equação 2.15).

$$A_x = \frac{x_{rms}}{D} \quad (2.15)$$

A razão de frequência é definida como a razão entre a frequência de vibração (f) pela frequência natural do sistema (f_n), conforme Equação 2.16.

$$f^* = \frac{f}{f_n} \quad (2.16)$$

A razão de sustentação (ou coeficiente de sustentação), C_L , é definida como a razão entre a força de sustentação (F_L) pelo produto da pressão dinâmica (p_d) com a área projetada (A_p). F_L é formada pelas componentes na direção normal que constituem a força de sustentação (Equação 2.17).

$$C_L = \frac{F_L}{p_d A_p} = \frac{F_L}{1/2 \rho U^2 A_p} = \frac{F_L}{1/2 \rho U^2 DL} \quad (2.17)$$

A razão de arrasto (ou coeficiente de arrasto), C_D , é definida como a razão entre a força normal (F_D) pelo produto da pressão dinâmica (p_d) com a área projetada (A_p). F_D é formada pelas componentes de pressão e de cisalhamento na parede, na direção do escoamento (Equação 2.18).

$$C_D = \frac{F_D}{p_d A_p} = \frac{F_x}{1/2 \rho U^2 A_p} = \frac{F_x}{1/2 \rho U^2 DL} \quad (2.18)$$

O fator de amortecimento (ou razão de amortecimento), ζ , é definido como a razão entre o amortecimento estrutural (c) pelo produto do número inteiro positivo dois (2) com a raiz quadrada da constante de rigidez elástica da mola (k_y) que multiplica a massa equivalente do sistema (M). M é a adição entre a massa da estrutura (m_{est}) com a massa adicional (m_a) (Equação 2.19).

$$\zeta = \frac{c}{2(m_{est} + m_a)\omega_n} = \frac{c}{2\sqrt{k_y M}} = \frac{c}{2\sqrt{k_y(m_{est} + m_a)}} \quad (2.19)$$

Verifica-se que o fator de amortecimento é proporcional ao amortecimento estrutural, inversamente à frequência angular natural (ω_n) e inversamente proporcional à raiz quadrada da constante de rigidez elástica da mola. A rigidez elástica das molas é calculada com base na frequência natural de vibração do corpo, conforme definição de frequência angular natural (Equação 2.20).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_y}{M}} = \sqrt{\frac{k_y}{m_{est} + m_a}} \quad (2.20)$$

Verifica-se que o fator de amortecimento depende da constante de rigidez elástica da mola, que de acordo com a teoria da elasticidade, é proporcional ao módulo de elasticidade.

2.12 ESTADO DA ARTE

Nos primeiros anos da década de 1970, o meio acadêmico foi apresentado ao estudo de FIM por meio de duas conferências inovadoras. Estas reuniões foram lideradas pelo Professor Naudascher da Universidade Alemã de Karlsruhe, tendo lugar em 1972 e 1979. Estas conferências lançam luz sobre a extensa gama de questões práticas decorrentes de FIM e acústica em vários domínios industriais, tais como sistemas mecânicos, engenharia civil, aeroespacial, operações marítimas e produção de energia nuclear. A conferência de 1979 foi particularmente notável por apresentar uma infinidade de ideias inovadoras que mantiveram a sua importância e continuam a sustentar a literatura clássica sobre o assunto (NAKAMURA et al., 2013).

Blevins e Iwan (1974) exploraram a dinâmica do galloping dentro de um sistema com 2GDL através da aplicação de métodos assintóticos, visando estabelecer soluções quase exatas em uma condição de estado estacionário. Eles demonstraram exemplos do comportamento do fenômeno do galloping para um segmento específico, tanto quando as frequências eram harmonicamente distintas quanto quando as frequências se aproximavam de um múltiplo integral uma da outra. Os resultados da sua avaliação analítica preliminar foram então avaliados em relação aos dados experimentais e numéricos.

Robert Blevins fez uma contribuição decisiva para o campo em 1977, ao cunhar o termo FIM e ao escrever o livro seminal sobre o assunto (BLEVINS, 2001). Este livro serviu como um marco crucial na delimitação do FIM em duas categorias fundamentais de escoamento: estável e instável. Blevins explorou ainda mais esse domínio em seu trabalho subsequente Blevins e Plunkett (1980), concentrando-se nas frequências e modos vibracionais relevantes para sistemas fluidos e estruturais no contexto da FIM.

Bearman et al. (1987) forneceu uma revisão abrangente da literatura essencial sobre o tema da liberação de vórtices de corpos oscilantes. Ele descreveu um corpo rombudo como aquele que, quando submerso em um escoamento, induz separação em uma porção significativa de sua superfície e também destacou a intrincada relação entre V_R e amplitude de movimento. Estes conceitos são cruciais para a compreensão do fenômeno vibratório, especialmente prevalente em estruturas flutuantes offshore.

Bearman et al. (1987) exploraram o comportamento de uma estrutura longa e elástica com uma seção transversal rombuda, que tem o potencial de exibir galloping ou VIV quando exposta ao escoamento perpendicular ao seu eixo. Tal estrutura, quando minimamente amortecida, também pode sofrer oscilações de grande amplitude que derivam de ambos os mecanismos mencionados, mas não pode ser deduzida apenas a partir dos dados relativos a qualquer um dos mecanismos isoladamente.

Em seus estudos experimentais, Bearman et al. (1987) mediram todos os parâmetros relevantes para as estruturas teóricas de oscilações induzidas por vórtices e de galloping. Eles então analisaram os fenômenos registrados, considerando a compreen-

são fundamental desses dois tipos primários de oscilação e avaliando a aplicabilidade e o potencial dos modelos teóricos existentes.

Embora o estudo do VIM e do galloping tenha ganhado destaque recentemente, particularmente com o uso de cilindros de seção quadrada com baixa razão de aspecto livres para oscilar, a literatura ainda apresenta uma escassez de trabalhos experimentais nesta área. Notavelmente, Nemes et al. (2012) exploraram o impacto do ângulo de ataque na vibração no sentido transversal do escoamento de cilindros de seção quadrada. Suas descobertas indicaram que em ângulos de ataque específicos, onde o cilindro está simetricamente alinhado com o escoamento, o VIM e o galloping agem de forma independente.

Porém, quando essa simetria é alterada, observa-se uma resposta combinada, com amplitudes superando os efeitos individuais de cada fenômeno em velocidades comparáveis. Além disso, à medida que a velocidade aumenta, a frequência de resposta diverge em ramos distintos, levando a oscilações dessincronizadas em velocidades elevadas. A transição entre VIM e galloping foi observada dentro de uma gama limitada de ângulos.

No domínio das interações fluido-estrutura, com foco em FIM, um corpo considerável de pesquisas utilizou predominantemente experimentos em túneis de vento para análise experimental. No entanto, as investigações sobre a influência da razão de aspecto (T/L) e de baixos números de Reynolds (Re) utilizando Canal de Água Circulante (CAC) são notavelmente menos comuns.

Foi Gonçalves et al. (2015) quem inicialmente traçou a relação entre amplitudes e frequências de oscilação com velocidades reduzidas variadas, $1,5 \leq V_R \leq 14$ e razões de aspecto, $0,2 \leq T/L \leq 2$, através de experimentação em um CAC. Este estudo destacou ainda que cilindros capazes de oscilar livremente com 2GDL exibiam movimentos oscilatórios quando a razão T/L cai abaixo de um valor crítico (T/L_{cr}), e observou-se que a amplitude dessas oscilações tendia a diminuir à medida que a razão foi reduzida. Segundo Sakamoto e Arie (1983) pode-se definir um valor crítico de $T/L_{cr} \cong 2$, segundo o qual o modelo de escoamento a jusante de um cilindro rígido e fixo pode mudar drasticamente.

A necessidade de metodologias uniformes e universalmente adotadas para lidar com o fenômeno FIM é fundamental para salvaguardar a integridade estrutural dos projetos atuais e futuros de flutuadores na indústria. Nas últimas décadas, uma combinação de estudos experimentais e computacionais foi realizada para aprofundar a dinâmica das respostas ao FIM.

O rico repositório de conhecimentos práticos obtidos na indústria do petróleo e do gás deverá ser avaliado criticamente, adaptado e expandido no florescente campo das energias renováveis. Atualmente, parece haver uma lacuna notável na pesquisa experimental visando especificamente o comportamento do FIM em cilindros de se-

ção quadrada com 2GDL, particularmente para estudos em escoamentos com baixos números de Reynolds.

Impulsionado pelo aumento das atividades de pesquisa na última década, este trabalho visa fornecer uma revisão de estudos significativos de FIM, enfatizando particularmente configurações envolvendo cilindros de três ou quatro seções quadradas e SSP e FOWTs. Para conseguir isso, foi realizada uma extensa revisão da literatura, pesquisando em bases de dados da ScienceDirect e Scopus um conjunto de palavras-chave que incluía FIM, VIM, galloping, configurações de três ou quatro cilindros de seção quadrada, baixo Reynolds números e estudos experimentais. A Tabela 2.1 enumera os artigos identificados na revisão de literatura.

Tabela 2.1 – Artigo, Número de cilindros do arranjo, Número de Reynolds, Re e Ângulo de Ataque, ϕ

Artigo	Arranjo	S/L	Re	ϕ
Chen e Chen (2016)	4	4	–	45
Liang et al. (2017)	4	3,72	$2 \times 10^4 - 10^5$	0 e 45
Zhang et al. (2017)	4	4	$16 \times 10^3 - 37 \times 10^3$	0, 15, 22,5 e 45
Gonçalves et al. (2020a)	4	2, 3 e 4	$10^3 - 110 \times 10^3$	0 e 45
Gonçalves et al. (2020b)	3	2, 3 e 4	$10^3 - 110 \times 10^3$	0, 90 e 180
Bruner et al. (2023)	3 e 4	2, 3 e 4	598 – 1318	0, 45, 90 e 180

Fonte: Autora (2024).

Este trabalho procura amalgamar e destilar a essência da investigação focada na dinâmica do FIM em configurações de três ou quatro cilindros, com particular interesse nas suas amplitudes e frequências de resposta. Apesar de uma pesquisa bibliográfica ampla empregando as palavras-chave acima mencionadas, esta exploração não revelou quaisquer estudos abordando matrizes ultra-reduzidas de três e quatro cilindros dentro da faixa específica de números de Reynolds desta investigação. Assim, pode-se inferir que este estudo contribui com uma perspectiva única ou potencialmente original sobre o assunto.

2.12.1 Trabalho de Chen e Chen (2016)

Este estudo, com foco em FIM em arranjos de cilindros de seção quadrada, foi realizado por meio de simulações numéricas. O estudo se concentra em uma estrutura semissubmersível de calado profundo com quatro cilindros de seção quadrada, sujeita a correntes transversais em um ângulo de 45 graus. As simulações abrangem uma faixa de velocidades que correspondem a velocidades reduzidas, V_R de 4 a 20, conduzidas tanto para um protótipo em escala real quanto para um modelo em escala 1 : 70.

A investigação emprega três geometrias de canto distintas em suas simulações,

revelando uma notável sensibilidade dos resultados ao efeito de arredondamento dos cantos dos cilindros. Em geral, simulações e dados experimentais convergem para um pico característico na amplitude transversal dentro da faixa V_R de 6 a 7, com um alto grau de concordância entre o modelo e as simulações em escala real. Um valor discrepante é observado em $V_R = 6$ para o semissubmersível com cantos significativamente arredondados, onde a amplitude de oscilação em escala total ultrapassa a do modelo em aproximadamente 13%, possivelmente destacando uma natureza caótica de força/momento e interações de movimentos, em vez dos efeitos de escala.

As simulações são caracterizadas por um sistema de amarração rígido contra guinada, levando predominantemente a movimentos de 2GDL em deriva (sway) e avanço (surge). Esta dinâmica é capturada nos gráficos de trajetória, que também revelam uma sincronia entre o desprendimento de vórtices e o período natural de deriva, observável até uma velocidade reduzida de 20.

O foco principal em dois graus de liberdade em deriva e avanço nas simulações VIM é ainda ilustrado através dos gráficos de trajetória do centro de gravidade, como visto nas Figuras 2.20. Essas figuras diferenciam o semissubmersível em escala real e seu modelo em escala reduzida reduzida, no arranjo de seção quadrada e no arranjo com cantos mais arredondados.

As comparações de trajetórias entre as escalas completa e de modelo geralmente mostram alta similaridade. Notavelmente, para o semissubmersível com cantos mais arredondados, o modelo em escala real exibe trajetórias mais estreitas, indicando uma sincronização mais eficiente entre movimentos em linha e transversais e uma estabilização acelerada para comportamentos de resposta médios.

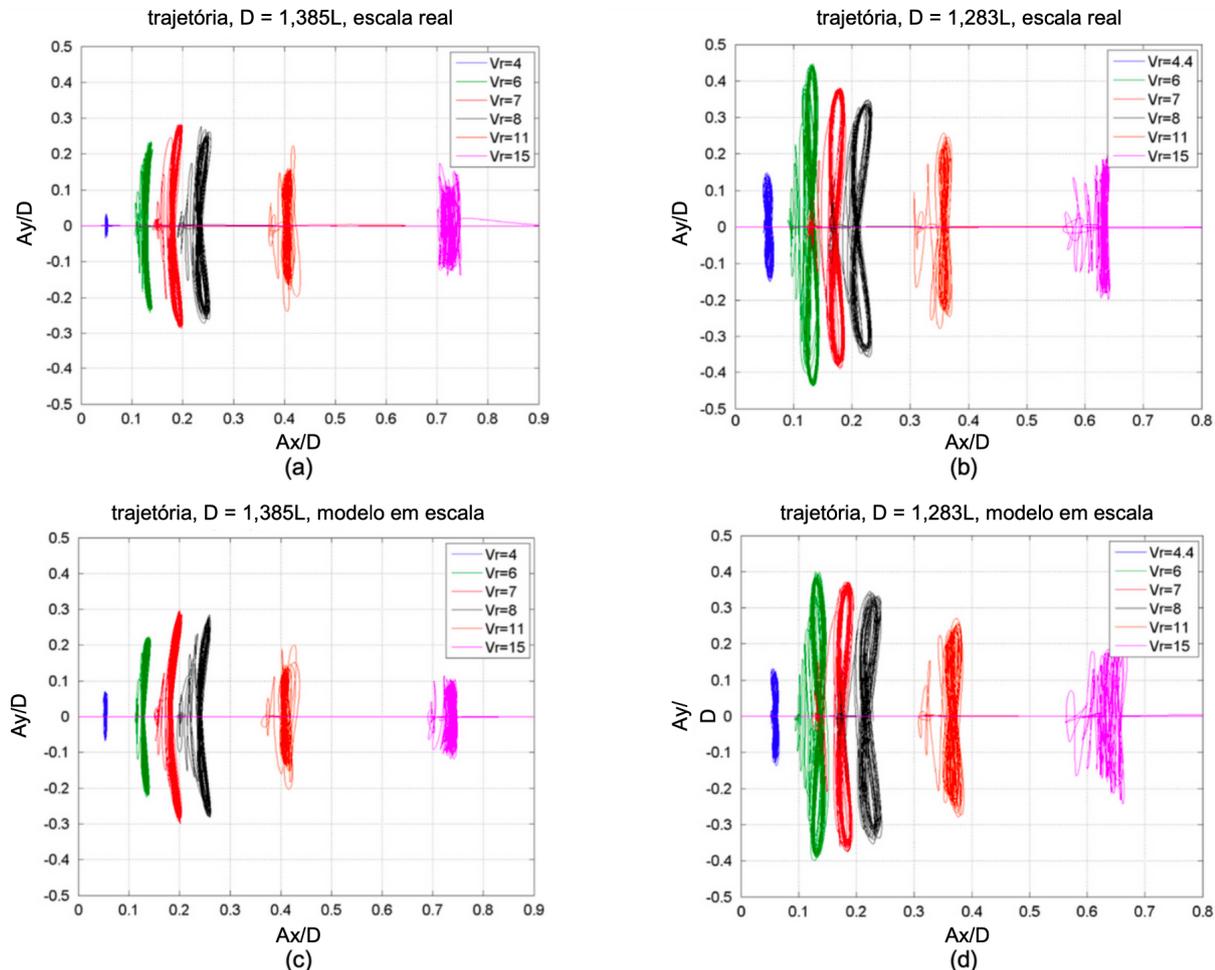
2.12.2 Trabalho de Liang et al. (2017)

Neste trabalho uma investigação sobre VIM de uma SSP de calado profundo foi conduzida através de meios experimentais dentro de um ambiente de tanque de reboque, com o objetivo de explorar de forma abrangente a influência do VIM no comportamento hidrodinâmico da estrutura. Simulações numéricas investigaram os fenômenos de desprendimento de vórtices e suas intrincadas interações através dos múltiplos cilindros da estrutura.

As medições desses experimentos cobriram movimentos no plano horizontal, incluindo movimentos transversais e longitudinais ao escoamento, bem como movimentos de guinada (yaw), juntamente com as forças de arrasto e sustentação na SSP. Posteriormente, uma análise espectral baseada no histórico de tempo registrado foi realizada para compreender melhor essa dinâmica.

A investigação revelou que para duas incidências de escoamento específicas, a SSP exibe comportamento de VIM dentro de uma faixa de $4,0 \leq V_R \leq 11,0$, mostrando atividade pronunciada particularmente entre $6,0 \leq V_r \leq 7,0$, indicativo da faixa de

Figura 2.20 – Trajetórias nas direções X e Y: (a) escala real de seção quadrada, (b) escala real de cantos arredondados, (c) escala do modelo de seção quadrada e (d) escala do modelo de cantos arredondados



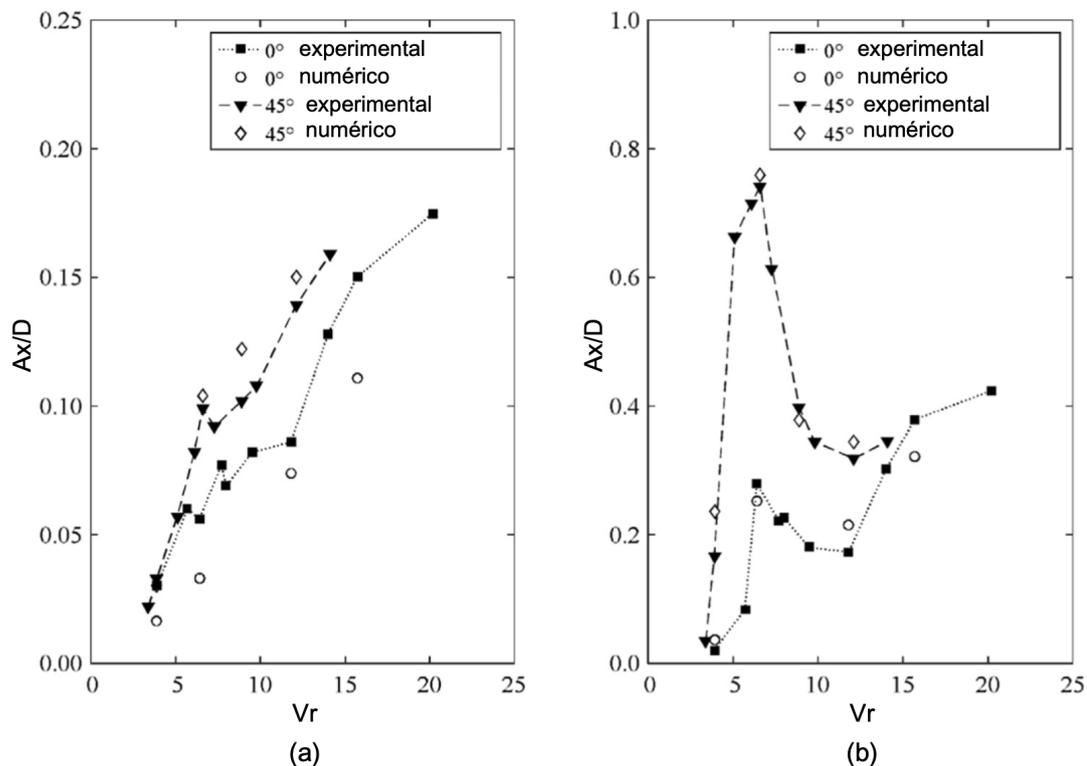
Fonte: Adaptado e traduzido de Chen e Chen (2016).

lock-in. Além de $V_r \geq 15,0$, foi observada uma frequência elevada de liberação de vórtices, semelhante ao galloping.

Dentro do domínio pós-lock-in, a resposta do movimento poderia ser atribuída aos efeitos combinados do VIM e dos fenômenos de galloping. Conforme representado na Figura 2.21, tanto os movimentos longitudinais ao escoamento quanto os transversais com um ângulo de ataque de 45 graus superam aqueles observados com um ângulo de ataque de 0 graus, com os movimentos de guinada exibindo comportamentos contrastantes.

O estudo estabeleceu com sucesso uma forte correlação entre os padrões de desprendimento de vórtices, as forças flutuantes que impactam a estrutura e a trajetória do VIM. O fenômeno lock-in emergiu como um fator crucial que influencia os processos de desprendimento de vórtices, exercendo forças e moldando a trajetória do VIM.

Figura 2.21 – Características das amplitudes: (a) transversais ao escoamento A_y/D e (b) longitudinais ao escoamento, A_x/D



Fonte: Adaptado e traduzido de Liang et al. (2017).

Durante o período de lock-in, os vórtices desprendidos dos cilindros a montante da SSP impactaram os cilindros a jusante, imitando a liberação significativa de vórtices dos próprios cilindros a jusante. É fundamental observar o impacto potencial das variações nas configurações dos cabos de amarração entre simulações experimentais e numéricas nas forças que atuam sobre as estruturas.

2.12.3 Trabalho de Zhang et al. (2017)

Este trabalho foi aprofundado na investigação computacional de VIM impactando uma estrutura multicilindros de seção quadrada utilizada para extração offshore de petróleo e gás. Através da aplicação de uma técnica numérica avançada, especificamente a simulação melhorada de vórtices desacoplados (IDDES), juntamente com uma estratégia de malha dinâmica, foram executados e examinados os modelos numéricos.

As avaliações sistemáticas incluem uma análise dos respostas de deriva (sway) e guinada (yaw), rastreamento de trajetórias de movimento, análises de frequência e cálculo da densidade espectral de potência do movimento. Uma validação completa em relação aos dados empíricos ressalta a precisão das previsões baseadas em IDDES,

apresentando desempenho superior em relação aos métodos tradicionais de simulação de vórtices desacoplados com atraso (DDES) .

Notavelmente, as discrepâncias nas respostas de amplitudes transversais entre as simulações e observações empíricas permanecem abaixo de 10% dentro da região de lock-in. As descobertas esclarecem que as reações VIM laterais se manifestam dentro de uma faixa de V_R de 7,0 a 14,0 dada uma razão de aspecto, T/L , de 1,44. O pico de amplitude transversal observado atinge aproximadamente 35% da largura do cilindro em um ângulo de ataque de 22,5 graus.

Este estudo revela que as respostas VIM se alinham predominantemente com os eixos diagonais da plataforma nos ângulos de ataque de 15, 22,5 e 45 graus. As frequências de deriva e de guinada nesses ângulos excedem significativamente aquelas em um ângulo de ataque de 0 grau. Além disso, os níveis de energia do movimento de guinada nos ângulos de ataque de 15, 22,5 e 45 graus são aproximadamente 10% daqueles observados em 0 grau.

Por meio de análise paramétrica, foi observado que as diferentes alturas dos cilindros submersos afetam o comportamento do VIM. Este estudo ilustra uma acentuada intensificação no VIM na direção transversal à medida que T/L do cilindro submerso excede 1,0. Especificamente, uma comparação entre T/L de 1,44 e 3,0 revela um aumento aproximado de 120% na intensidade do VIM transversal, destacando a influência significativa da geometria do cilindro na dinâmica do VIM.

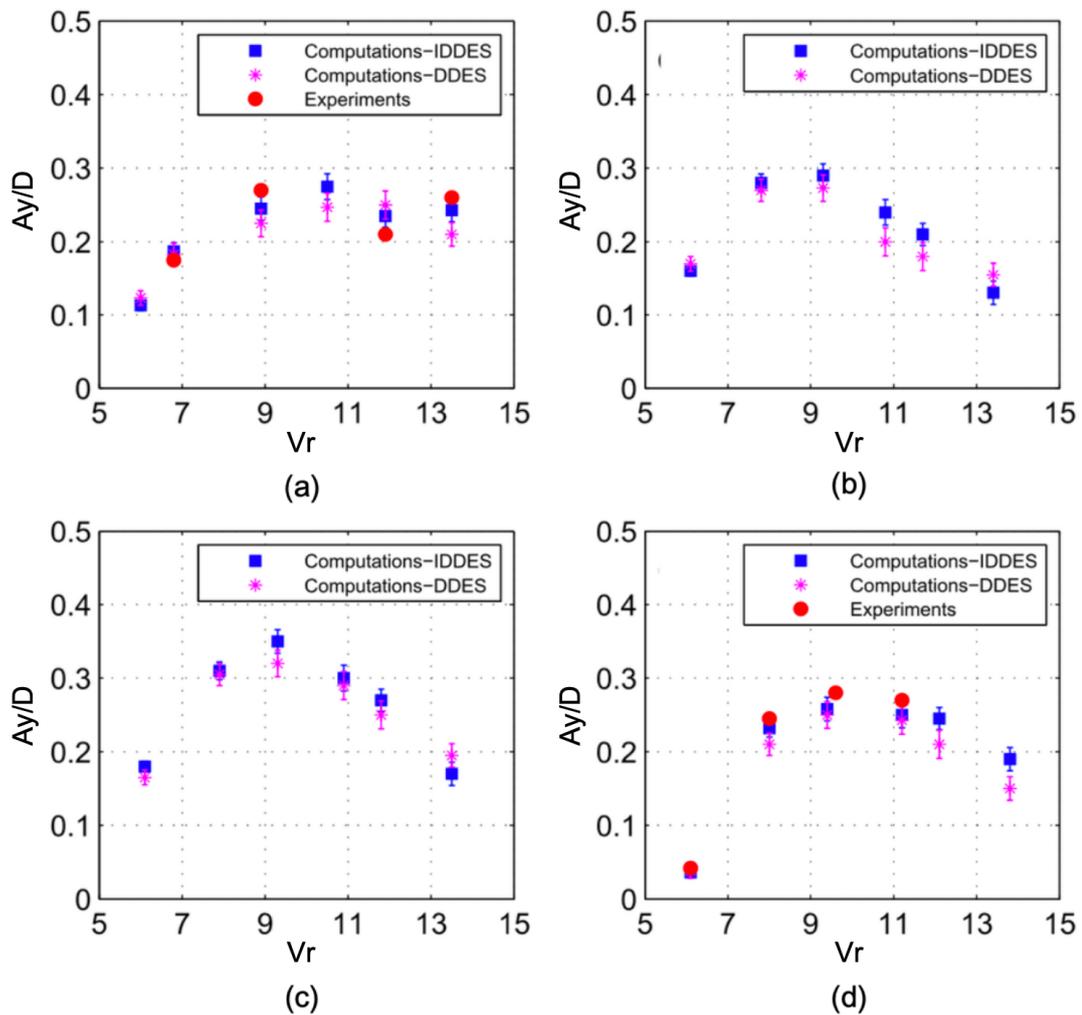
A Figura 2.22 representa a resposta da amplitude transversal em ângulos de ataque de 0 grau, 15 graus, 22,5 graus e 45 graus, nas V_R . Este arranjo destaca o comportamento dinâmico da estrutura sob condições variadas, ilustrando o impacto do ângulo de ataque nas amplitudes.

2.12.4 Trabalho de Gonçalves et al. (2020a)

Este trabalho está ancorado em uma série de experimentos conduzidos em arranjos de quatro cilindros caracterizadas por uma baixa razão de aspecto (T/L) de 1,5 enquanto examina três distâncias centrais entre cilindros distintos, ou razões de espaçamento, denotadas como S/L , sendo 2, 3 e 4. Esses experimentos foram executadas em tanque de prova, onde foi avaliado o impacto de dois ângulos de ataque, 0 grau e 45 graus.

A seleção dessas configurações específicas para os arranjos de quatro cilindros foi estratégica, visando encapsular as condições operacionais pertinentes às principais plataformas flutuantes, incluindo SSPs e plataformas tension leg (TLPs). O objetivo principal desses experimentos foi dissecar as características do FIM dentro dessas construções de quatro cilindros, enriquecendo assim as considerações de projeto para estruturas offshore. Os experimentos abrangeram uma faixa de números de Reynolds de 10.000 a 110.000, fornecendo um amplo espectro de condições de escoamento para

Figura 2.22 – Amplitude transversal, A_y/D , em ângulos de ataque de: (a) 0° , (b) 15° , (c) $22,5^\circ$ e (d) 45°

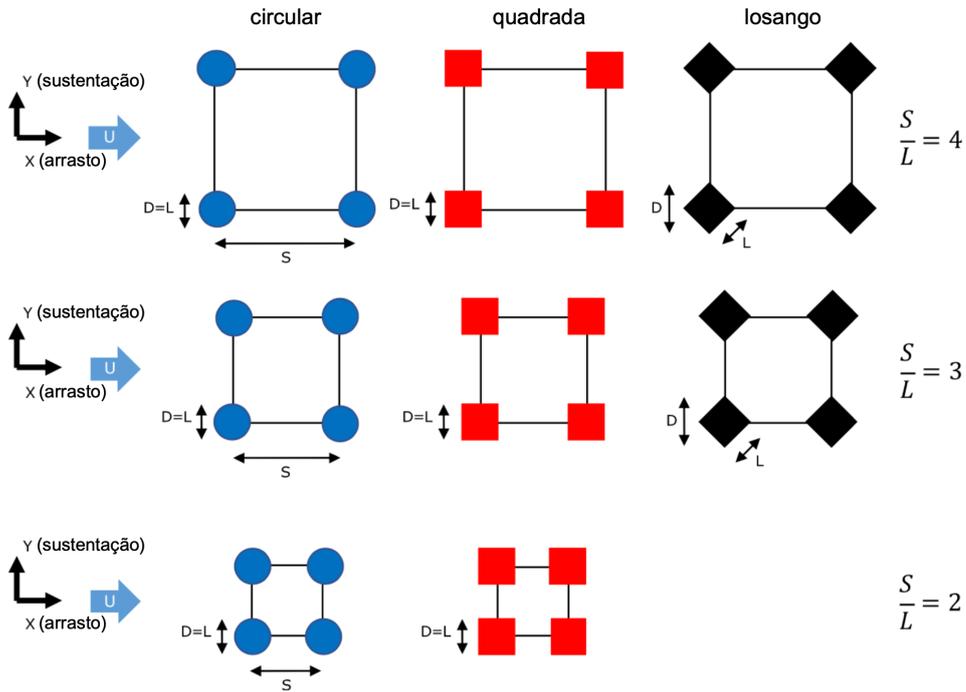


Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2017).

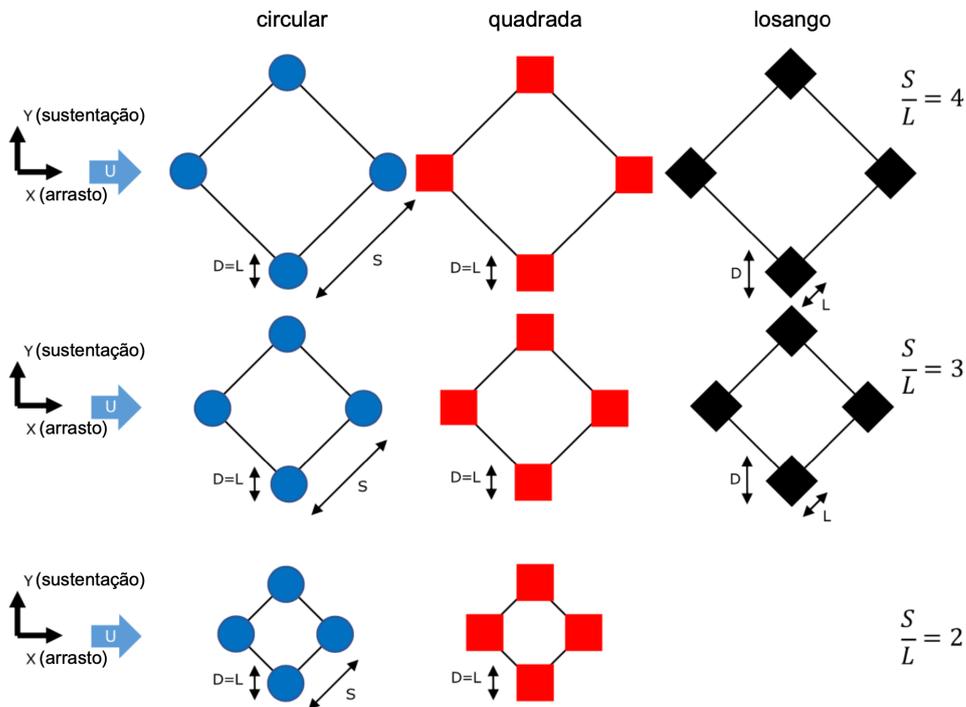
análise.

Ilustrações que descrevem as configurações dos arranjos de quatro cilindros sob um ângulo de ataque de 0 grau, mostrando várias geometrias de seções de cilindro, organizadas da direita para a esquerda, circular, quadrada e losango, ao lado de diversas relações de espaçamento, sequenciadas de cima para baixo, $S/L = 4, 3$ e 2 , são apresentadas na Figura 2.23. Da mesma forma, a Figura 2.24 ilustra as configurações sob um ângulo de ataque de 45 graus, mantendo o mesmo arranjo tanto para as geometrias dos cilindros quanto para as relações de espaçamento.

O estudo documenta que as configurações com seção circular exibem amplitudes notavelmente maiores nos movimentos nas direções transversal, longitudinal e de guinada (yaw). Observou-se que enquanto as seções circulares e de diamante exibem predominantemente uma resposta dominada por VIM, as geometrias quadradas exi-

Figura 2.23 – Arranjos de 4 cilindros, ângulo de ataque de 0° e $S/L = 4, 3$ e 2 

Fonte: Adaptado e traduzido de Gonçalves et al. (2020a).

Figura 2.24 – Arranjos de 4 cilindros, ângulo de ataque de 45° e $S/L = 4, 3$ e 2 

Fonte: Adaptado e traduzido de Gonçalves et al. (2020a).

bem predominantemente tendências de galloping. A investigação sobre os movimentos de guinada, no entanto, ainda não chegou a uma conclusão definitiva, destacando uma área pronta para exploração adicional.

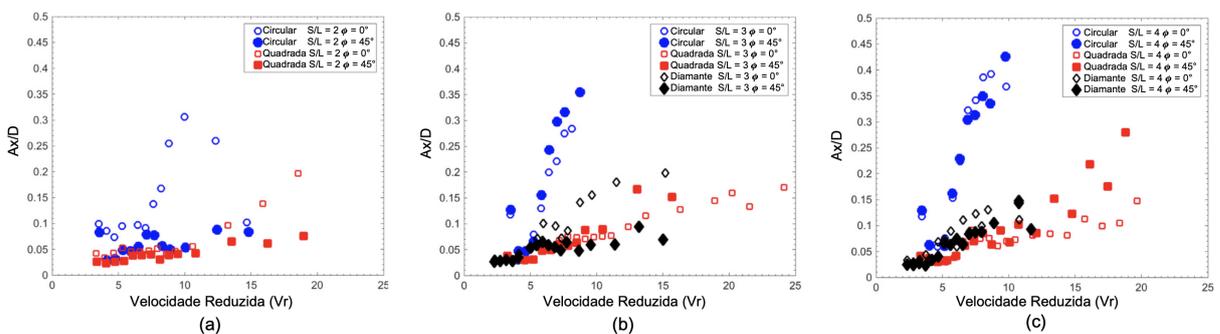
Comportamentos distintos surgiram ao examinar o espaçamento entre cilindros, especificamente em uma razão de espaçamento, $S/L = 2$, onde os cilindros se comportam como uma estrutura unificada em resposta ao escoamento em um ângulo de ataque de 45 graus, afetou significativamente a inferência da esteira para um ângulo de ataque de 0 grau. Quando a razão de espaçamento foi aumentada para 3 e 4, as diferenças na resposta foram mínimas, sugerindo que além de um certo limite, o espaçamento entre os centros dos cilindros torna-se menos significativo.

A pesquisa identifica ainda que a natureza predominante da resposta FIM, seja VIM ou galloping, está intrinsecamente ligada à geometria da seção do cilindro e não ao ângulo de ataque. Curiosamente, foram os ângulos de ataque que desempenharam um papel fundamental na alteração das respostas de amplitude para velocidades reduzidas mais altas, $V_R > 10$.

O estudo também contrasta essas descobertas com as de estudos sobre FIM em SSP de calado profundo equipados com pontões. Esta comparação esclarece o papel significativo que os pontões desempenham na modificação do escoamento circundante e, conseqüentemente, no comportamento FIM na estrutura. A introdução de pontões reduz notavelmente as amplitudes na direção transversal, particularmente em velocidades reduzidas superiores a 5.

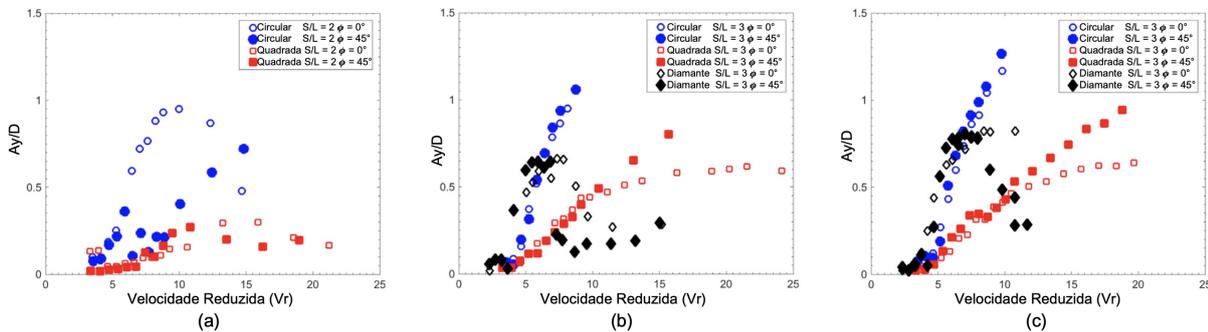
A Figura 2.25 exibe as amplitudes adimensionais dos movimentos na direção longitudinal do escoamento para um arranjo de cilindros com razões S/L , de 2, 3 e 4. Da mesma forma, a Figura 2.26 ilustra as amplitudes adimensionais dos movimentos transversais à direção do escoamento para uma série de arranjo com razões $S/L = 2, 3$ e 4.

Figura 2.25 – Amplitudes adimensionais na direção longitudinal do escoamento para um arranjo de 4 cilindros com razões S/L de: (a) 2, (b) 3 e (c) 4



Fonte: Adaptado e traduzido de Gonçalves et al. (2020a).

Figura 2.26 – Amplitudes adimensionais na direção transversal do escoamento para um arranjo de 4 de cilindros com razões S/L de: (a) 2, (b) 3 e (c) 4



Fonte: Adaptado e traduzido de Gonçalves et al. (2020a).

2.12.5 Trabalho de Gonçalves et al. (2020b)

As investigações da dinâmica do FIM examinando um arranjo de três cilindros caracterizado por uma baixa razão de aspecto de $T/L = 1,5$ foram conduzidas em um tanque de reboque. A investigação abrangeu diferentes espaçamentos entre os centros dos cilindros, com razões S/L definidas em 2, 3 e 4, para esclarecer o fenômeno FIM.

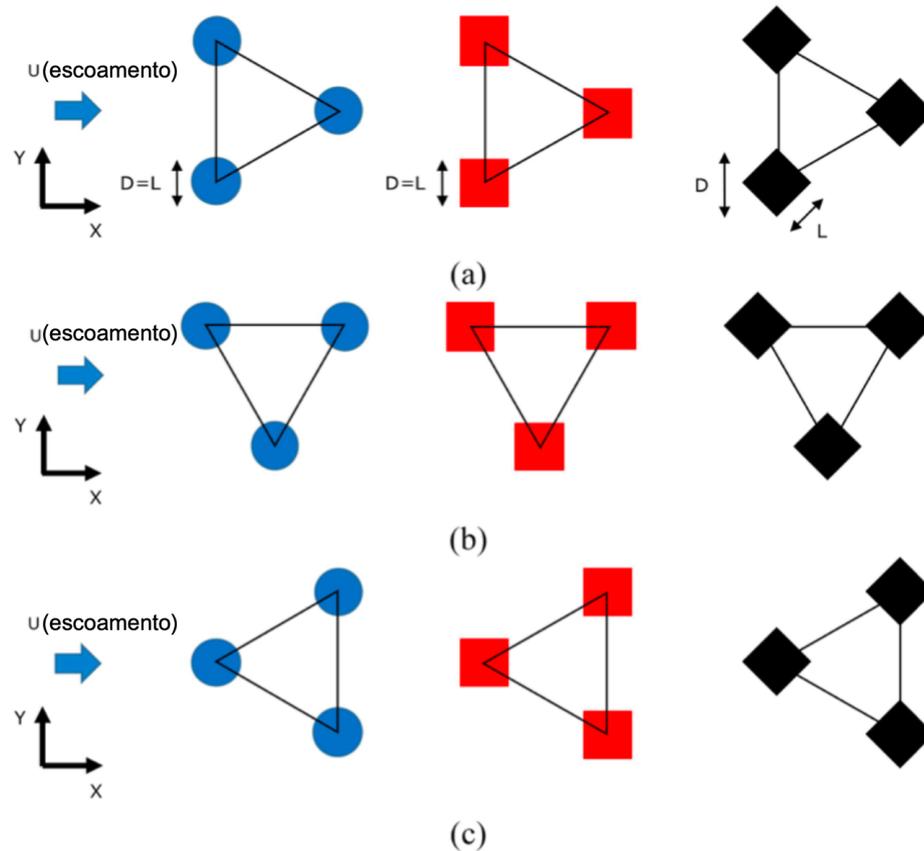
Este exame foi ampliado pela inclusão de cilindros de três formatos distintos: circular, quadrado e diamante, e pela alteração dos ângulos de ataque para 0 grau, 90 graus e 180 graus. A seleção dessas configurações específicas teve como objetivo encapsular os parâmetros operacionais predominantes no domínio das FOWTs, explorando ao mesmo tempo uma faixa de números de Reynolds de 10.000 a 110.000.

A Figura 2.27 ilustra os esquemas para as configurações testadas dos arranjos de três cilindros (circular, quadrada e diamante) nos ângulos de ataque 0, 90 e 180 graus. Por outro lado, a Figura 2.28 representa o layout para os mesmos arranjos de três cilindros, com ângulo de ataque de 0 grau, mostrando as configurações de $S/L = 2, 3$ e 4.

O estudo identificou que os formatos dos cilindros determinam significativamente o comportamento do FIM na configuração de três cilindros. A configuração circular, em particular, apresentou amplitudes de movimento pronunciadas nas orientações transversal e longitudinal, bem como nos movimentos de guinada.

Para movimentos transversais, os cilindros circulares e diamantes exibiram características de VIM, enquanto os cilindros de seção quadrada foram mais similares ao galloping. Em termos de movimentos de guinada, todos os arranjos demonstraram uma tendência ao galloping. No entanto, para determinar com precisão se o galloping ou o VIM é o mecanismo FIM predominante, é imperativo realizar experimentos adicionais de medição de força em vários ângulos de ataque.

Figura 2.27 – Arranjos de três cilindros (circular, quadrada e diamante) nos ângulos de ataque: (a) 0°, (b) 90° e (c) 180°



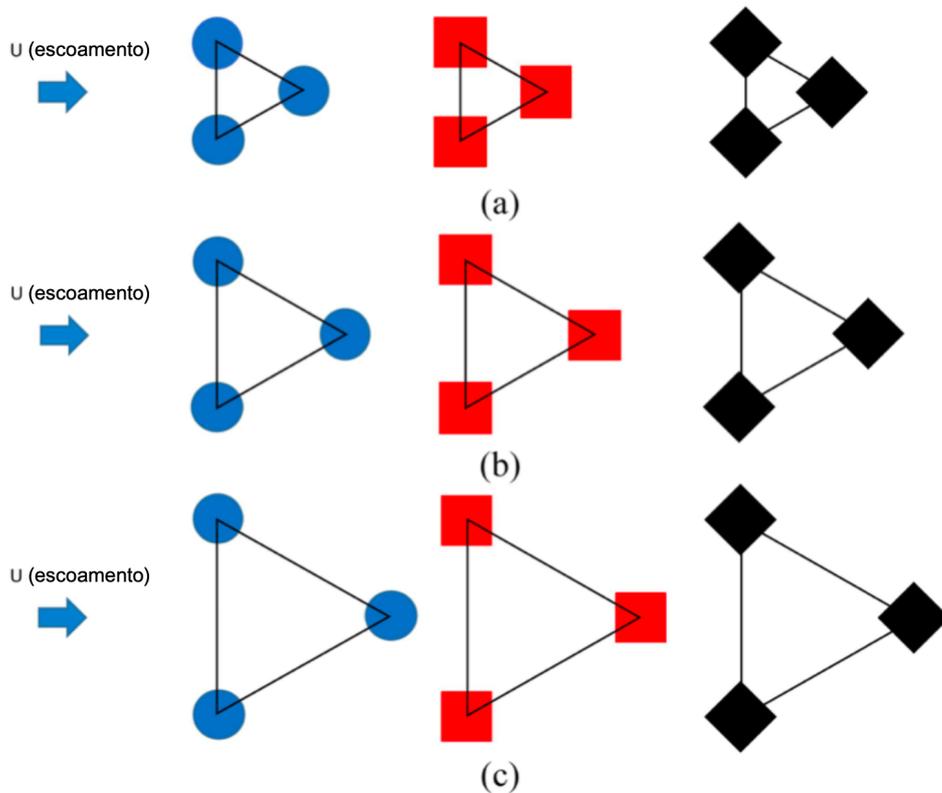
Fonte: Adaptado e traduzido de Gonçalves et al. (2020b).

O espaçamento entre cilindros desempenhou um papel fundamental em uma relação S/L de 2, onde os cilindros se comportaram como uma monocolumna coesa contra o escoamento, um fenômeno particularmente observado com as formas de diamante e quadradas. Para espaçamentos representados pelas relações S/L de 3 e 4, as distinções comportamentais foram mínimas, sugerindo o impacto insignificante do espaçamento entre cilindros no FIM além de um limite S/L de 3.

Além disso, a análise destacou que os ângulos de ataque influenciaram predominantemente o movimento longitudinal devido a alterações na força de arrasto pelos cilindros situadas a jusante. A disparidade nos resultados entre 0 e 180 graus foi pequena, enquanto o movimento de guinada a 90 graus apresentou variações únicas atribuídas à assimetria do sistema, mas as amplitudes dos picos foram relativamente consistentes.

Em conclusão, a justaposição dos resultados deste estudo com a literatura existente sobre VIM com números variados de cilindros em um ângulo de ataque de zero grau revelou que as amplitudes transversais para o arranjo de três cilindros, especi-

Figura 2.28 – Arranjos de três cilindros, com ângulo de ataque de 0° com razões S/L de: (a) 2, (b) 3 e (c) 4



Fonte: Adaptado e traduzido de Gonçalves et al. (2020b).

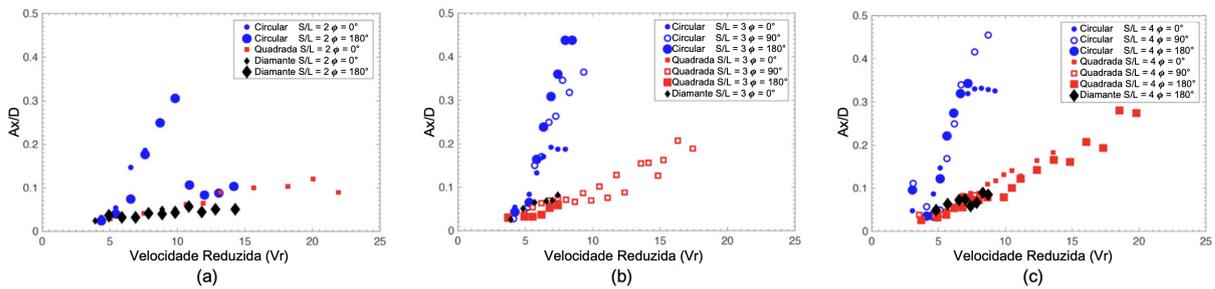
almente no arranjo circular e diamante, foram maiores em comparação com arranjo de uma monocolona e quatro cilindros. Curiosamente, o cilindro quadrada única apresentou a amplitude mais significativa quando comparado com arranjos compostos por cilindros quadrados, destacando as características de resposta distintas dos arranjos de cilindros de seção quadrada nas análises de FIM.

A Figura 2.29 exibe as amplitudes adimensionais dos movimentos na direção longitudinal do escoamento para um arranjo de cilindros com relações $S/L = 2, 3$ e 4 . Da mesma forma, a Figura 2.30 ilustra as amplitudes adimensionais dos movimentos transversais à direção do escoamento para uma série de arranjo com relações $S/L = 2, 3$ e 4 .

2.12.6 Trabalho de Bruner et al. (2023)

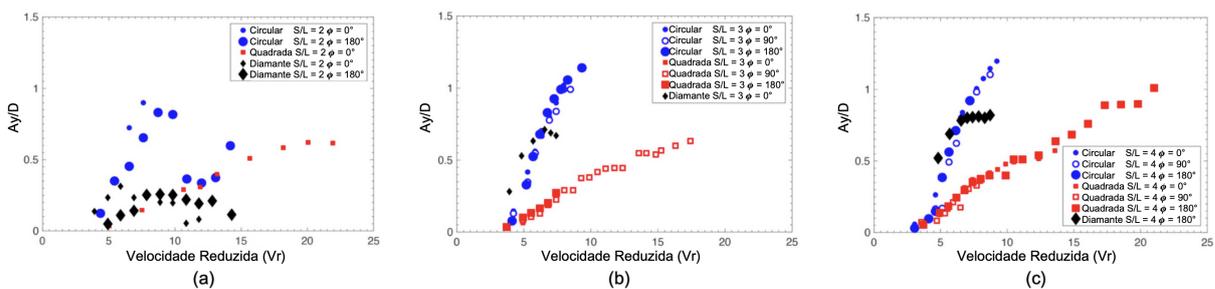
Neste artigo, foi realizado um exame experimental do fenômeno de FIM usando modelos ultra-reduzidos, livres para oscilar em 2GDL, em um CAC no LIFE-UFSC-Joinville. Esta investigação teve como objetivo avaliar preliminarmente configurações de unidades flutuantes em SSP e FOWT do tipo SS, para identificar configurações

Figura 2.29 – Amplitudes adimensionais na direção longitudinal do escoamento para um arranjo de 3 cilindros com razões S/L de: (a) 2, (b) 3 e (c) 4



Fonte: Adaptado e traduzido de Gonçalves et al. (2020b).

Figura 2.30 – Amplitudes adimensionais na direção transversal do escoamento para um arranjo de 3 cilindros com razões S/L de: (a) 2, (b) 3 e (c) 4



Fonte: Adaptado e traduzido de Gonçalves et al. (2020b).

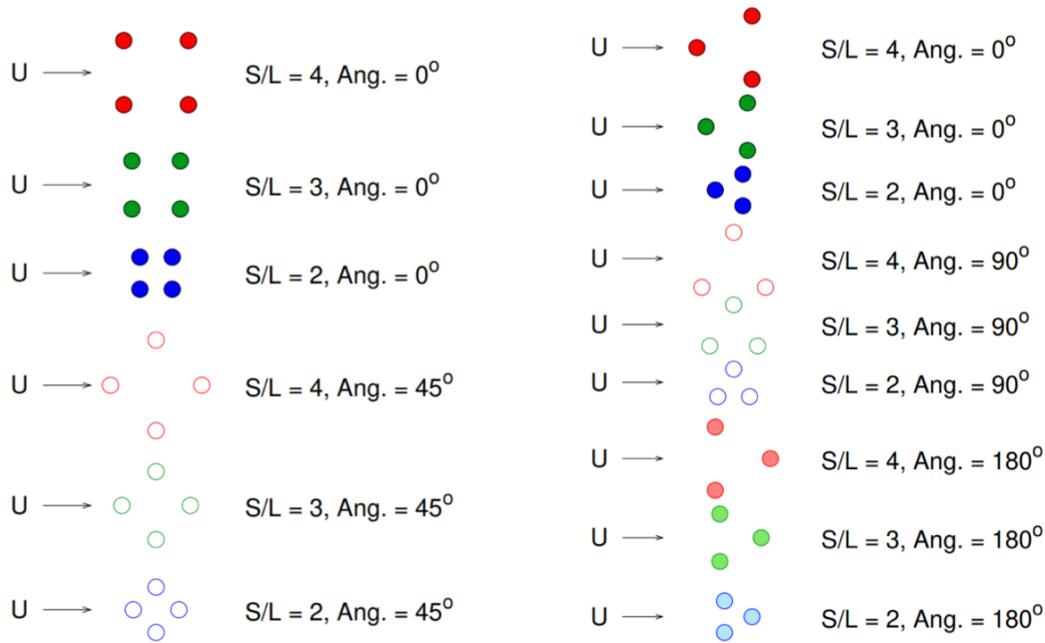
promissoras que justifiquem uma exploração mais aprofundada através de simulações de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) em números de Reynolds em escala real. É importante notar que os resultados experimentais aqui relatados também servem para corroborar modelos de simulação numérica aplicáveis em faixas similares de números de Reynolds.

Para a primeira fase desta pesquisa, foi explorado configurações compostas por três ou quatro cilindros de seção circular, colocados a distâncias iguais entre si, com separações de $S/L = 2, 3$ e 4 , onde T é o calado. Essas configurações foram avaliadas de vários ângulos, especificamente em $0, 45, 90$ e 180 graus, para compreender seu impacto com base no arranjo específico.. Cada configuração testada manteve uma razão de aspecto de $T/L = 2$ e uma massa reduzida de aproximadamente $m^* \cong 1,83$. O estudo concentrou-se em incidências de escoamento caracterizadas por baixos números de Reynolds variando de 598 a 1318 , correspondendo a sete velocidades de escoamento distintas. Sabe-se que estas condições preservam as características fundamentais dos fenômenos de FIM.

As configurações envolvendo três cilindros foram examinadas em três ângulos

de ataque, 0, 90 e 180 graus, para investigar seu comportamento sob diversas condições de escoamento. Por outro lado, os arranjos com quatro cilindros foram analisados sob duas orientações distintas, 0 e 45 graus. A Figura 2.31 ilustra essas configurações em conjunto com a velocidade do escoamento, U .

Figura 2.31 – Ilustração dos ângulos de ataque de cada arranjo considerando a a velocidade de escoamento U



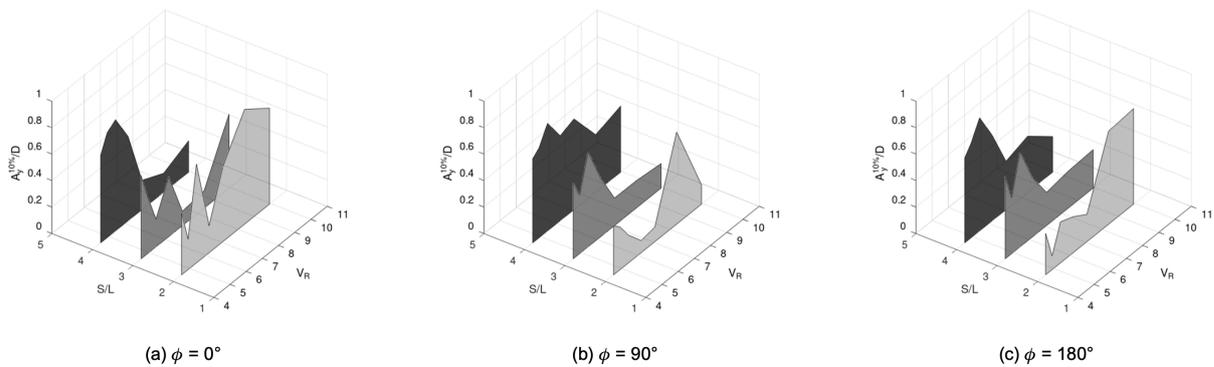
Fonte: Bruner et al. (2023).

As representações gráficas facilitam a comparação de amplitudes e frequências adimensionais características de FIM em configurações com três ou quatro cilindros de seção circular. Essas comparações foram ilustradas sistematicamente, correlacionando tanto a razão de espaçamento entre cilindros, S/L , quanto as velocidades reduzidas, V_R .

A Figura 2.32 mostra as amplitudes adimensionais na direção transversal ao escoamento, $A_y^{10\%}/D$, dos resultados para um arranjo composto por três cilindros de seção circular, considerando os ângulos de ataque de: (a) 0 grau, (b) 90 graus e (c) 180 graus. Enquanto a Figura 2.33 apresenta os resultados das amplitudes adimensionais na direção transversal ao escoamento, $A_y^{10\%}/D$, dos arranjos de quatro cilindros com ângulo de ataque de: (a) 0 e (b) 45 graus.

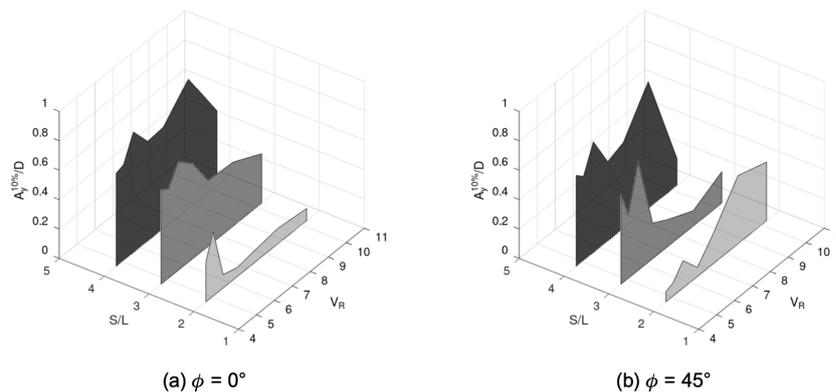
A Figura 2.34 mostra as amplitudes adimensionais na direção longitudinal ao escoamento, $A_x^{10\%}/D$, para um arranjo composto por três cilindros de seção circular, levando em consideração ângulos de ataque de 0 grau (a), 90 graus (b) e 180 graus (c). Enquanto isso, a Figura 2.35 representa os resultados de amplitude adimensional na

Figura 2.32 – Amplitudes adimensionais na direção transversal ao escoamento para os arranjo de 3 cilindros com: (a) $\phi = 0^\circ$, (b) $\phi = 90^\circ$ e (c) $\phi = 180^\circ$



Fonte: Adaptado e traduzido de Bruner et al. (2023).

Figura 2.33 – Amplitudes adimensionais na direção transversal ao escoamento para os arranjo de 4 cilindros com: (a) $\phi = 0^\circ$ e (b) $\phi = 45^\circ$



Fonte: Adaptado e traduzido de Bruner et al. (2023).

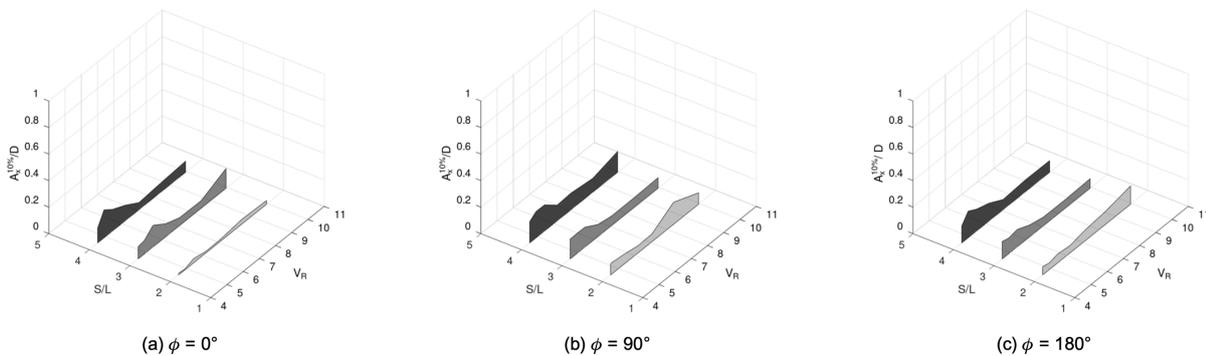
direção longitudinal ao escoamento, $A_x^{10\%}/D$, para configurações de quatro cilindros submetidas a ângulos de ataque de 0 grau (a) e 45 graus (b).

Observando as Figuras acima pode-se notar que variações no espaçamento entre cilindros e no ângulo de ataque foram fatores-chave neste estudo. No caso das configurações de quatro cilindros, configurações com espaçamentos mais amplos, especificamente relações S/L de 3 e 4, exibiram maiores amplitudes de resposta transversal adimensional em velocidades reduzidas entre 8 e 10.

Esta resposta aumentada é atribuída às frequências naturais mais baixas e os efeitos de esteira gerados pelos cilindros posicionados a montante. Por outro lado, as menores amplitudes adimensionais na direção do escoamento transversal foram observadas em arranjos com relação S/L de 2, particularmente em um ângulo de de ataque de $\phi = 0$ grau.

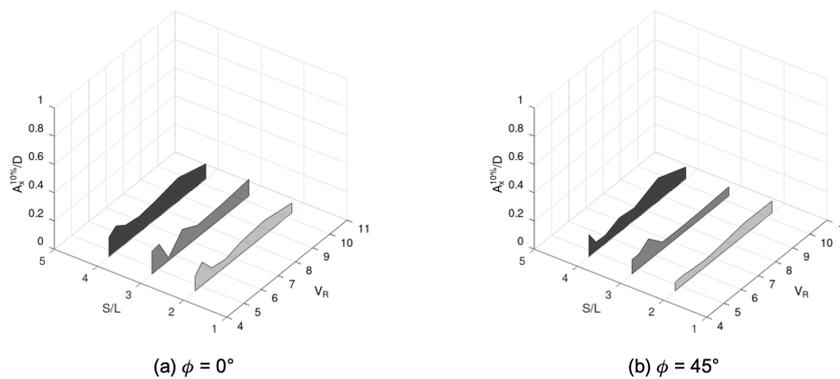
Ao comparar os resultados em todas as configurações testadas, ficou evidente

Figura 2.34 – Amplitudes adimensionais na direção longitudinal ao escoamento para os arranjo de 3 cilindros com: (a) $\phi = 0^\circ$, (b) $\phi = 90^\circ$ e (c) $\phi = 180^\circ$



Fonte: Adaptado e traduzido de Bruner et al. (2023).

Figura 2.35 – Amplitudes adimensionais na direção longitudinal do escoamento para os arranjo de 4 cilindros com: (a) $\phi = 0^\circ$ e (b) $\phi = 45^\circ$



Fonte: Adaptado e traduzido de Bruner et al. (2023).

uma semelhança no comportamento de resposta entre os arranjos de três e quatro cilindros. Apesar de suas configurações distintas, ambos demonstraram respostas comparáveis.

Observou-se que para relações S/L a partir de 3, o espaçamento entre cilindros não influenciou significativamente a amplitude do FIM. Além disso, configurações com espaçamentos maiores exibiram amplitudes transversais superiores às de um cilindro único dentro de sua faixa de sincronização, identificada em velocidades reduzidas superiores a 7,5. No entanto, arranjos com uma razão de aspecto $S/L = 2$, manifestaram amplitudes de resposta mais baixas em ambas as direções examinadas.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, delinea-se os materiais e metodologias empregados no avanço deste estudo. Abrange, em termos gerais, uma abordagem predominantemente experimental, por meio da qual modelos em escala reduzida foram submetidos a testes no Laboratório de Interação Fluido-Estrutura (LIFE), situado no campus de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina. Estes testes foram realizados, mais especificamente, dentro de um Canal de Água Circulante (CAC) de baixo Reynolds o fenômeno de Movimento Induzido pelo Escoamento (FIM).

3.1 CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE (CAC)

No domínio da exploração dos fenômenos de FIM, experimentos em pequena escala são tradicionalmente executados em tanques de reboque e canais de água circulantes expansivos. Para facilitar tais experimentos com baixos números de Reynolds e dentro de um orçamento limitado, um Canal de Água Circulante (CAC) compacto foi conceituado e construído para o LIFE da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Este CAC inspirou-se no projeto desenvolvido no Núcleo de Dinâmica de Fluidos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), modelo escolhido entre diversas alternativas documentadas por pesquisadores como Saeed et al. (2018), Kalgutkar et al. (2016) e Jiang et al. (2018).

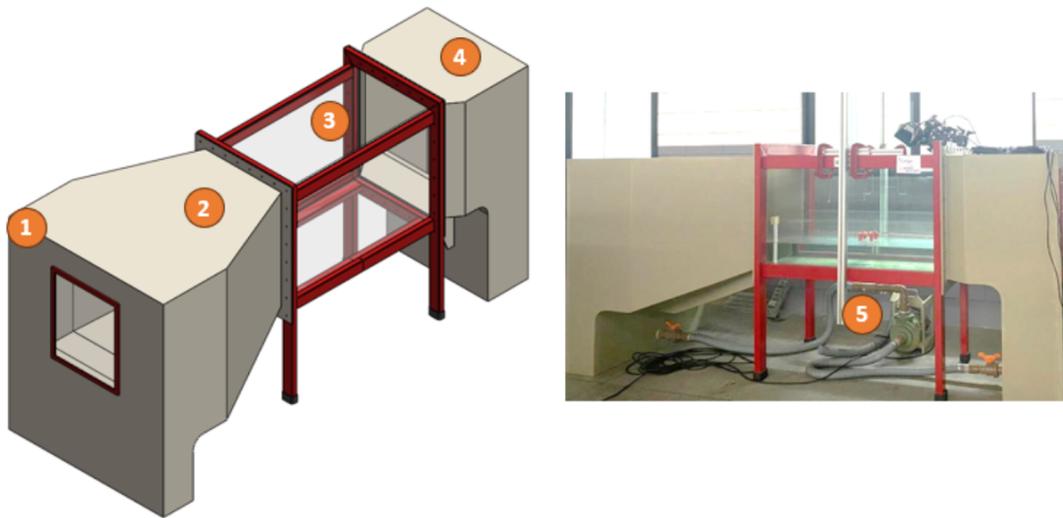
Apesar da relação custo-eficácia da utilização de modelos de pequena escala em vez de protótipos de escala real, onde os primeiros ainda podem incorrer em despesas de dezenas de milhares de dólares, tal investimento representa um gasto significativo durante a fase de concepção preliminar ou para objetivos educacionais.

Além das despesas consideráveis associadas à construção dos modelos, a realização dos experimentos necessários exige acesso a instalações especializadas. Especificamente, a realização de pesquisas em ambientes aquáticos exige o uso de canais de água e tanques de reboque, que não são apenas caros, mas também exigem conhecimentos operacionais complexos.

A arquitetura do CAC, representada na Figura 3.1, abrange cinco componentes principais: o reservatório a montante (1), a seção de estreitamento (2), a seção de teste (3), o reservatório a jusante (4), e a bomba de circulação (5).

Os reservatórios a montante e a jusante, juntamente com a seção estreita, foram construídos em polipropileno para garantir durabilidade e resistência à exposição à água. A estrutura de suporte da seção de exames tem a função de garantir a integridade e estabilidade estrutural do CAC e é fabricada em aço, que foi tratado com uma camada protetora para evitar corrosão. A própria área de teste é cercada por três painéis de vidro grosso, com dimensões de 1200 *mm* de comprimento, 550 *mm* de largura e 750 *mm* de altura, proporcionando uma visão clara para observação e

Figura 3.1 – CAC no LIFE da UFSC de Joinville, SC



Fonte: Bruner et al. (2023).

registro de dados experimentais.

3.2 GRAUS DE LIBERDADE E SISTEMA DE COORDENADAS

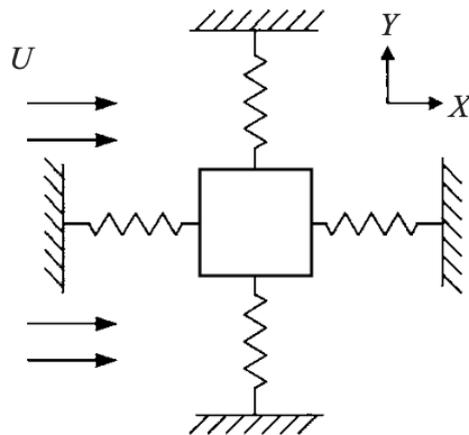
A capacidade de oscilação em vários graus de liberdade é crítica para a compreensão das respostas do FIM de estruturas flutuantes, com impacto significativo na vida à fadiga destas estruturas. Apesar de sua importância, a pesquisa voltada especificamente para cilindros de plataformas com mais de um grau de liberdade (1GDL) e de seção quadrada é escassa.

Como resultado, muitos insights são derivados de estudos sobre o fenômeno FIM que afeta cilindros limitados a dois graus de liberdade (2GDL), onde as oscilações simultâneas perpendiculares e paralelas ao escoamento são conhecidas por induzir alterações notáveis no comportamento dinâmico. Isto sustenta a justificativa para o foco principal do presente estudo na análise FIM de cilindros com 2GDL conforme esquematizado nas Figuras 3.2.

A Figura 3.2 mostra o movimento ao longo dos eixos X e Y em relação ao escoamento incidente (U), com X alinhado longitudinalmente e Y sendo transversal à direção do escoamento. O sistema sob investigação possui a mesma massa reduzida e frequência natural nessas duas direções. Esta é a configuração experimental relativa ao movimento nas direções X e Y.

Neste estudo, o sistema de coordenadas empregado é orientado de tal forma que a direção-X é longitudinal ao escoamento incidente, enquanto a direção-Y é transversal a ele. A velocidade do escoamento (U) é considerada uniforme e alinhada com a direção do escoamento, conforme ilustrado na Figura 3.3. As dimensões expostas

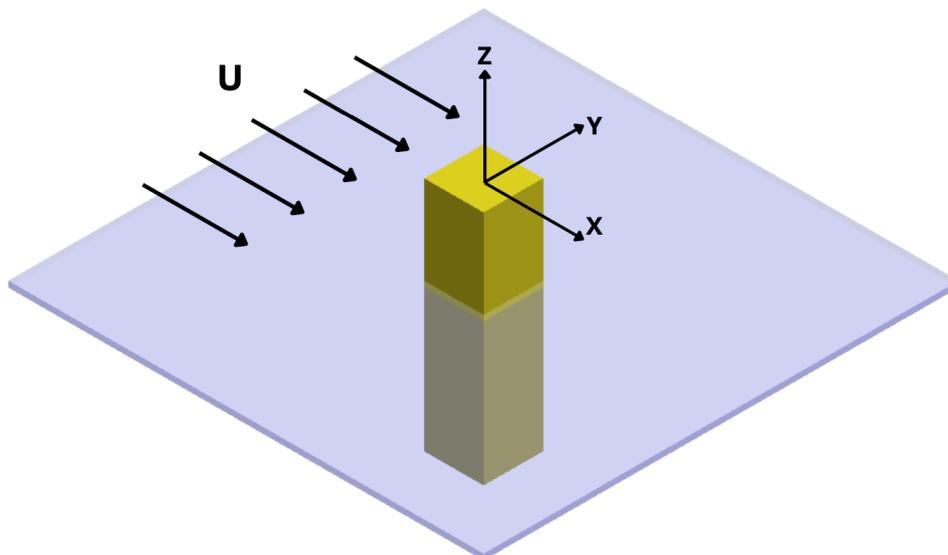
Figura 3.2 – Representação de um arranjo de um sistema livre para oscilar em 2GDL, na direção transversal e longitudinal ao escoamento



Fonte: Adaptado de Jauvtis e Williamson (2004).

ao escoamento apresentam a dimensão característica do cilindro de acordo com a entrada do ângulo de ataque (D), a largura da face externa do cilindro quadrado (L), dada a área da secção transversal quadrada das estruturas em consideração, conforme ilustrado na Figura 3.4.

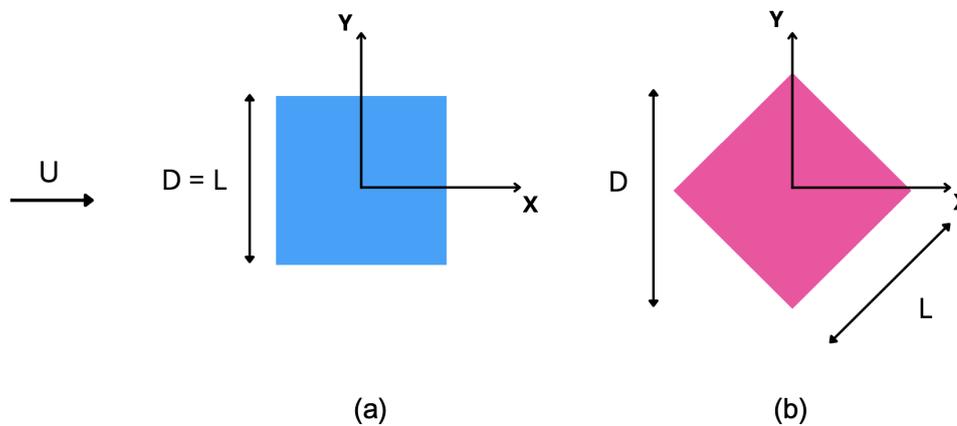
Figura 3.3 – Sistema de Coordenadas adotado neste estudo



Fonte: Autora (2024).

De acordo com Gonçalves et al. (2012) para a análise do VIM em estruturas semissubmersíveis, o parâmetro D pode ser expresso em função do ângulo de in-

Figura 3.4 – Modelos de estudo: (a) seção quadrada; e (b) seção losango



Fonte: Autora (2024).

cidência da corrente. Esta abordagem encapsula com mais precisão o comprimento característico da seção do cilindro em relação à direção do escoamento (Equação 3.1).

$$D = L(|\sin\phi| + |\cos\phi|) \quad (3.1)$$

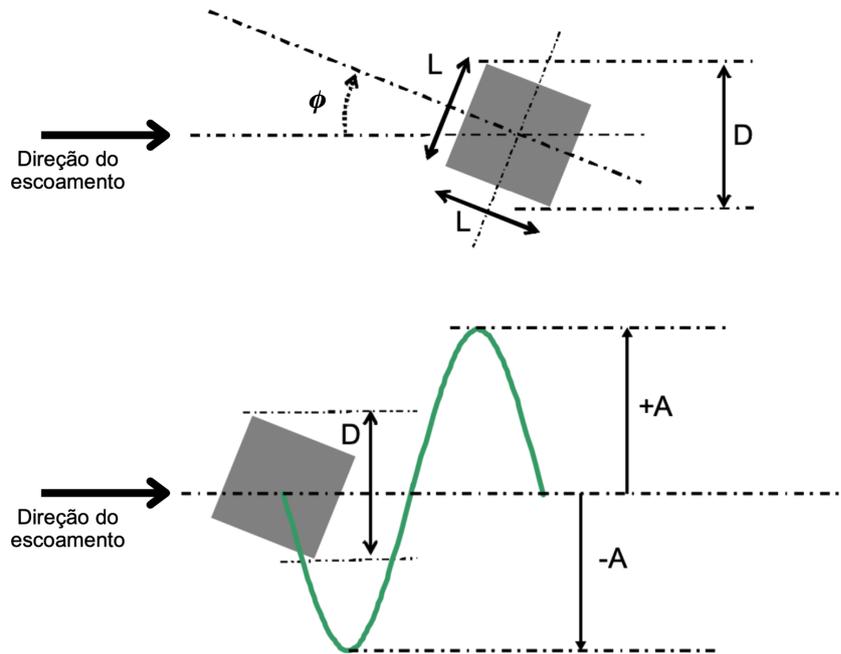
Onde L representa a largura do cilindro, enquanto ϕ representa o ângulo de ataque. Mais explicações sobre as terminologias e suas definições são fornecidas na Figura 3.5.

A figura 3.5 ilustra que, no contexto de um cilindro de seção quadrada, D significa o comprimento projetado pela área da seção transversal do cilindro em um plano ortogonal à direção do escoamento. A amplitude da oscilação para cada ciclo é representada por A .

As características de amplitude do movimento nas direções transversal e longitudinal com o escoamento são adimensionalizadas pela largura do cilindro, L , o que significa que este valor permanece consistente em todas as condições de incidência do escoamento. Esta normalização facilita a comparação direta dos resultados sob vários ângulos de ataque.

3.3 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

O controle da velocidade do escoamento foi obtido por meio de ajustes na profundidade da água na seção de teste, selecionados para abranger uma faixa de velocidade reduzida (V_R). Os modelos foram testados em sete velocidades de escoamento uniforme (U) distintas, determinadas pela profundidade da água no CAC, gerando números de Reynolds que variaram de 597,5 a 1317,5 conforme detalhado na Tabela 3.1.

Figura 3.5 – Definição dos parâmetros A , D e L 

Fonte: Traduzido e adaptado de Rijken e Leverette (2008).

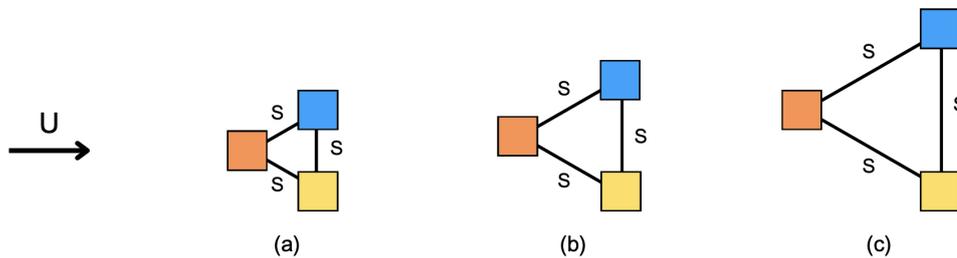
Tabela 3.1 – Profundidades, velocidades de escoamento e números de Reynolds dos arranjos testados

Profundidade (mm)	Velocidade, U (m/s)	Número de Reynolds, Re
150	0,0527	1317,5
175	0,0445	1112,5
200	0,0374	935,0
225	0,0329	822,5
250	0,0302	755,0
275	0,0260	650,0
300	0,0239	597,5

Fonte: Autora (2023).

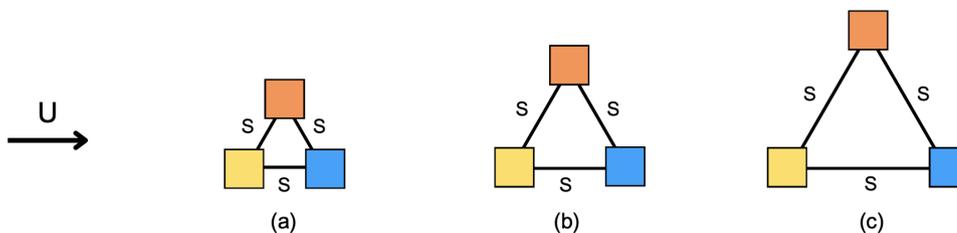
Na discussão subsequente, o termo arranjo denota especificamente a configuração que compreende cilindros de seção quadrada posicionados a uma distância predeterminada um do outro. São consideradas configurações de três ou quatro cilindros equidistantes, com razões de espaçamento $S/L = 2, 3$ e 4 . Os arranjos de três cilindros foram submetidos a três orientações distintas, em 0 grau ((Figura 3.6), 90 graus (Figura 3.7) e 180 graus (Figura 3.8). Da mesma forma, as configurações de quatro cilindros foram testadas com os mesmos espaçamentos, mas foram expostas a duas orientações, em 0 grau (Figura 3.9) e 45 graus (Figura 3.10) para cada espaçamento.

Figura 3.6 – Arranjo de 3 cilindros e ângulo de ataque 0° : (a) $S/L = 2$, (b) $S/L = 3$ e $S/L = 4$



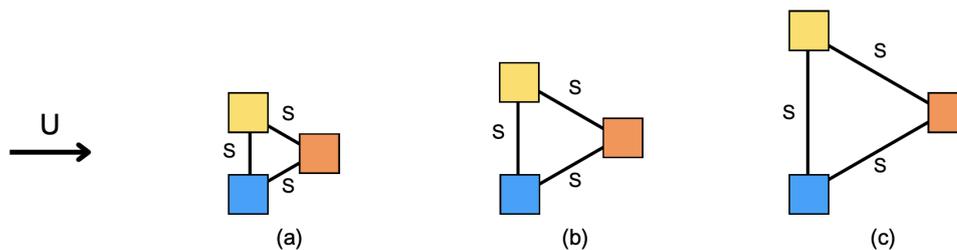
Fonte: Autora (2024).

Figura 3.7 – Arranjo de 3 cilindros e ângulo de ataque 90° : (a) $S/L = 2$, (b) $S/L = 3$ e $S/L = 4$



Fonte: Autora (2024).

Figura 3.8 – Arranjo de 3 cilindros e ângulo de ataque 180° : (a) $S/L = 2$, (b) $S/L = 3$ e $S/L = 4$

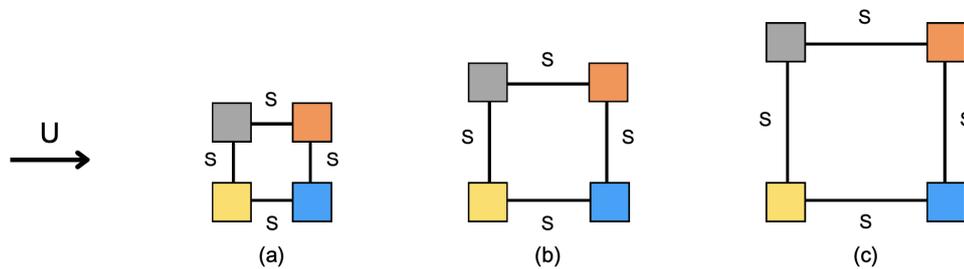


Fonte: Autora (2024).

Todos os cilíndricos possuem diâmetro externo (L) de 20 mm , calado (T) de 40 mm , borda livre de 30 mm e pontal de 70 mm . E todos possuem razão de aspecto, $T/L = 2$. Os modelos foram produzidos utilizando tecnologia de impressão 3D com filamento de plástico poliácido láctico (PLA). Foram lastrados uniformemente em todas as configurações para atingir uma massa reduzida de $m^* \cong 1,83$.

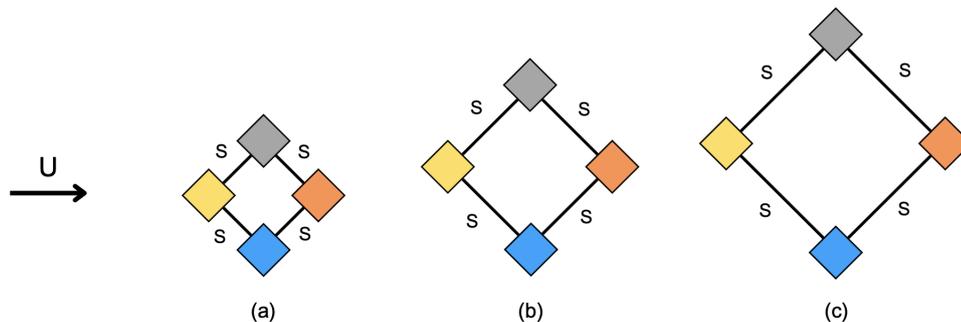
Dada a natureza higroscópica deste material, foi aplicado um revestimento de verniz para permitir a sua utilização prolongada na secção de teste. Além disso, a altura do calado de cada modelo foi marcada com tinta esmalte cinza. As representações

Figura 3.9 – Arranjo de 4 cilindros e ângulo de ataque 0° : (a) $S/L = 2$, (b) $S/L = 3$ e $S/L = 4$



Fonte: Autora (2024).

Figura 3.10 – Arranjo de 4 cilindros e ângulo de ataque 45° : (a) $S/L = 2$, (b) $S/L = 3$ e $S/L = 4$



Fonte: Autora (2024).

dos modelos testados estão ilustradas na Figura 3.11, onde a parte cinza do cilindro representa o calado, T .

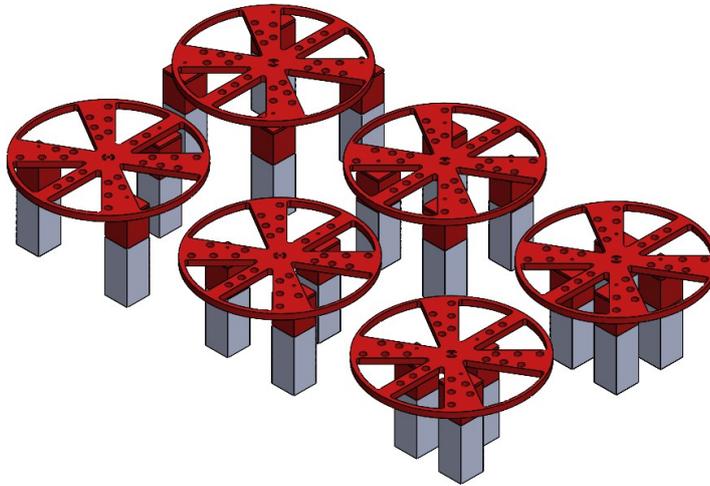
Os arranjos foram sustentados elasticamente por uma haste de aço inoxidável com $1,5 \text{ mm}$ de espessura e 2200 mm de comprimento, posicionada no plano vertical central do CAC na seção de teste com auxílio de um suporte rígido de alumínio. A utilização de uma haste longa confere ao sistema dois graus de liberdade: um na direção do escoamento e outro transversal ao escoamento, ao mesmo tempo que contribui para um amortecimento mínimo.

3.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DO MOVIMENTO INDUZIDO PELO ESCOAMENTO (FIM)

A aquisição de dados foi realizada utilizando um sistema de rastreamento óptico, OptiTrack. No CAC três câmeras foram posicionadas a jusante do escoamento, sendo uma de cada lado da seção de testes e a terceira centralizada.

O programa Motive da OptiTrack integra as perspectivas de cada câmera obser-

Figura 3.11 – Modelos em escala reduzida dos arranjos de cilindros de seção quadrada



Fonte: Autora (2024).

vando marcadores refletivos fixados no corpo, sintetizando uma trajetória abrangente de cada ponto de rastreamento no espaço tridimensional. Posteriormente, ele sobre põe esses marcadores em modelos de corpos rígidos empregando três alvos não coplanares, para facilitar o rastreamento virtual no centróide criado por esses marcadores. Na captura de uma imagem, as coordenadas X, Y e Z registradas também podem ser complementadas pela captura dos ângulos de rotação do corpo rígido, dotando o sistema de seis graus de liberdade.

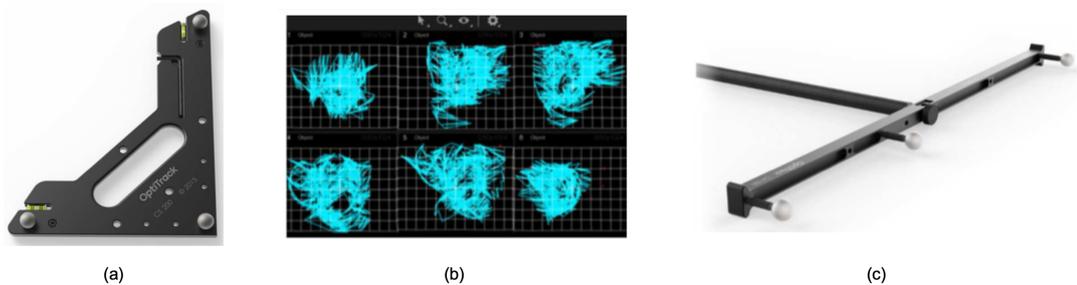
Este processo culmina em uma reconstrução de movimento precisa, permite que sejam exportados arquivos comma separated value (csv) com os registros temporais para análises posteriores. Além disso, fornece compatibilidade nativa e contínua com as principais plataformas de força digitais, eletromiógrafos (EMGs) e instrumentos analógicos, equipando os pesquisadores com ferramentas essenciais para visualização e exame em Octave ou programa biomecânico especializado adicional.

Antes da captura dos dados de movimento, é realizado um processo de calibração. A etapa inicial envolve mapear a seção de teste usando uma varinha de calibração (Figura 3.12 (c)). Este método envolve o posicionamento dos alvos de calibração dentro do campo de visão das câmeras ao longo da seção de teste, com foco principalmente no centro e ligeiramente acima da linha d'água.

Ao longo desta fase, as câmeras realizam a triangulação da posição de cada alvo em uma frequência de interesse especificada, resultando na geração de nuvens de pontos. Após a resolução desta nuvem de pontos, são determinados o volume de captura e o erro tridimensional. Para os experimentos conduzidos neste estudo, a

incerteza de calibração foi mantida em no máximo $0,05 \text{ mm}$.

Figura 3.12 – Calibração: (a) referência de rastreamento, (b) regiões mapeadas nos gráficos e (c) varinha de calibração



Fonte: Adaptado de Bruner (2022).

Após o mapeamento do volume rastreável, a referência de rastreamento (Figura 3.12 (a)), foi estabelecida. No contexto deste estudo, a origem do sistema de coordenadas de rastreamento foi definida no centro da seção de teste, com o eixo X orientado na direção do escoamento e o eixo Y perpendicular a ele, resultando assim em um Z positivo para cima.

3.5 ENSAIOS

De acordo com as diretrizes para testes de FIM, conforme estabelecido pela Conferência Internacional de Tanques de Reboque (ITTC, 2021), que foram adotadas neste estudo para orientar os procedimentos experimentais, é imperativo capturar um mínimo de 20 ciclos FIM completos. Isto deve ser feito a uma taxa de aquisição não inferior a dez vezes a maior frequência de interesse.

A Tabela 3.2 apresenta uma compilação de 315 testes experimentais que abrangem diversas configurações, incluindo a orientação dos arranjos, de três e quatro cilindros, em relação ao escoamento, o espaçamento entre os cilindros e as correspondentes velocidades reduzidas, V_R . Consistentemente, cada condição de teste foi replicada três vezes, alocando um mínimo de 5 minutos para cada período de coleta de dados, suficiente para documentar mais de 60 ciclos de FIM. É importante destacar que cada configuração possui uma frequência natural única (f_n), resultando em intervalos ligeiramente variados de velocidade reduzida.

3.6 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Uma rotina computacional foi desenvolvida utilizando GNU Octave para realizar análises baseadas no arquivo (.csv) do Motive. GNU Octave é uma linguagem de

Tabela 3.2 – Matriz dos 105 testes repetidos três vezes cada

Arranjo	Ângulo de ataque	S/L	Velocidade reduzida, V_R	$f_n(Hz)$
3	0°	2	5,24 ; 5,70 ; 6,32 ; 7,21 ; 8,20 ; 9,76 ; 11,56	0,22
3	90°	2	5,24 ; 5,70 ; 6,32 ; 7,21 ; 8,20 ; 9,76 ; 11,56	0,22
3	180°	2	5,24 ; 5,70 ; 6,32 ; 7,21 ; 8,20 ; 9,76 ; 11,56	0,22
4	0°	2	5,19 ; 5,64 ; 6,25 ; 7,14 ; 8,12 ; 9,66 ; 11,44	0,24
4	45°	2	4,82 ; 5,24 ; 5,81 ; 6,63 ; 7,54 ; 8,97 ; 10,63	0,25
3	0°	3	5,38 ; 5,86 ; 6,49 ; 7,41 ; 8,42 ; 10,02 ; 11,87	0,23
3	90°	3	5,38 ; 5,86 ; 6,49 ; 7,41 ; 8,42 ; 10,02 ; 11,87	0,23
3	180°	3	5,38 ; 5,86 ; 6,49 ; 7,41 ; 8,42 ; 10,02 ; 11,87	0,23
4	0°	3	5,15 ; 5,60 ; 6,21 ; 7,09 ; 8,06 ; 9,59 ; 11,36	0,23
4	45°	3	4,96 ; 5,40 ; 5,98 ; 6,83 ; 7,77 ; 9,24 ; 10,94	0,24
3	0°	4	5,33 ; 5,80 ; 6,43 ; 7,34 ; 8,35 ; 9,93 ; 11,76	0,22
3	90°	4	5,33 ; 5,80 ; 6,43 ; 7,34 ; 8,35 ; 9,93 ; 11,76	0,22
3	180°	4	5,33 ; 5,80 ; 6,43 ; 7,34 ; 8,35 ; 9,93 ; 11,76	0,22
4	0°	4	5,29 ; 5,75 ; 6,37 ; 7,28 ; 8,27 ; 9,85 ; 11,66	0,23
4	45°	4	5,02 ; 5,46 ; 6,05 ; 6,91 ; 7,86 ; 9,35 ; 11,07	0,24

Fonte: Autora (2023).

programação de alto nível, predominantemente voltada para cálculos numéricos e reconhecida como uma linguagem de programação científica.

O GNU Octave possui uma sintaxe robusta focada em matemática, que inclui recursos integrados para plotagem e visualização 2D/3D. Geralmente, é empregado para tarefas que incluem resolução de equações lineares e não lineares, condução de álgebra linear numérica, realização de análises estatísticas e execução de diversas simulações numéricas.

O código desenvolvido segrega os dados de tempo em um vetor coluna e atribui os valores instantâneos nas direções X, Y, Z, juntamente com as rotações em torno de cada um desses três eixos, em uma matriz de seis colunas. As rotinas examinam o registro de dados e subsequentemente identificam valores máximos e mínimos, calculam os valores absolutos desses extremos, organizam-nos em ordem decrescente e depois calculam a média dos 10% superiores desses valores.

As amplitudes de resposta adimensional mais altas (A_x/D e A_y/D) são assim determinadas pela média dos 10% superiores dos valores adimensionais, usando o diâmetro de um único cilindro como ponto de referência, e levando em consideração os três registros para cada configuração.

A caracterização da frequência foi realizada por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). A FFT é uma técnica de medição no domínio científico, transformando um sinal em seus componentes espectrais individuais e, assim, oferecendo insights sobre as informações de frequência do sinal.

A Transformada de Fourier é essencialmente um método para representar as características de frequência de uma função, cuja singularidade decorre da sua apli-

cabilidade a qualquer função, seja ela periódica ou não periódica. Este processo não só simplifica a análise de sinais complexos, mas também melhora a compreensão das suas propriedades fundamentais, facilitando uma interpretação mais matizada dos dados sob exame.

A frequência característica dos movimentos é identificada como o pico com maior densidade de potência espectral. Para alinhar com as convenções encontradas na literatura acadêmica, os resultados serão exibidos em formato adimensional, representado pela razão entre a frequência do movimento na direção especificada (X ou Y) e a frequência transversal natural determinada na água, f_y .

3.7 ANÁLISE DE INCERTEZAS

A incerteza de uma medição reflete a questão relativa à confiabilidade de qualquer resultado de medição. A análise de incerteza constitui o método pelo qual é derivada uma estimativa numérica da qualidade da medição, desempenhando um papel crucial na interpretação dos resultados experimentais (ARAÚJO, 2017).

Conseqüentemente, neste estudo, a análise de incerteza foi utilizada para verificar a consistência dos resultados obtidos. Este processo garante que as interpretações e conclusões tiradas dos dados sejam fundamentadas numa compreensão robusta da fiabilidade e precisão da medição.

Dado que as inferências feitas sobre o mensurando serão invariavelmente incompletas, o resultado final de qualquer medição será sempre uma gama de valores, que nunca pode ser condensada num ponto singular. Este intervalo é conhecido como incerteza. A incerteza delinea o nível de (in)completude das informações sobre o mensurando e visa oferecer ao usuário um certo grau de confiança no resultado da medição (ARAÚJO, 2017).

O Guia para a Expressão de Incerteza na Medição (GUM) categoriza as incertezas relacionadas a uma medição em dois tipos com base nos métodos de avaliação: Avaliação do Tipo A – envolve avaliar a incerteza através da análise estatística de uma série de observações repetidas; e avaliação Tipo B – refere-se à avaliação da incerteza por meios alternativos.

As avaliações do Tipo A são realizadas em cenários onde uma medição é realizada repetidamente sob condições idênticas, resultando numa dispersão de valores. As do tipo B são realizadas nos casos em que uma avaliação estatística da incerteza não é viável, mas ainda existem dados metrológicos significativos disponíveis (ARAÚJO, 2017).

A metodologia que facilita a transição dos dados coletados para a formulação de uma afirmação (uma inferência) sobre o mensurando é fundamentada na teoria da probabilidade. As funções matemáticas empregadas neste processo são funções de densidade de probabilidade (f.d.p.) , que delinham a probabilidade de uma variável

aleatória assumir um valor específico dentro de um intervalo designado. Estas funções servem para modelar todas as informações disponíveis sobre um determinado mensurando (ARAÚJO, 2017).

As incertezas do tipo A são caracterizadas por funções de probabilidade gaussianas e são tipicamente aplicadas em cenários que envolvem um conjunto de medições repetidas e dispersas, como é o caso deste estudo. Esta abordagem metodológica aproveita as propriedades das distribuições gaussianas para descrever com precisão a variabilidade inerente aos dados empíricos, facilitando uma quantificação precisa da incerteza com base na dispersão dos dados observados (ARAÚJO, 2017).

A incerteza padrão refere-se à incerteza de um resultado de medição expressa como um desvio-padrão. A largura média da f.d.p. oferece uma medida quantitativa da qualidade deste conhecimento e é denotada como incerteza-padrão, u , definido na Equação (3.2).

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3.2)$$

onde σ é o desvio-padrão da média do conjunto e n é o número de medições repetidas. O cálculo das incertezas para os resultados de amplitude foi realizado com base nos 10% maiores dos picos de cada uma das três repetições.

Pode ser essencial aumentar o nível de confiança no resultado da medição. Essa melhoria é alcançada por meio da incerteza expandida U^* , derivada da multiplicação da incerteza padrão u por uma constante conhecida como fator de abrangência k , de acordo com a Equação (3.3).

$$U^* = k.u \quad (3.3)$$

onde $k > 1$.

Normalmente, k varia de 2 a 3, embora o seu valor preciso dependa do nível de confiança exigido do intervalo. Para este estudo, com intervalo de confiança de 95%, o fator de cobertura k usado para calcular a incerteza expandida para uma distribuição gaussiana é definido como 2 (ARAÚJO, 2017). As incertezas expandidas foram calculadas exclusivamente para amplitudes de resposta, pois estas apresentam um conjunto de dados com um maior número de elementos, melhorando assim os resultados estatísticos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As representações gráficas foram adaptadas especificamente para configurações de interação fluido-estrutura com três ou quatro cilindros caracterizadas por seções transversais quadradas. A categorização aprofundada e a discussão extensa giram em torno dos componentes de amplitude e frequência, abrangendo tanto o movimento do modelo na direção longitudinal quanto transversal ao escoamento do FIM, para cada arranjo de cilindro distinto e vários ângulos de ataque. Esta abordagem abrangente visa proporcionar um exame abrangente dos dados, promovendo uma exploração aprofundada dos resultados.

Esses valores foram representados como funções matemáticas de velocidades reduzidas (V_R), correspondentes à razão de espaçamento (S/L) conforme elaborado na Tabela 3.1 para fins de referência. É essencial compreender a intrincada interação entre esses parâmetros e, ao analisar as representações gráficas, pode-se obter insights mais profundos sobre a interação fluido-estrutura. Neste contexto, uma melhor compreensão da inter-relação entre velocidades reduzidas e razões de espaçamento fornece uma base fundamental para uma discussão mais aprofundada e interpretação dos resultados.

De acordo com Blevins e Coughran (2009), normalmente, o fenômeno de VIM se manifesta com amplitudes de resposta em cerca de um diâmetro, um número que se tornou bem estabelecido para números de Reynolds na faixa de 10^5 . Sua pesquisa elucida ainda mais o impacto dos números de Reynolds nas respostas do sistema, observando uma diminuição notável na amplitude do pico quando este parâmetro cai na faixa de 10^3 .

Apesar das características distintivas como fatores de amortecimento e massas reduzidas presentes no sistema do presente estudo, que divergem daquelas delineadas por Stappenbelt, Lalji e Tan (2007) e Blevins e Coughran (2009), uma comparação qualitativa permanece viável. A razão é que a presença de baixo amortecimento no presente estudo, até certo ponto, contrabalança o efeito de uma relação de massa mais elevada. Consequentemente, a amplitude de resposta de pico resultante é menor que um, alinha-se com os achados documentados na literatura existente, dado o contexto de baixos números de Reynolds, relações de massa elevadas e amortecimento mínimo.

Neste trabalho, as frequências, orientadas longitudinalmente e transversalmente ao escoamento, foram adimensionalizadas pela frequência natural do sistema. A Tabela 4.1 cataloga os experimentos de decaimento realizados em água e, adicionalmente, o amortecimento observado.

Pela Tabela 4.1 a coerência das frequências naturais é observada a medida que a massa adicional aumenta conforme o número de cilindros aumenta. É também

Tabela 4.1 – Teste de Decaimento e valores de amortecimento (ζ)

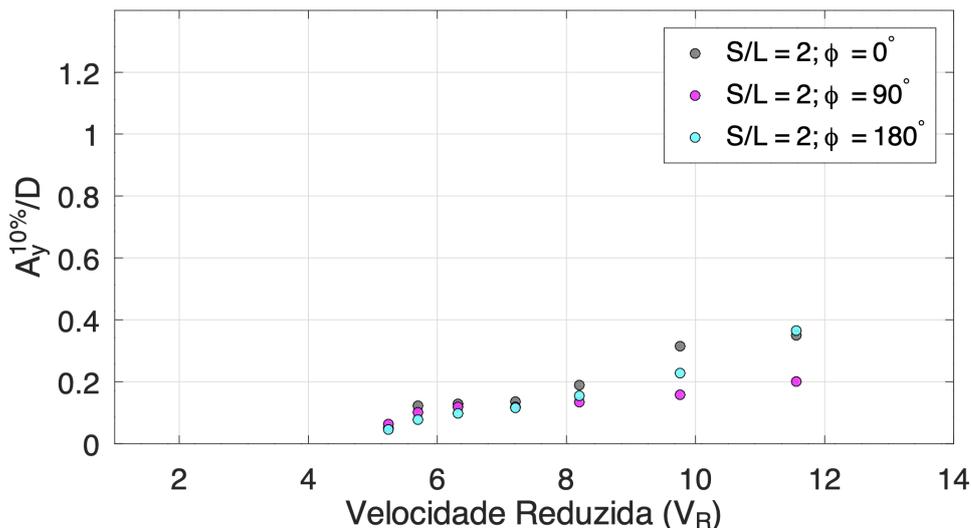
Arranjo	S/L	ϕ (graus)	f_n (Hz)	ζ_y (%)	ζ_x (%)
3	2	0, 90 e 180	0,2537	6,72	7,32
3	3	0, 90 e 180	0,2537	7,14	7,48
3	4	0, 90 e 180	0,2537	6,49	6,50
4	2	0	0,2537	5,02	7,71
4	2	45	0,2880	5,36	5,03
4	3	0	0,2537	6,35	5,66
4	3	45	0,2880	5,31	5,19
4	4	0	0,2537	7,00	6,69
4	4	45	0,2880	5,71	6,57

Fonte: Autora (2024).

evidente que, independentemente da configuração, os níveis de amortecimento permanecem baixos.

Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, nos aprofunda-se no exame de amplitudes adimensionais associadas a movimentos na direção transversal ao escoamento, $A_y^{10\%}/D$, para arranjos de três cilindros. Especificamente, a Figura 4.1 aborda o cenário onde $S/L = 2$, enquanto a Figura 4.2 corresponde à condição com $S/L = 3$. Continuando a progressão, a Figura 4.3 explora a configuração onde $S/L = 4$.

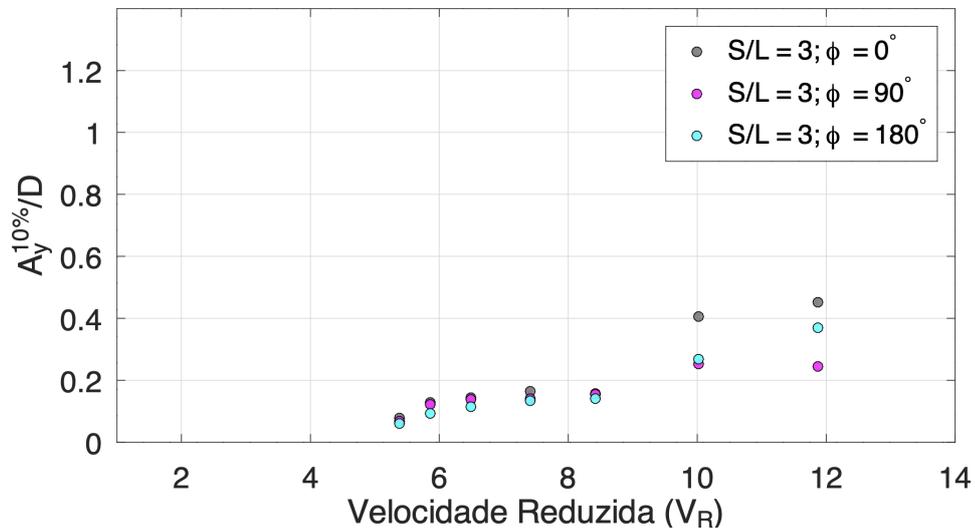
Figura 4.1 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 2$



Fonte: Autora (2024).

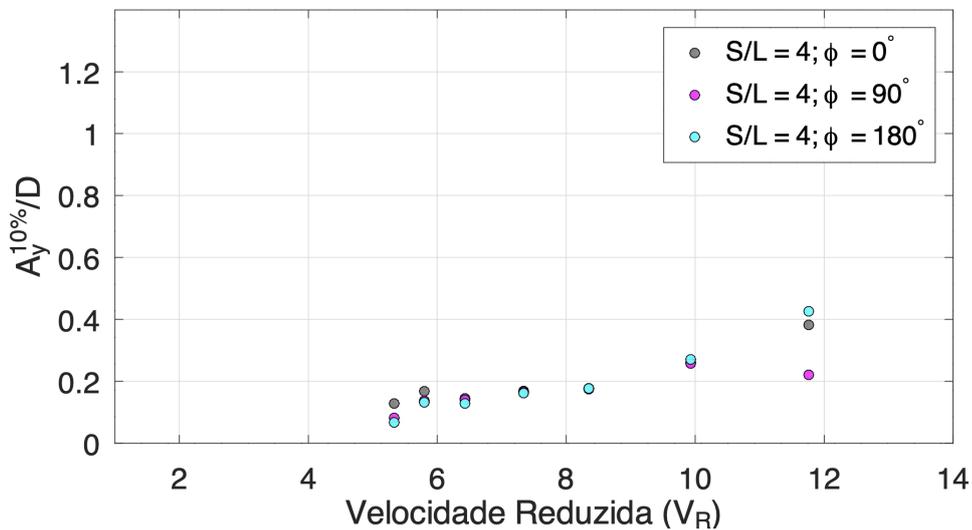
Uma observação derivada desses resultados (Figuras 4.1, 4.2 e 4.3) é a proeminência de amplitudes significativas no contexto do FIM na direção do escoamento

Figura 4.2 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 3$



Fonte: Autora (2024).

Figura 4.3 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 4$



Fonte: Autora (2024).

transversal. Para ser mais preciso, os maiores valores de $A_y^{10\%}/D$ estão concentradas na faixa de velocidade reduzida $10 < V_R < 11,87$.

Esta tendência específica destaca os atributos únicos das FIM dentro desta estrutura estrutural, elucidando os intercâmbios dinâmicos entre o escoamento e os elementos estruturais. Achados relativos às variações de amplitude na direção perpendicular ao escoamento confirmam a presença de fenômenos ressonantes de VIM de

em plataformas SSP de O&G e FOWT do tipo SS.

Com o espaçamento três (Figura 4.1, 4.2 e 4.3), independente da razão de espaçamento (S/L) apresentando as maiores amplitudes na direção transversal ao escoamento, $A_y^{10\%}/D$, as observações revelam um comportamento distinto relacionado ao espaçamento entre estruturas. Uma relação de espaçamento menor, $S/L = 2$ (Figura 4.1) faz com que o arranjo se comporte mais semelhante a uma estrutura de monocolumna, caracterizada pelo VIM.

Por outro lado, uma maior razão de espaçamento, $S/L = 4$ (Figura 4.3), tende a um comportamento semelhante ao observado na configuração de Gonçalves et al. (2020b), marcada por um aumento mais gradual. Esta delimitação sublinha o impacto significativo do espaçamento na resposta dinâmica das estruturas ao escoamento, destacando a interação matizada entre o arranjo e os movimentos induzidas pelo escoamento.

Em relação às amplitudes adimensionais $A_y^{10\%}/D$, conforme ilustrado nas Figuras 4.2 e 4.3, para cenários onde S/L é igual a 3 e 4, percebem-se pequenas amplitudes em velocidades reduzidas abaixo de 8 e observam-se amplitudes moderadas além deste limite. Este delineamento marca uma transição gradual dos mecanismos de matriz tandem para aqueles de uma monocolumna. Por outro lado, em situações onde $S/L = 2$ (Figura 4.1), todo o espectro de velocidade V_R exibe pequenas amplitudes.

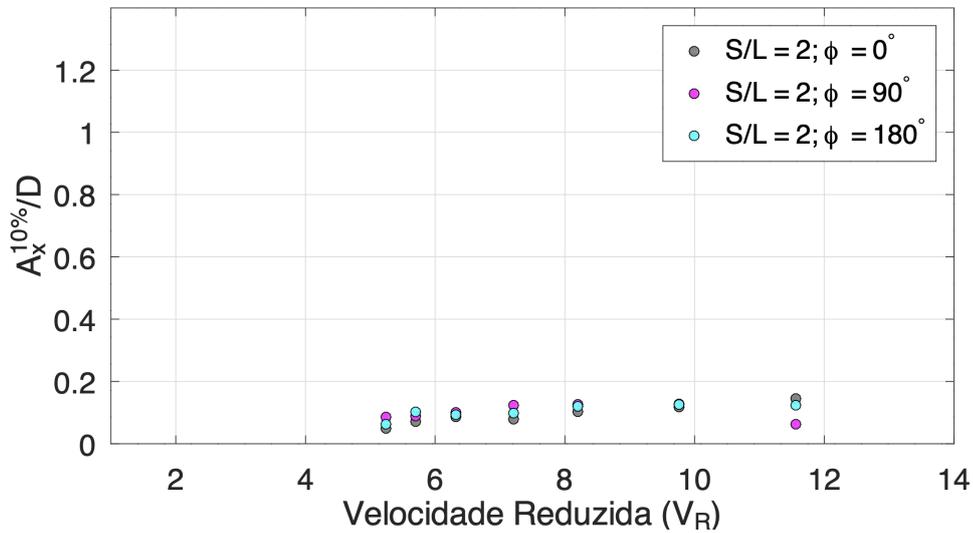
Quando foca-se no cenário onde $S/L = 4$ (Figura 4.3), ângulo de ataque 90 graus, podemos observar que amplitudes moderadas estão consistentemente presentes em toda a faixa de valores de V_R . As transições entre os mecanismos de arranjos em tandem e o comportamento de uma monocolumna são mais graduais neste caso. Para $S/L = 3$ (Figura 4.2), ângulo de ataque 90 graus, o mecanismo em tandem torna-se mais proeminente, com amplitudes maiores evidentes em valores mais baixos de V_R , fornecendo informações valiosas sobre a dinâmica deste arranjo.

Quando a relação $S/L = 2$ (Figura 4.1), os mecanismos observados apresentam uma diminuição ou um aumento à medida que os cilindros são aproximados ou afastados, respectivamente. Neste cenário, um mecanismo de monocolumna surge como fator dominante, mas a configuração tandem permanece presente.

Nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, realiza-se uma exploração detalhada das amplitudes adimensionais ligadas aos movimentos na direção longitudinal do escoamento, com foco nas configurações de arranjos de três cilindros. A Figura 4.4 é dedicada a examinar o cenário onde $S/L = 2$. Já Figura 4.5 investiga a configuração $S/L = 3$. Enquanto a Figura 4.6 investiga o arranjo onde $S/L = 4$.

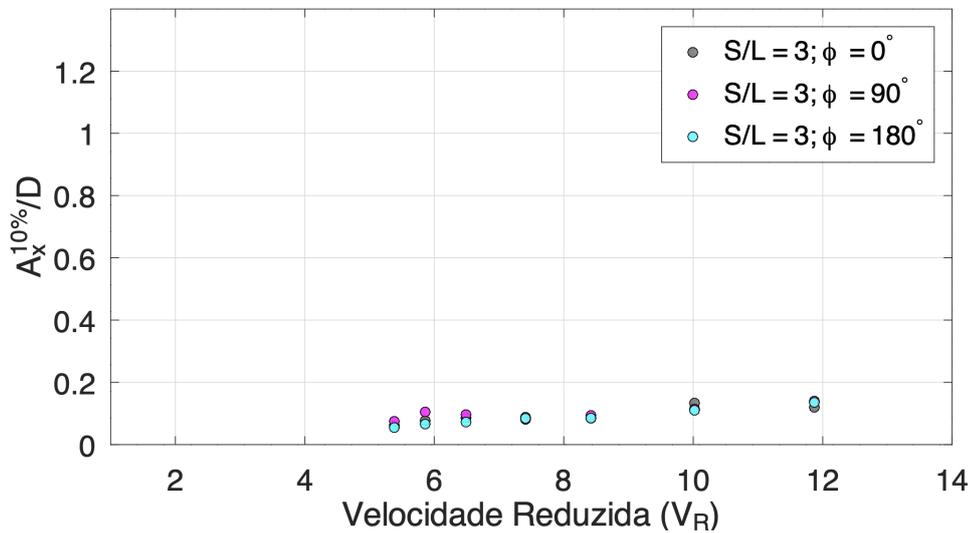
Independentemente do ângulo de incidência, vale a pena notar que as amplitudes adimensionais na direção longitudinal, representadas por $A_x^{10\%}/D$, apresentam características consistentes em várias distâncias relativas entre cilindros, conforme representado nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6. Este comportamento consistente é indicativo

Figura 4.4 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 2$



Fonte: Autora (2024).

Figura 4.5 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 3$

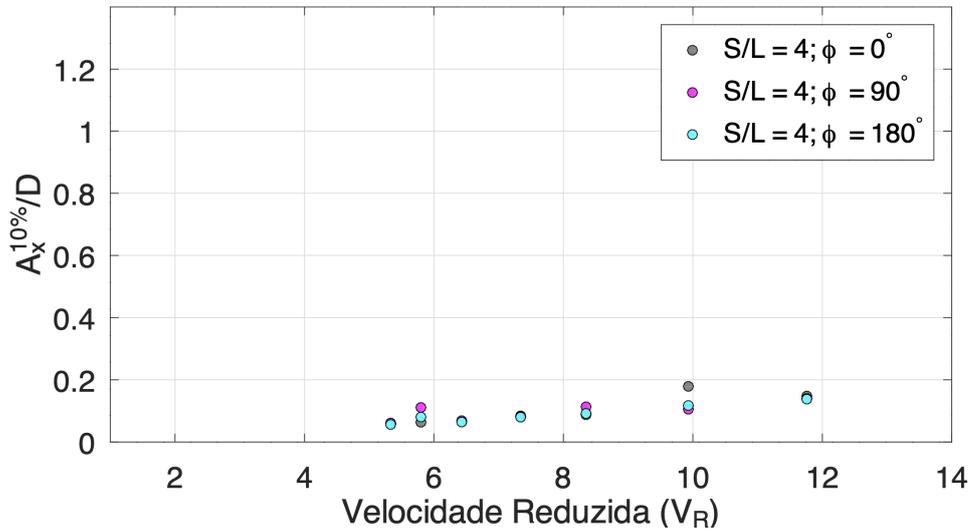


Fonte: Autora (2024).

da robustez da resposta do sistema, independentemente do arranjo espacial e apoia ainda mais a nossa compreensão da interação entre fluido e estrutura. Adicionalmente, observa-se que independente do valor da razão de espaçamento (S/L) e do ângulo de ataque (ϕ), a amplitude máxima, $A_x^{10\%}/D$, não ultrapassa 0,2.

Nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, é realizado um exame das frequências adimensionais associadas aos movimentos transversal à direção do escoamento, visando especifi-

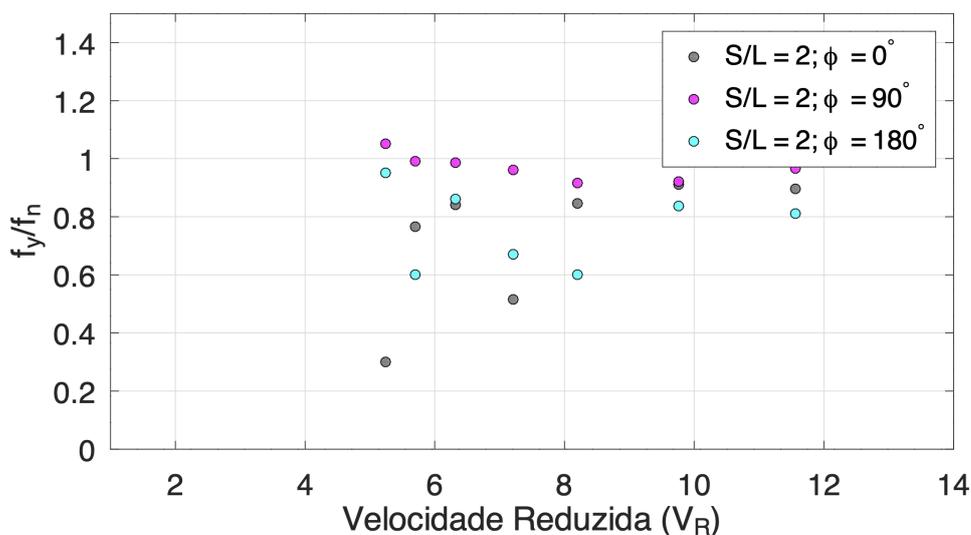
Figura 4.6 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 4$



Fonte: Autora (2024).

camente as configurações que envolvem arranjos de três cilindros. A Figura 4.7 se aprofunda na análise do cenário $S/L = 2$. Enquanto isso, a Figura 4.8 está focada em explorar $S/L = 3$. Além disso, a Figura 4.9 examina $S/L = 4$.

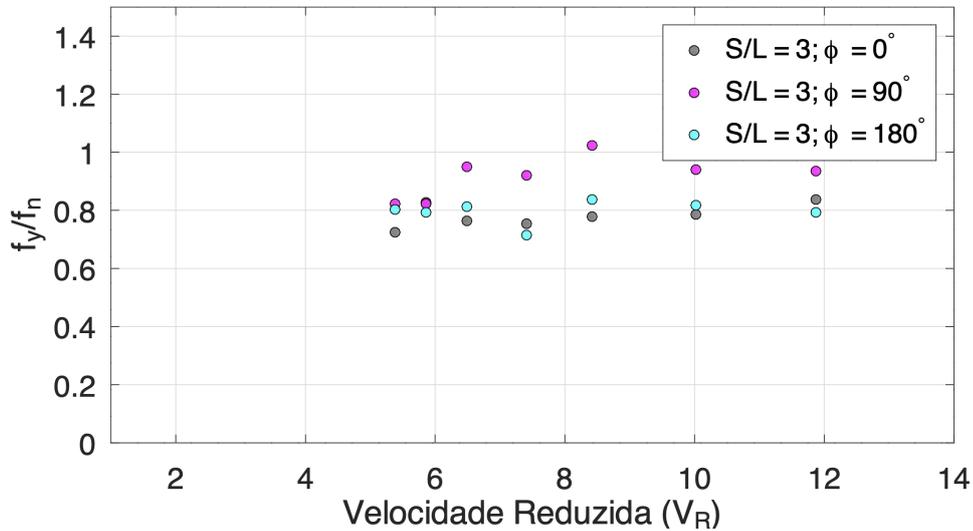
Figura 4.7 – Frequência adimensional para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 2$



Fonte: Autora (2024).

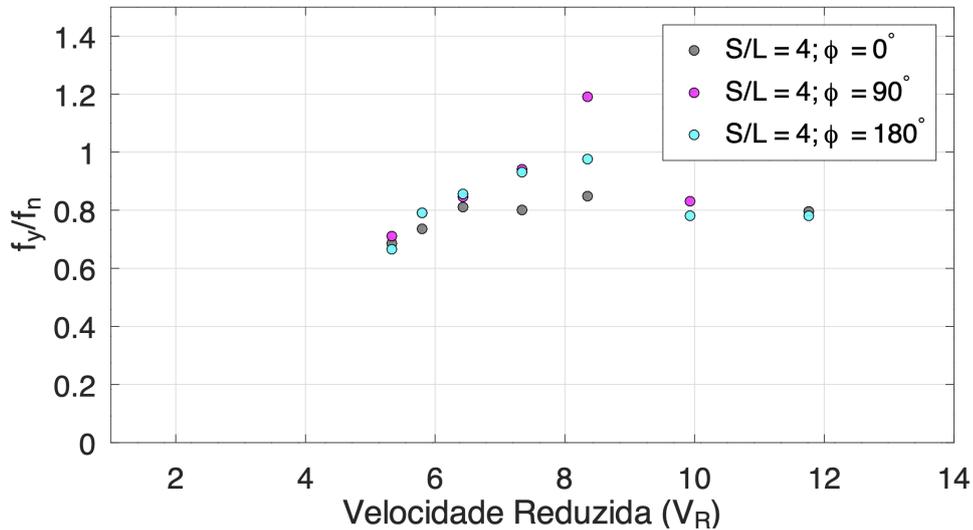
Os gráficos de frequência adimensionais, conforme representados na Figura

Figura 4.8 – Frequência adimensional para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 3$



Fonte: Autora (2024).

Figura 4.9 – Frequência adimensional para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 4$



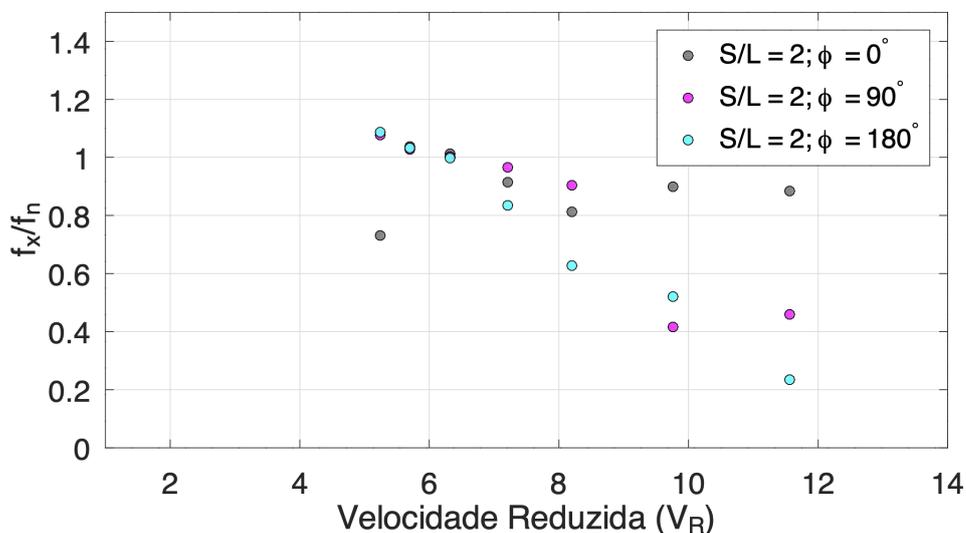
Fonte: Autora (2024).

4.7, $S/L = 2$ e nas Figuras 4.13 (b) e 4.14 (b), parecem sugerir um fenômeno potencial de dessincronização ocorrendo dentro da faixa de $7 < V_R < 8$ quando $\phi = 0$ e 180 graus. Esta observação intrigante aponta para a necessidade de uma investigação mais abrangente, que pode envolver a realização de experimentos de Velocimetria de Imagem de Partículas (PIV) e/ou aprofundamento em simulações de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), a fim de esclarecer a dinâmica subjacente e os

mecanismos em jogo durante esta faixa de velocidade específica.

Nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12, observa-se uma investigação aprofundada das frequências adimensionais que são inerentes aos movimentos que ocorrem na direção longitudinal ao escoamento, particularmente no âmbito de arranjos de três cilindros. A Figura 4.10 está centrada principalmente no cenário denominado $S/L = 2$. Por outro lado, a Figura 4.11 mostra a configuração $S/L = 3$. Seguindo para a Figura 4.12, o foco passa a ser a análise da razão de espaçamento $S/L = 4$.

Figura 4.10 – Frequência adimensional para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 2$



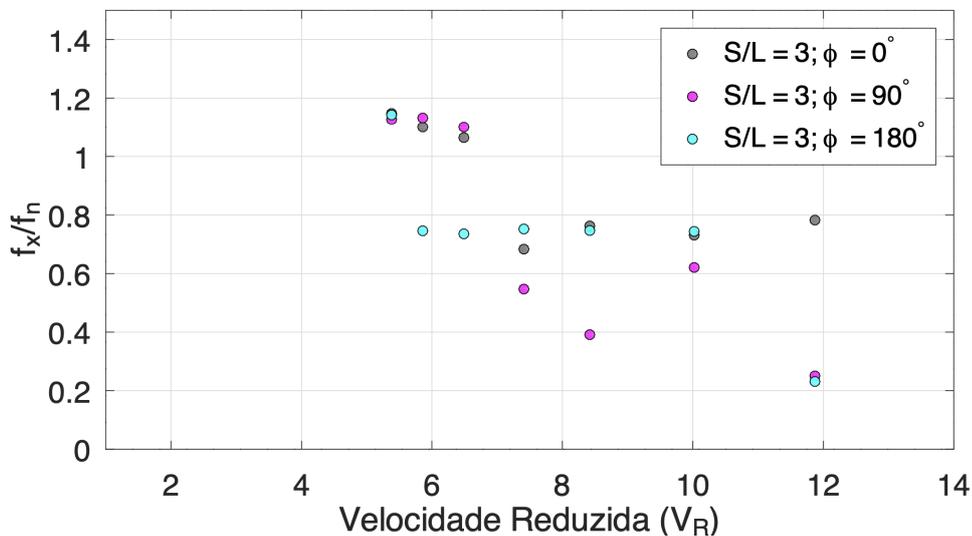
Fonte: Autora (2024).

Conforme representado nas Figuras 4.8 e 4.9 e nas Figuras 4.11 e 4.12, para razão S/L de 3 e 4, e ângulo de ataque 90 graus, parece haver dois mecanismos ressonantes predominantes, um relativo ao par de cilindros alinhados em tandem, e o outro relativo a uma monocoluna. Quando a relação S/L diminui para 2 (Figuras 4.7 e Figuras 4.10), a proximidade dos cilindros sugere que eles se combinam essencialmente para agir como uma entidade unificada, resultando em um FIM semelhante ao observado em uma monocoluna.

Ao comparar os resultados dos arranjos de três cilindros detalhados neste estudo, torna-se evidente que eles apresentam comportamento qualitativamente semelhante ao relatado por (GONÇALVES et al., 2020b). Nota-se que configurações com espaçamentos maiores demonstram maiores amplitudes na direção transversal ao escoamento.

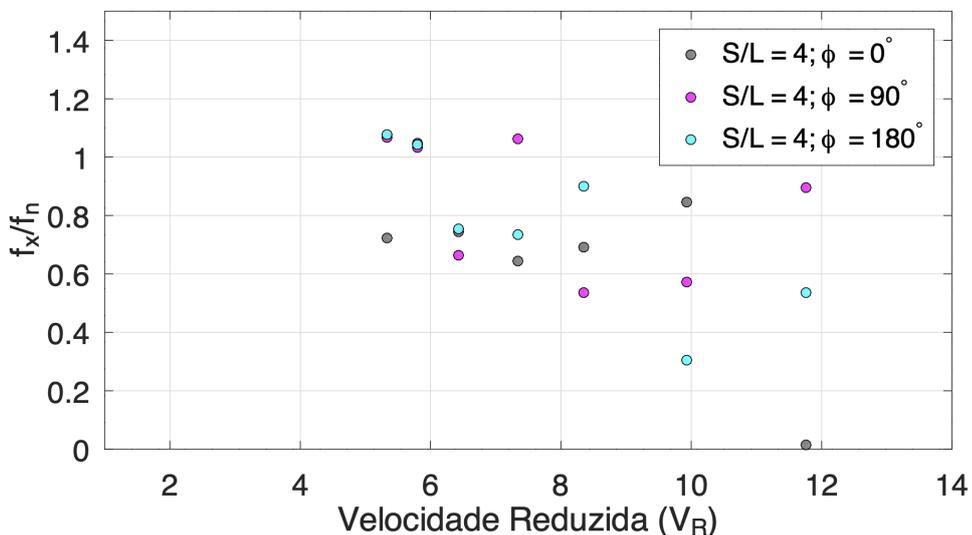
Todas as figuras pertencentes às configurações de três cilindros apresentadas neste trabalho serão representadas posteriormente nas imagens a seguir, organiza-

Figura 4.11 – Frequência adimensional para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 3$



Fonte: Autora (2024).

Figura 4.12 – Frequência adimensional para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 3 cilindros com $S/L = 4$



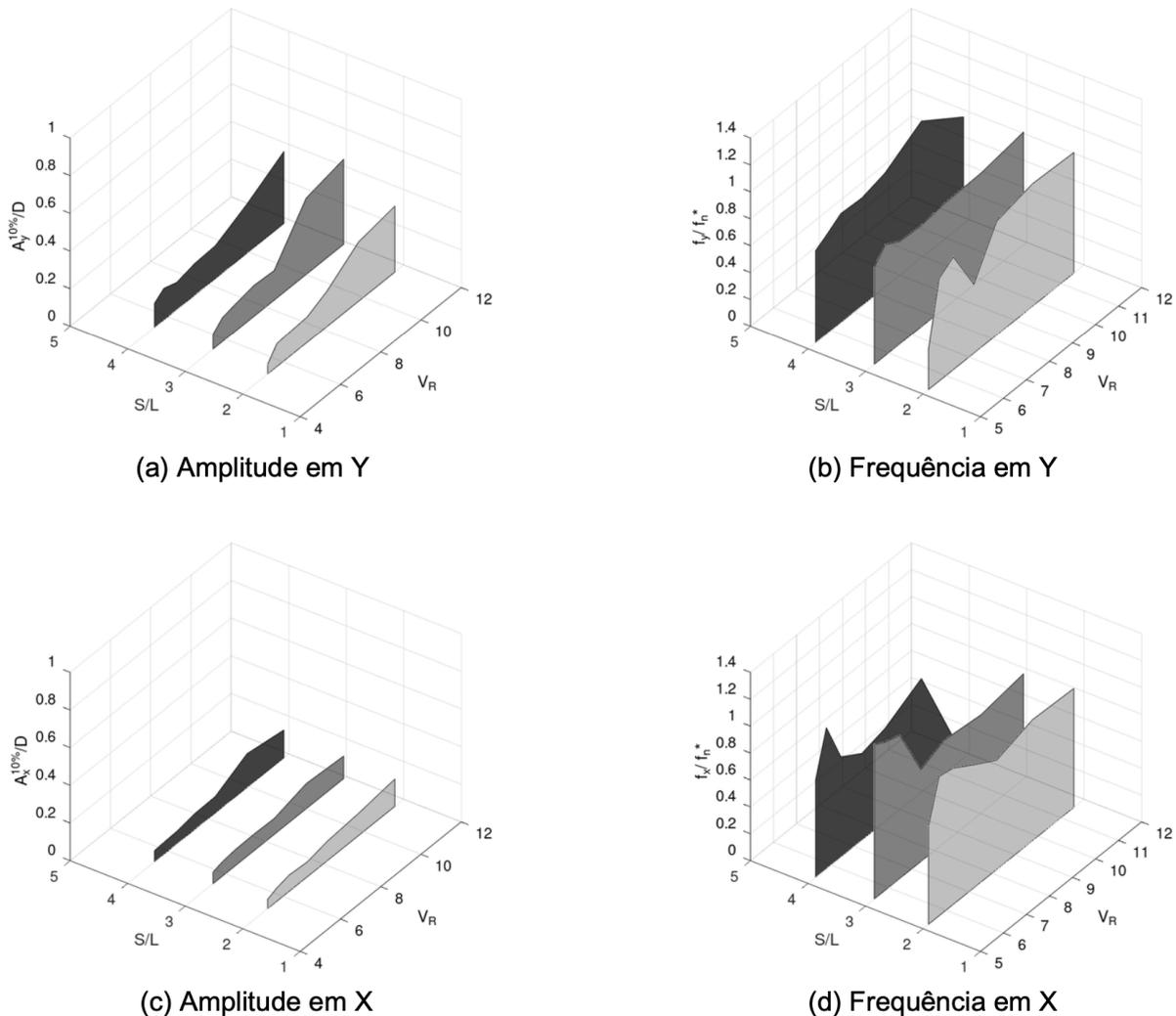
Fonte: Autora (2024).

das com base no ângulo de ataque. Esta abordagem visa apresentar os dados em formato estruturado, aumentando a coerência, a clareza e a profundidade analítica do estudo sobre a interação fluido-estrutura, mantendo a essência do conteúdo original, ao mesmo tempo que oferece uma perspectiva diferente sobre os arranjos através das lentes dos ângulos de ataque.

Na Figura 4.13, pode-se discernir as amplitudes adimensionais $A_y^{10\%}/D$ e

$A_x^{10\%}/D$ nos painéis (a) e (c), juntamente com as frequências adimensionais $f_y^* = f_y/f_n$ e $f_x^* = f_x/f_n$ nos painéis (b) e (d). Esses gráficos estão associados a uma configuração composta por três cilindros de seção transversal quadrada, todos alinhados em um ângulo de ataque de 0 grau.

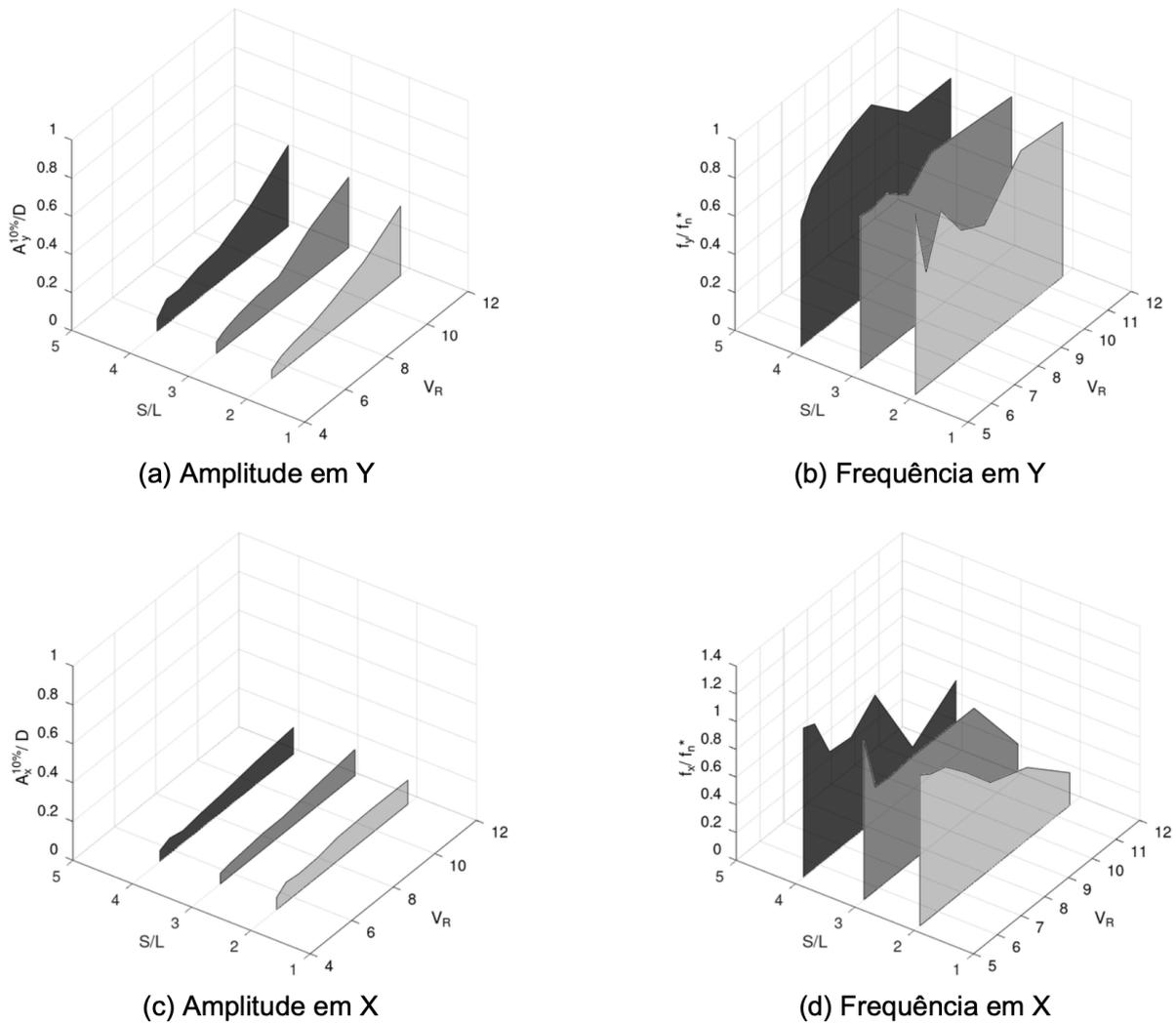
Figura 4.13 – Arranjo de 3 cilindros com $\phi = 0^\circ$: (a) $A_y^{10\%}/D$, (b) $f_y^* = f_y/f_n$, (c) $A_x^{10\%}/D$ e (d) $f_x^* = f_x/f_n$



Fonte: Autora (2024).

Conforme ilustrado na Figura 4.14, torna-se evidente que pode-se perceber as amplitudes adimensionais, denotadas como $A^{10\%}/D$, em ambos os painéis (a) e (c), bem como as frequências adimensionais, especificamente $f_y^* = f_y/f_n$ e $f_x^* = f_x/f_n$, representados nos painéis (b) e (d). Estas constatações estão explicitamente ligadas a uma configuração estrutural constituída por três cilindros de secção quadrada, todos orientados num ângulo de ataque de 180 graus.

Figura 4.14 – Arranjo de 3 cilindros com $\phi = 180^\circ$: (a) $A_y^{10\%}/D$, (b) $f_y^* = f_y/f_n$, (c) $A_x^{10\%}/D$ e (d) $f_x^* = f_x/f_n$



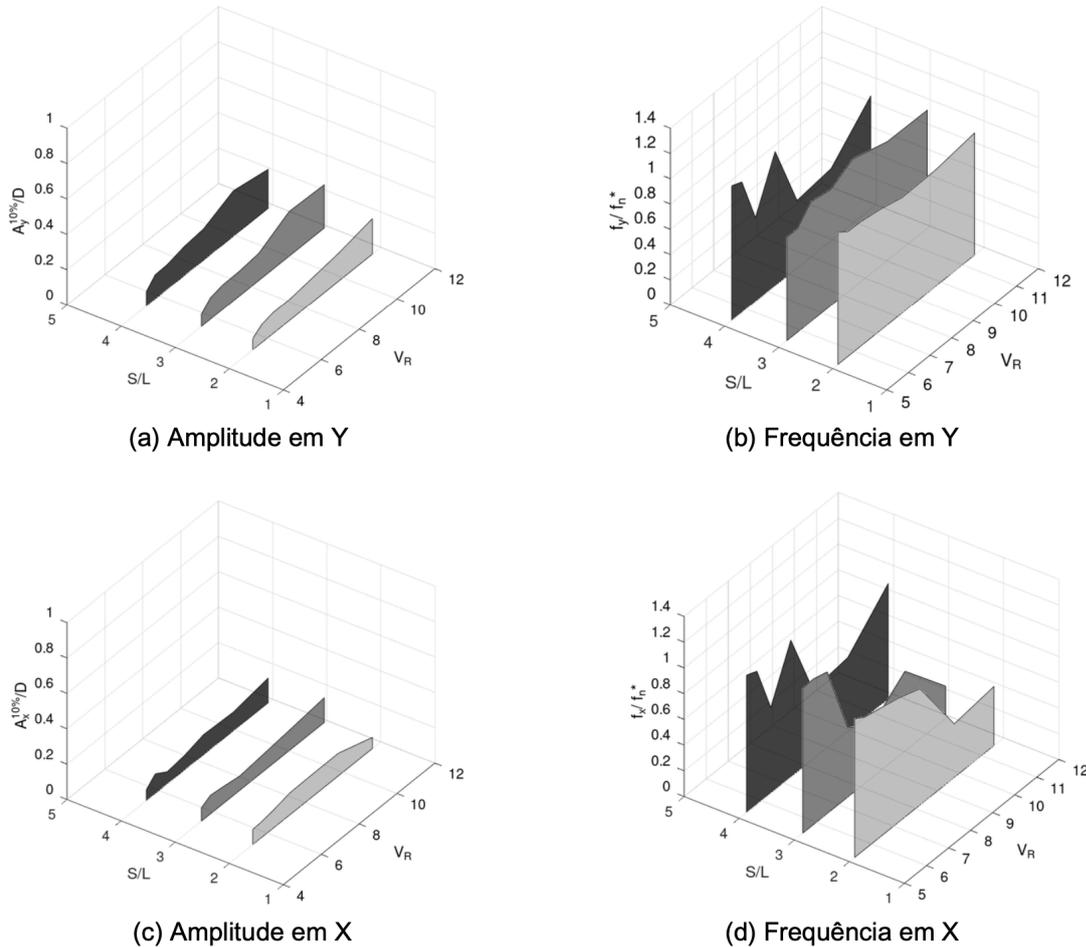
Fonte: Autora (2024).

Na Figura 4.15, pode-se observar a representação de amplitudes adimensionais $A^{10\%}/D$ nos painéis (a) e (c) e frequências adimensionais, denotadas como $f_y^* = f_y/f_n$ e $f_x^* = f_x/f_n$, conforme mostrado nos painéis (b) e (d). Estas descobertas são agora apresentadas considerando um ângulo de ataque de 90 graus. Esta análise refere-se a arranjos com três cilindros com perfis de seção quadrada.

Nas Figuras 4.16, 4.17, e 4.18, uma exploração detalhada é realizada das amplitudes adimensionais relacionadas a movimentos transversais ao escoamento para arranjos quatro cilindros. A Figura 4.16 concentra-se em $S/L = 2$, enquanto a Figura 4.17 investiga $S/L = 3$. Avançando em nosso exame, a Figura 4.18 investiga $S/L = 4$.

Nos arranjos de quatro cilindros quando o ângulo de ataque é de 0 grau (Figuras 4.16, 4.17, e 4.18) as amplitudes adimensionais, $A^{10\%})_y/D$, os valores são inferiores

Figura 4.15 – Arranjo de 3 cilindros com $\phi = 90^\circ$: (a) $A_y^{10\%}/D$, (b) $f_y^* = f_y/f_n$, (c) $A_x^{10\%}/D$ e (d) $f_x^* = f_x/f_n$



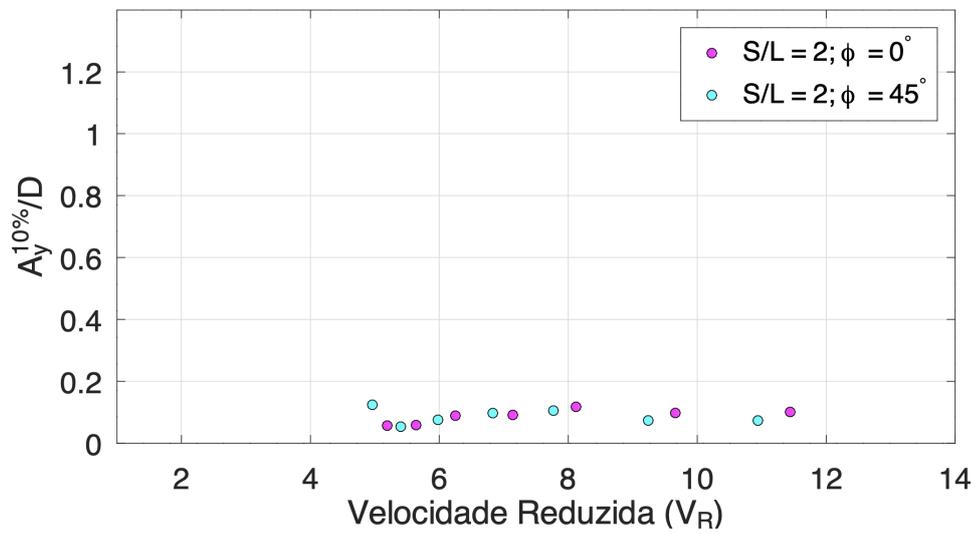
Fonte: Autora (2024).

aos encontrados em arranjos de três cilindros com o mesmo ângulo de ataque ($\phi = 0$ grau) (Figuras 4.1, 4.2 e 4.3). Na Figura 4.16, $S/L = 2$, no ângulo de ataque 0 grau, um pico observado ocorre dentro da faixa de velocidade reduzida, V_R de 7 a 8, exibindo posteriormente um pequeno declínio antes de atingir um estado de estabilização. Este fenômeno é característico de um comportamento de monocolumna.

Ao examinar as amplitudes adimensionais na direção transversal ao escoamento, $A_y^{10\%}/D$, de arranjos de quatro cilindros observa-se variações substanciais. Notavelmente, para configurações com razões de espaçamento de S/L igual a 2 (Figura 4.16), essas amplitudes permanecem abaixo do limite de $A_y^{10\%}/D = 0,2$. No entanto, à medida que a razão de espaçamento aumenta, estas amplitudes sofrem um aumento significativo, caracterizando uma configuração preocupante do ponto de vista operacional de uma SSP de O&G ou de uma FOWT do tipo SS.

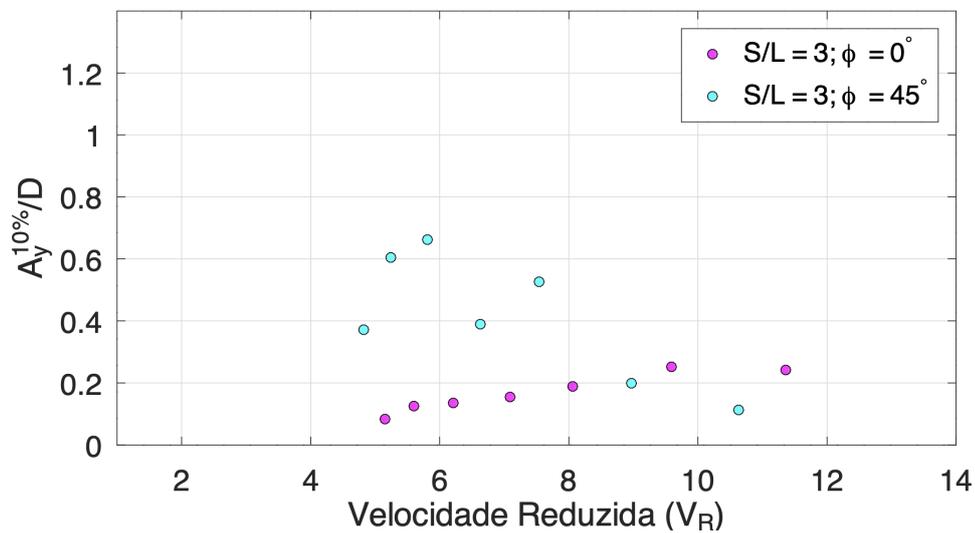
Vale ressaltar que a geometria transita para o formato de diamante quando o ângulo de ataque é de 45 graus (Figuras 4.16, 4.17, e 4.18). Neste ângulo de ataque es-

Figura 4.16 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 2$



Fonte: Autora (2024).

Figura 4.17 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 3$

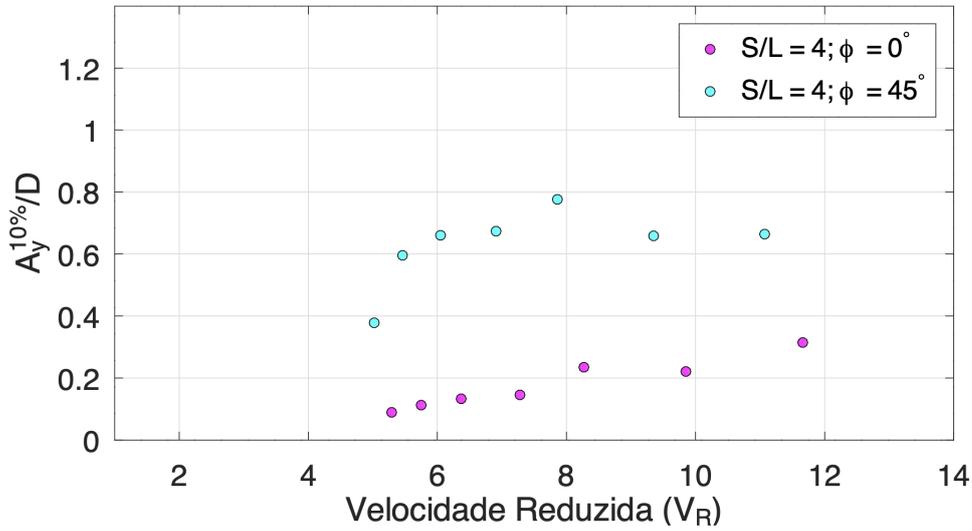


Fonte: Autora (2024).

pecífico, as maiores amplitudes na direção transversal ao escoamento são observadas em $S/L = 3$ (Figura 4.17) e 4 (Figura 4.18) dentre todas as configurações examinadas neste estudo. Sendo a maior $A_y^{10\%}/D = 0,78$ em $S/L = 3, \phi = 45$ graus (Figura 4.18).

Nas Figuras 4.19, 4.20, e 4.21, é apresentada uma investigação aprofundada sobre as amplitudes adimensionais associadas aos movimentos longitudinais em relação ao escoamento, com foco em configurações de quatro cilindros. A Figura 4.19

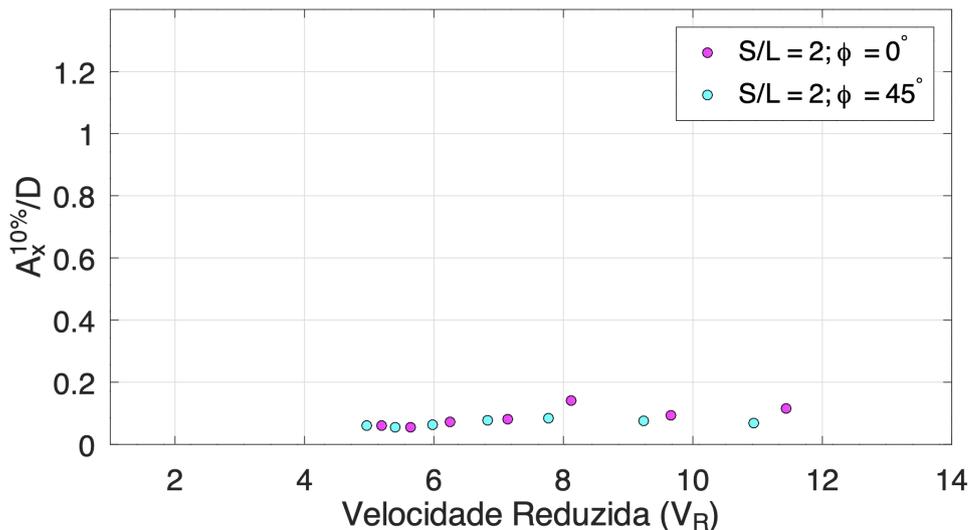
Figura 4.18 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 4$



Fonte: Autora (2024).

mostra $S/L = 2$, a Figura 4.20 explora $S/L = 3$ e uma análise mais aprofundada na Figura 4.21 é dedicada à $S/L = 4$.

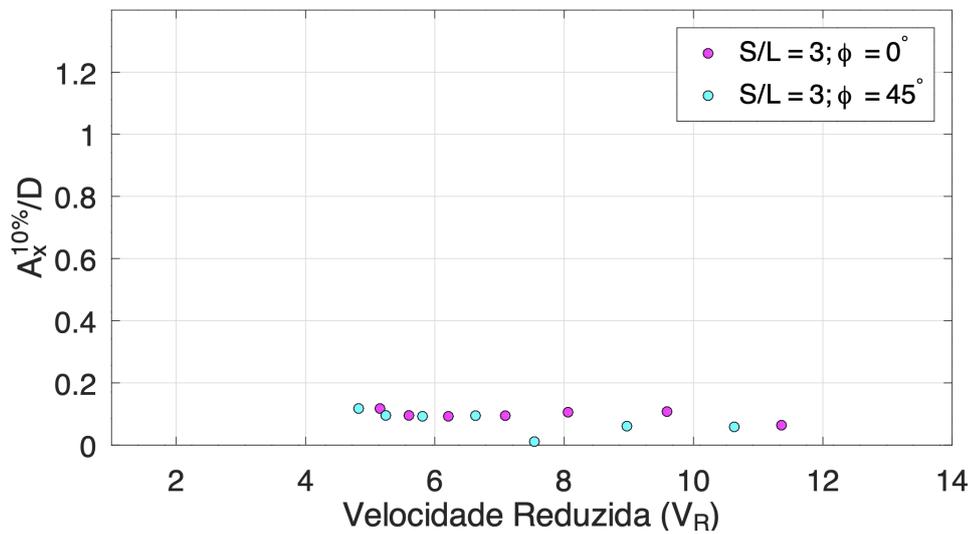
Figura 4.19 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 2$



Fonte: Autora (2024).

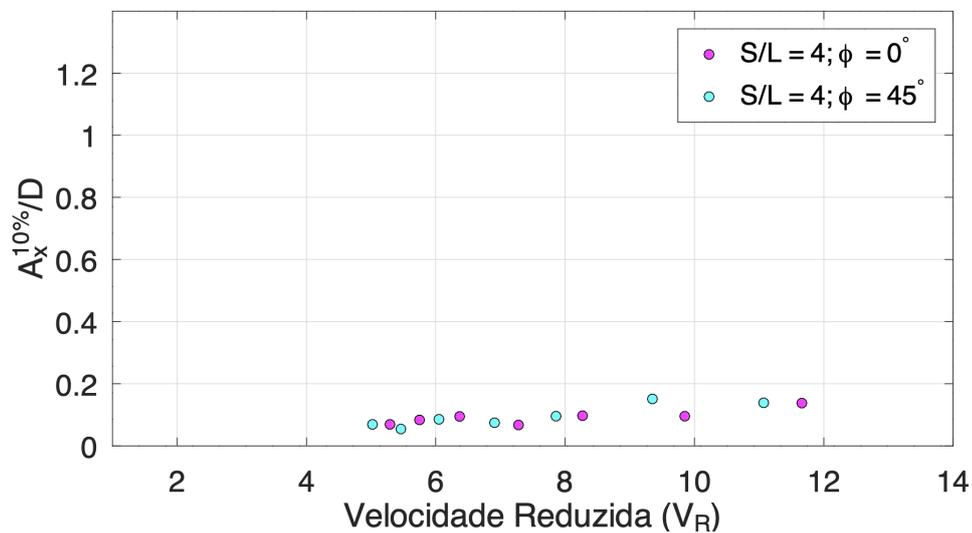
Semelhante aos padrões observados em configurações de três cilindros, as amplitudes adimensionais na direção longitudinal, $A_x^{10\%/D}$, apresentam características

Figura 4.20 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 3$



Fonte: Autora (2024).

Figura 4.21 – Amplitudes adimensionais para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 4$

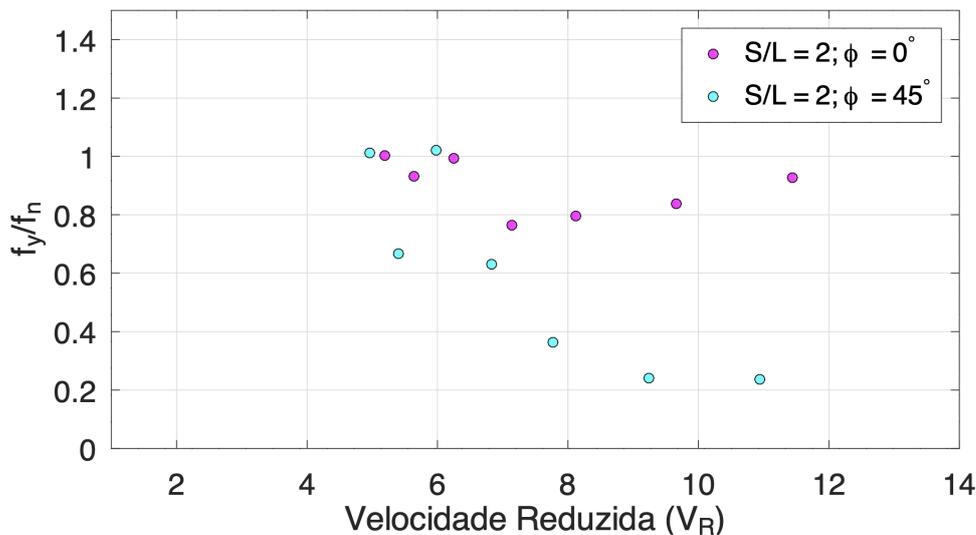


Fonte: Autora (2024).

uniformes nas várias distâncias relativas entre cilindros, conforme ilustrado nas Figuras 4.19, 4.20, e 4.21. Esta uniformidade indica a resposta robusta do sistema, independentemente do arranjo, reforçando ainda mais nossa compreensão da dinâmica da interação fluido-estrutura. Além disso, nota-se que independentemente do valor da razão de espaçamento (S/L) e do ângulo de ataque (ϕ), a amplitude máxima permanece consistentemente abaixo de 0,2.

Nas Figuras 4.22, 4.23 e 4.24, é realizada uma análise das frequências adimensionais relacionadas aos movimentos na direção transversal ao escoamento, nos arranjos de quatro cilindros. A Figura 4.22 está centrada em $S/L = 2$. Ao mesmo tempo, a Figura 4.23 tem como foco $S/L = 3$. Além disso, a Figura 4.24 é dedicada à $S/L = 4$.

Figura 4.22 – Frequência adimensional para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 2$



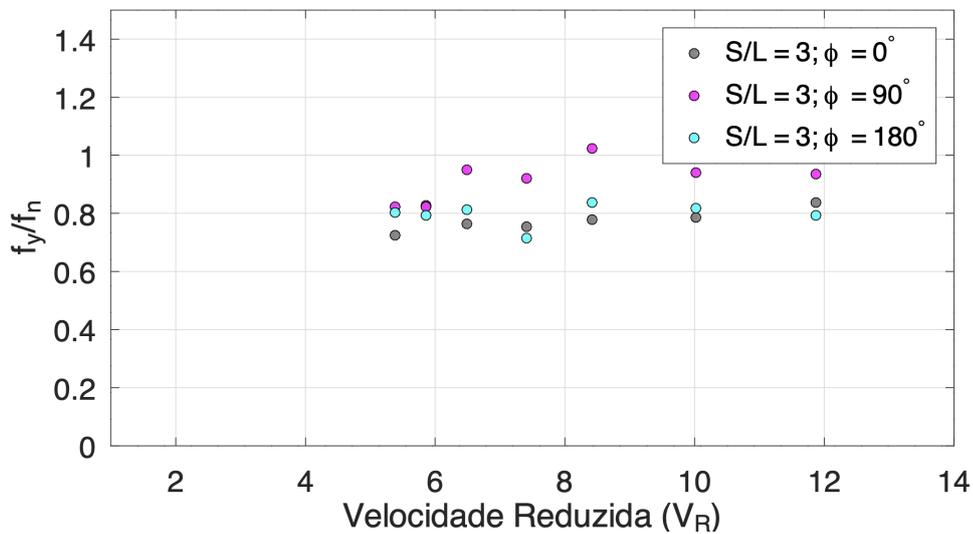
Fonte: Autora (2024).

Nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 é realizado um exame das frequências adimensionais relacionadas aos movimentos na direção longitudinal ao escoamento, especificamente nos arranjos de quatro cilindros. A Figura 4.25 é dedicada à análise de $S/L = 2$. Em contrapartida, a Figura 4.26 visa investigar $S/L = 3$. Progredindo para a Figura 4.27, a ênfase é $S/L = 4$.

Ao comparar os resultados das configurações de quatro cilindros detalhadas neste estudo, fica claro que seus comportamentos refletem qualitativamente aqueles descritos por (GONÇALVES et al., 2020a). Observa-se que configurações com razões de espaçamentos maiores apresentam amplitudes aumentadas na direção transversal em relação ao escoamento em um ângulo de ataque de 45 graus.

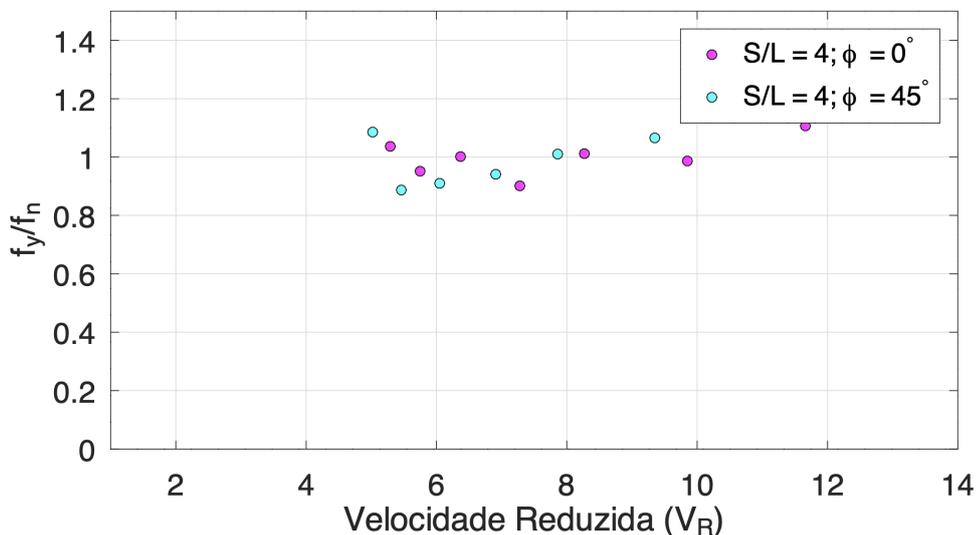
Todas as figuras relacionadas aos arranjos com quatro cilindros apresentadas neste estudo serão posteriormente representadas nas imagens a seguir, categorizadas de acordo com o ângulo de ataque. Este método foi projetado para estruturar a apresentação de dados, aumentando assim a profundidade analítica, clareza e coerência da pesquisa. Preserva a essência do conteúdo original ao mesmo tempo que fornece um ponto de vista alternativo sobre os arranjos através do prisma dos ângulos

Figura 4.23 – Frequência adimensional para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 4 colunas com $S/L = 3$



Fonte: Autora (2024).

Figura 4.24 – Frequência adimensional para os movimentos na direção transversal para o arranjo de 4 colunas com $S/L = 4$

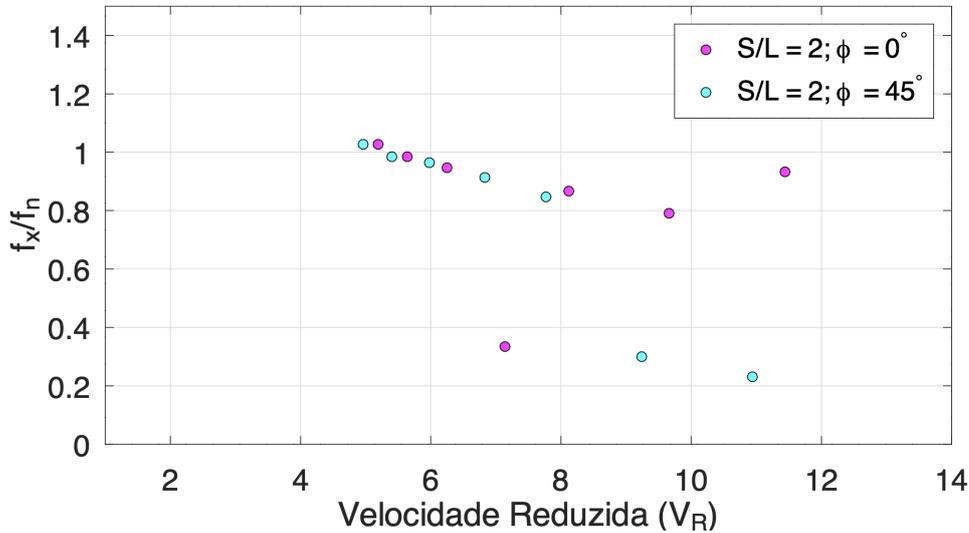


Fonte: Autora (2024).

de ataque.

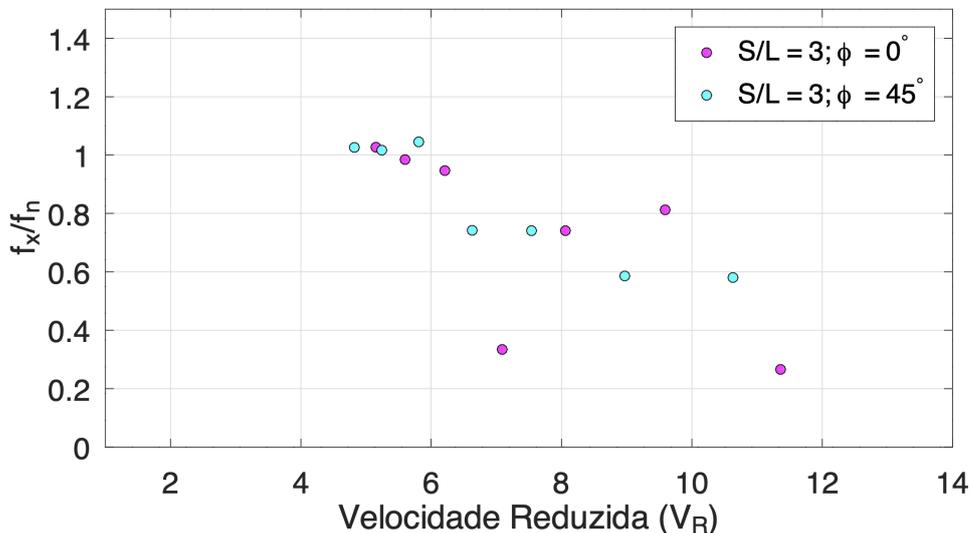
Na Figura 4.28, é apresentada uma representação gráfica das amplitudes adimensionais, $A^{10\%}/D$, designadas como (a) e (c), e das frequências adimensionais, denotadas, $f_y^* = f_y/f_n$ e $f_x^* = f_x/f_n$, apresentadas respectivamente em (b) e (d). Esses dados referem-se às direções de escoamento longitudinal e transversal e estão associados a arranjos de quatro cilindros de perfis de seção quadrada. É importante

Figura 4.25 – Frequência adimensional para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 2$



Fonte: Autora (2024).

Figura 4.26 – Frequência adimensional para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 3$

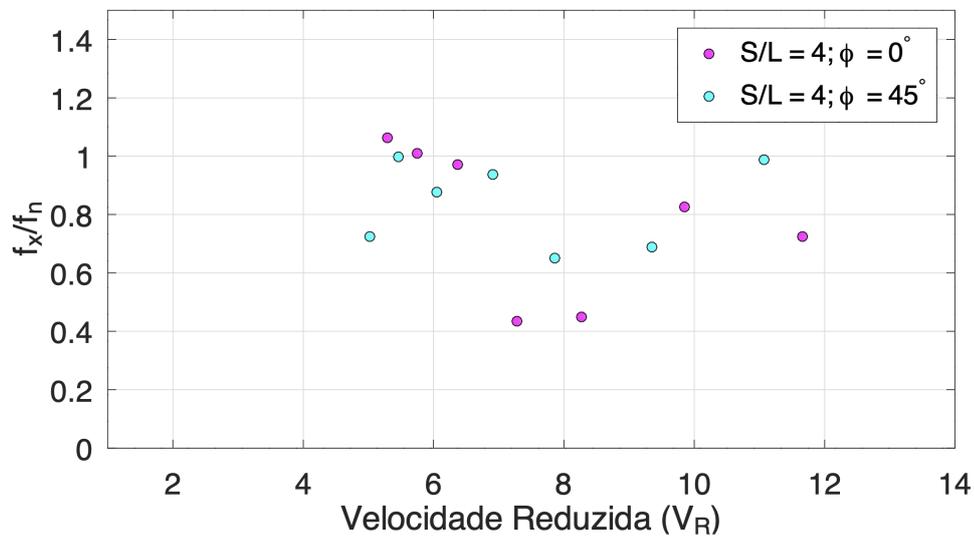


Fonte: Autora (2024).

ressaltar que estas configurações mantêm um ângulo de ataque de 0 grau.

A Figura 4.29 mostra as descobertas relacionadas às amplitudes (painéis a e c) e frequências (painéis b e d) nas direções longitudinais e transversais ao escoamento. Estes resultados estão associados a arranjos caracterizados de quatro cilindros com perfis de seção quadrada. O ângulo de ataque nesta análise é definido em 45 graus. Vale ressaltar que a geometria se transforma em formato de diamante quando o ângulo

Figura 4.27 – Frequência adimensional para os movimentos na direção longitudinal para o arranjo de 4 cilindros com $S/L = 4$



Fonte: Autora (2024).

de ataque é de 45 graus (Figura 3.4 (b)).

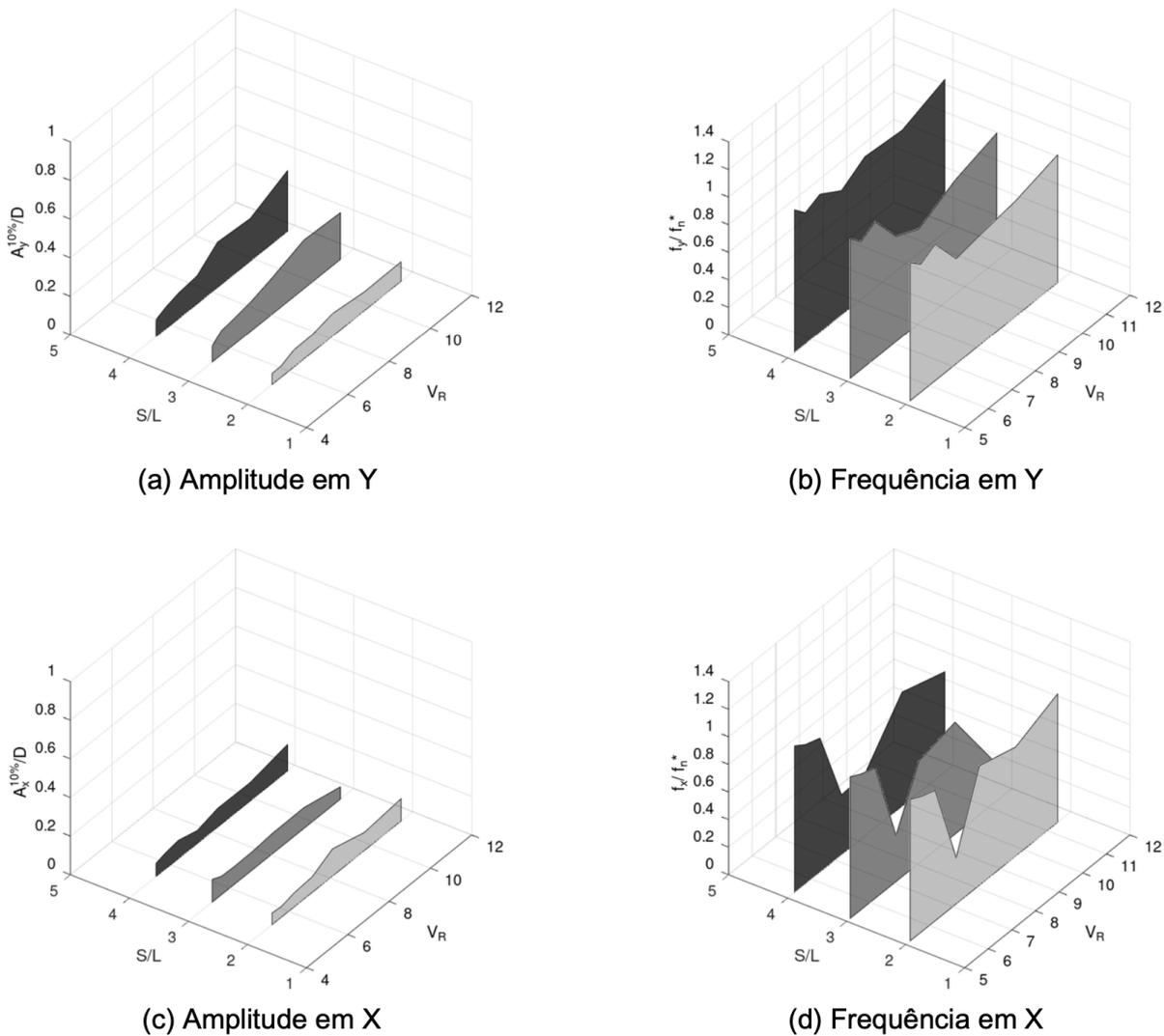
As Figuras 4.30, 4.31 e 4.32 oferecem uma visualização abrangente dos registros temporais detalhando o deslocamento nas direções X e Y, respectivamente longitudinal e transversal ao escoamento. Esses registros pertencem a uma configuração específica de três cilindros com perfis de seção transversal quadrada. Esses registros temporais estão ligados a velocidades reduzidas distintas, especificamente 5, 33, 8, 35 e 11, 76.

No exame de histórico temporal de estruturas expostas ao escoamento, pode-se identificar oscilações periódicas claras que se alinham com frequências características dos modos de Movimento Induzido pelo Escoamento (FIM), consistentes com suas características bem documentados. Dentro desta estrutura, o escoamento instiga a formação de vórtices, levando a forças periódicas que impactam a estrutura e provocam um comportamento oscilatório.

A consistência e os padrões regulares observados nos dados temporais apoiam significativamente a presença do FIM, sublinhando o seu profundo impacto no comportamento da estrutura. Esta observação enfatiza o papel crítico do FIM na formação das respostas dinâmicas de estruturas sob escoamento, reforçando a importância de incorporar tais considerações no estudo de tais estruturas.

A Figura 4.33 representa as trajetórias do plano-XY de duas configurações, a primeira de três cilindros com S/L de 4 em um ângulo de ataque de 0 grau e V_R de 9, 93 e a segunda configuração corresponde a um arranjo de quatro cilindros, uma razão S/L de 4 com um ângulo de ataque de 0 grau e V_R de 9, 85. Em termos destas

Figura 4.28 – Arranjo de 4 cilindros com $\phi = 0^\circ$: (a) $A_y^{10\%}/D$, (b) $f_y^* = f_y/f_n$, (c) $A_x^{10\%}/D$ e (d) $f_x^* = f_x/f_n$



Fonte: Autora (2024).

trajetórias, observa-se uma semelhança qualitativa entre elas.

As Tabelas 4.2 e 4.3 catalogam os resultados de amplitude na direção-Y (transversal ao escoamento), $A_y^{10\%}/D$ e na direção-X (longitudinal ao escoamento), $A_x^{10\%}/D$. Eles são aqui apresentados para facilitar as discussões sobre análise de incerteza, visto que a incerteza invariavelmente acompanha a média das medições realizadas, respectivamente, para os dados A_y/D e A_x/D .

Dado que este estudo se baseia numa metodologia experimental, foi realizada uma análise de incerteza para verificar a fiabilidade dos resultados obtidos. Como os resultados numéricos são expressos como uma razão para o diâmetro de um cilindro, as incertezas foram igualmente quantificadas usando esta razão, garantindo que os valores sejam mantidos na mesma ordem de grandeza, mas sejam adimen-

Tabela 4.2 – Médias dos 10% maiores picos na direção-Y, $A_y^{10\%}/D$, nas diferentes profundidades

Arranjo	ϕ	S/L	Profundidade (mm)						
			150	175	200	225	250	275	300
			$A_y^{10\%}/D$						
3	0°	2	0,0510	0,1225	0,1286	0,1357	0,1892	0,3149	0,3498
3	90°	2	0,0653	0,1015	0,1191	0,1191	0,1342	0,1580	0,2007
3	180°	2	0,0457	0,0776	0,0978	0,1158	0,1548	0,2280	0,3652
4	0°	2	0,0571	0,0587	0,0891	0,0915	0,1177	0,0979	0,1066
4	45°	2	0,1243	0,0537	0,0757	0,0974	0,1054	0,0733	0,0734
3	0°	3	0,0783	0,1286	0,1440	0,1646	0,1574	0,4057	0,4519
3	90°	3	0,0679	0,1222	0,1383	0,1410	0,1545	0,2527	0,2447
3	180°	3	0,0605	0,0931	0,1147	0,1341	0,1410	0,2682	0,3696
4	0°	3	0,0835	0,1254	0,1355	0,1547	0,1888	0,2052	0,2418
4	45°	3	0,3716	0,6045	0,6521	0,3894	0,5262	0,1991	0,1129
3	0°	4	0,1283	0,1679	0,1448	0,1687	0,1746	0,2609	0,3821
3	90°	4	0,0817	0,1373	0,1402	0,1655	0,1773	0,2574	0,2209
3	180°	4	0,0673	0,1321	0,1285	0,1619	0,1768	0,2706	0,4260
4	0°	4	0,0893	0,1126	0,1331	0,1456	0,2348	0,2210	0,3145
4	45°	4	0,3781	0,5955	0,6602	0,6735	0,7760	0,6584	0,6640

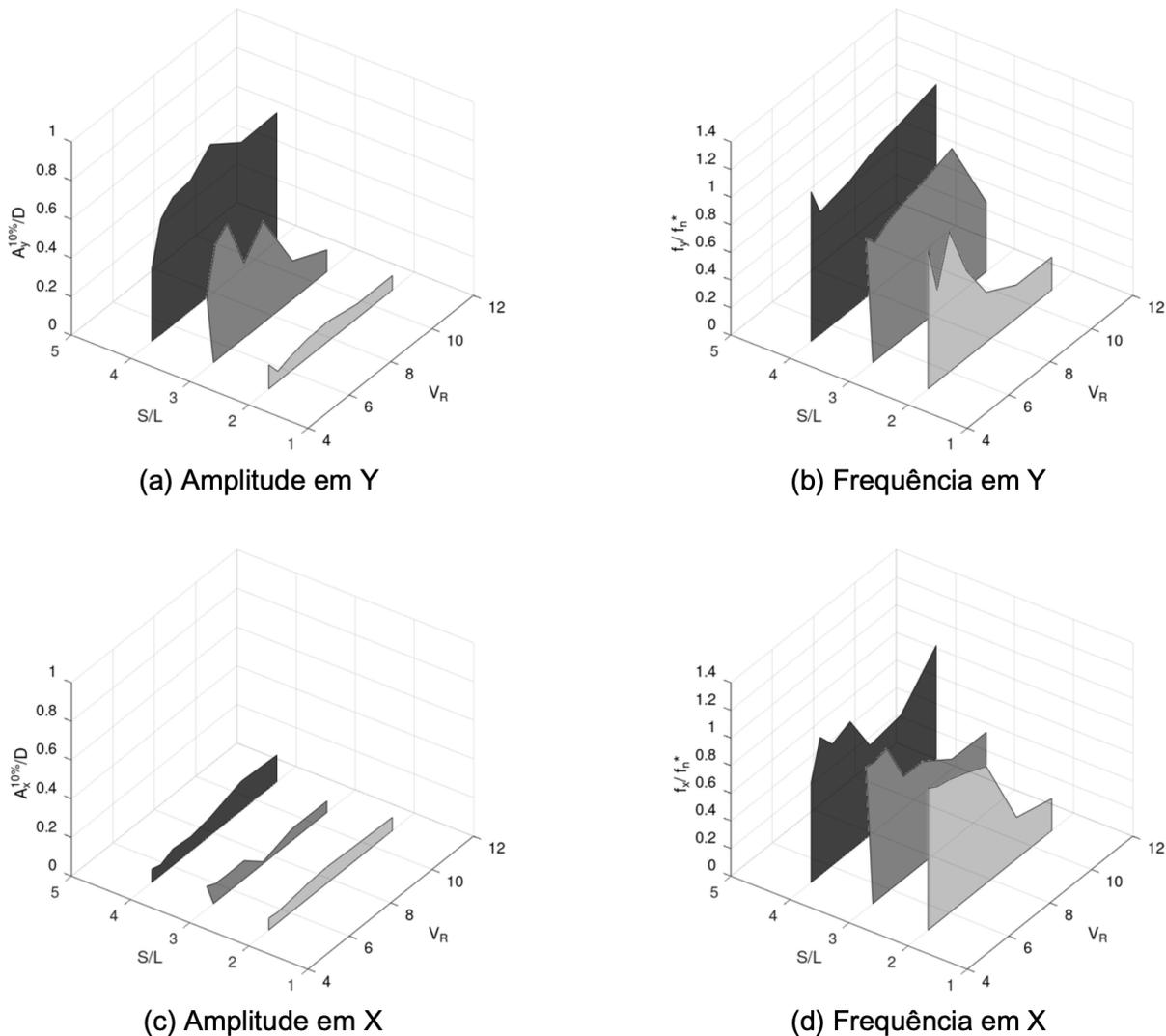
Fonte: Autora (2023).

Tabela 4.3 – Médias dos 10% maiores picos na direção-X, $A_x^{10\%}/D$

Arranjo	ϕ	S/L	Profundidade (mm)						
			150	175	200	225	250	275	300
			$A_x^{10\%}/D$						
3	0°	2	0,0492	0,0710	0,0864	0,0788	0,1029	0,1180	0,1452
3	90°	2	0,0859	0,0881	0,0888	0,1006	0,1237	0,1264	0,1278
3	180°	2	0,0627	0,1023	0,0933	0,0984	0,1202	0,1259	0,1237
4	0°	2	0,0606	0,0552	0,0724	0,0812	0,1410	0,0935	0,1156
4	45°	2	0,0679	0,0552	0,0633	0,0775	0,0843	0,0757	0,0686
3	0°	3	0,0614	0,0769	0,0856	0,0880	0,0847	0,1335	0,1198
3	90°	3	0,0748	0,1050	0,0964	0,0811	0,0938	0,1144	0,1399
3	180°	3	0,0548	0,0660	0,0724	0,0844	0,0852	0,1100	0,1355
4	0°	3	0,1176	0,0954	0,0926	0,0947	0,1057	0,1078	0,0586
4	45°	3	0,0473	0,0772	0,0633	0,0745	0,1123	0,0609	0,0586
3	0°	4	0,0595	0,0635	0,0666	0,0841	0,0875	0,1789	0,1478
3	90°	4	0,0611	0,1110	0,0686	0,0820	0,1132	0,1054	0,1401
3	180°	4	0,0563	0,0803	0,0641	0,0799	0,0917	0,1174	0,1379
4	0°	4	0,0692	0,0836	0,0948	0,0673	0,0972	0,0956	0,1377
4	45°	4	0,0468	0,0543	0,0856	0,0745	0,0957	0,1512	0,1386

Fonte: Autora (2023).

Figura 4.29 – Arranjo de 4 cilindros com $\phi = 45^\circ$: (a) $A_y^{10\%}/D$, (b) $f_y^* = f_y/f_n$, (c) $A_x^{10\%}/D$ e (d) $f_x^* = f_x/f_n$



Fonte: Autora (2024).

sionais. As Tabelas 4.4 e 4.5 enumeram os resultados da média das 10% principais de incertezas expandidas na direção-Y (transversal ao escoamento), $u(A_y^{10\%})/D$ e na direção-X (longitudinal ao escoamento), $u(A_x^{10\%})/D$, respectivamente, para os dados A_y/D e A_x/D .

Através da análise de incerteza, pode-se afirmar que os resultados deste estudo apresentam consistência dentro do mesmo conjunto de repetições, uma vez que a incerteza experimental calculada é comparativamente mínima. Isto decorre tanto da robustez quanto da qualidade do instrumento empregado na captura do fenômeno FIM.

Como mencionado anteriormente, é importante destacar a possível presença de dois mecanismos de ressonância distintos dentro deste sistema. Um desses mecanismos é notável em velocidades reduzidas mais baixas, enquanto o outro se torna

Tabela 4.4 – Média das 10% principais de incertezas expandidas na direção-Y, $u(A_y^{10\%})/D$

Arranjo	ϕ	S/L	Profundidade (mm)						
			150	175	200	225	250	275	300
			$u(A_y^{10\%})/D$						
3	0°	2	0,0088	0,0396	0,0159	0,0213	0,0220	0,0236	0,0470
3	90°	2	0,0378	0,0149	0,0154	0,0222	0,0133	0,0253	0,0236
3	180°	2	0,0078	0,0143	0,0150	0,0151	0,0263	0,0298	0,0361
4	0°	2	0,0408	0,0094	0,0099	0,0153	0,0144	0,0151	0,0132
4	45°	2	0,0408	0,0107	0,0136	0,0098	0,0114	0,0180	0,0092
3	0°	3	0,0115	0,0191	0,0208	0,0223	0,0272	0,0444	0,0476
3	90°	3	0,0077	0,0178	0,0159	0,0137	0,0221	0,0242	0,0270
3	180°	3	0,0082	0,0138	0,0141	0,0248	0,0973	0,0333	0,0253
4	0°	3	0,0439	0,0107	0,0208	0,0143	0,0265	0,0412	0,0673
4	45°	3	0,0099	0,0840	0,0108	0,0243	0,0314	0,0233	0,0152
3	0°	4	0,0230	0,0276	0,0224	0,0260	0,0249	0,0412	0,0673
3	90°	4	0,0161	0,0207	0,0220	0,0224	0,0239	0,0368	0,0427
3	180°	4	0,0113	0,0190	0,0205	0,0251	0,0247	0,0199	0,0432
4	0°	4	0,0109	0,0167	0,0184	0,0193	0,0287	0,0399	0,0366
4	45°	4	0,0214	0,0142	0,0095	0,0163	0,0175	0,0567	0,0228

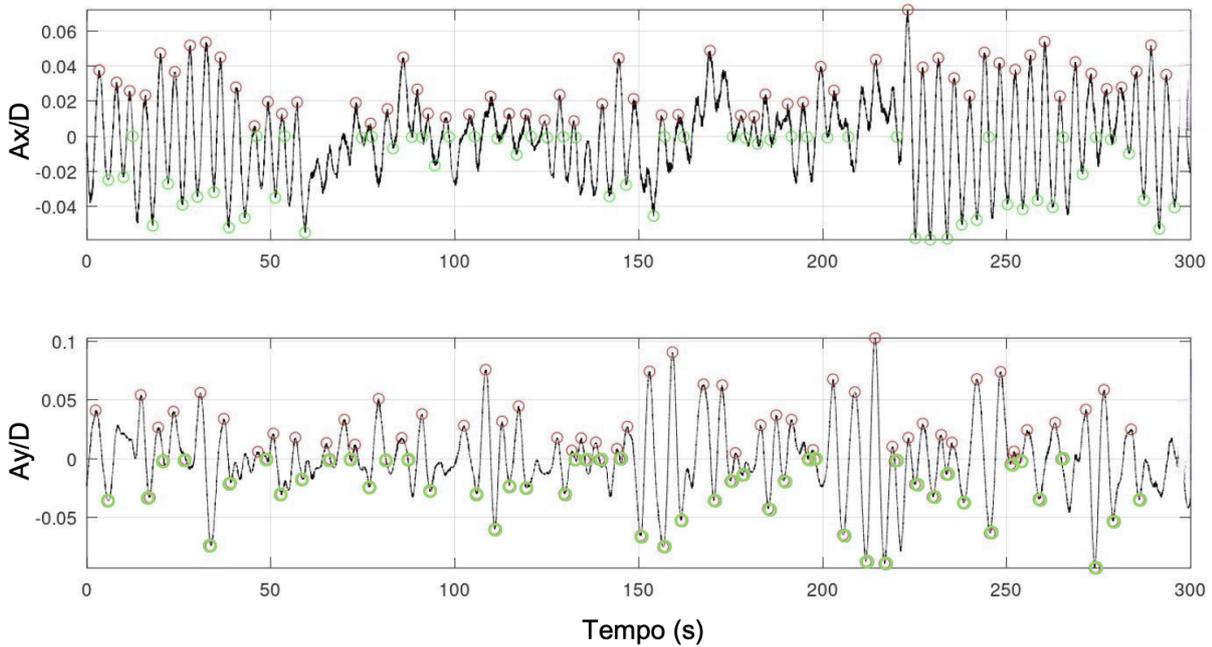
Fonte: Autora (2023).

Tabela 4.5 – Média das 10% principais de incertezas expandidas na direção-X, $u(A_x^{10\%})/D$

Arranjo	ϕ	S/L	Profundidade (mm)						
			150	175	200	225	250	275	300
			$u(A_x^{10\%})/D$						
3	0°	2	0,0073	0,0080	0,0155	0,0107	0,0203	0,0119	0,01249
3	90°	2	0,0120	0,0089	0,0084	0,0127	0,0197	0,0218	0,0152
3	180°	2	0,0082	0,0130	0,0102	0,0236	0,0207	0,0230	0,0158
4	0°	2	0,0095	0,0065	0,0101	0,0155	0,0153	0,0100	0,0155
4	45°	2	0,0134	0,0065	0,0116	0,0094	0,0107	0,0093	0,0086
3	0°	3	0,0079	0,0161	0,0144	0,0150	0,0128	0,0263	0,0243
3	90°	3	0,0077	0,0124	0,0132	0,0114	0,0124	0,0240	0,0205
3	180°	3	0,0282	0,0094	0,0047	0,0161	0,0126	0,0146	0,0188
4	0°	3	0,0090	0,0080	0,0113	0,0150	0,0209	0,0170	0,0089
4	45°	3	0,0090	0,0122	0,0116	0,0130	0,0206	0,0110	0,0089
3	0°	4	0,0059	0,0083	0,0078	0,0125	0,0165	0,0314	0,0202
3	90°	4	0,0071	0,0117	0,0133	0,0119	0,0195	0,0146	0,0286
3	180°	4	0,0053	0,0342	0,0132	0,0111	0,0169	0,0145	0,0159
4	0°	4	0,0075	0,0133	0,0088	0,0091	0,0186	0,0197	0,0346
4	45°	4	0,0120	0,0107	0,0054	0,0134	0,0127	0,0125	0,0199

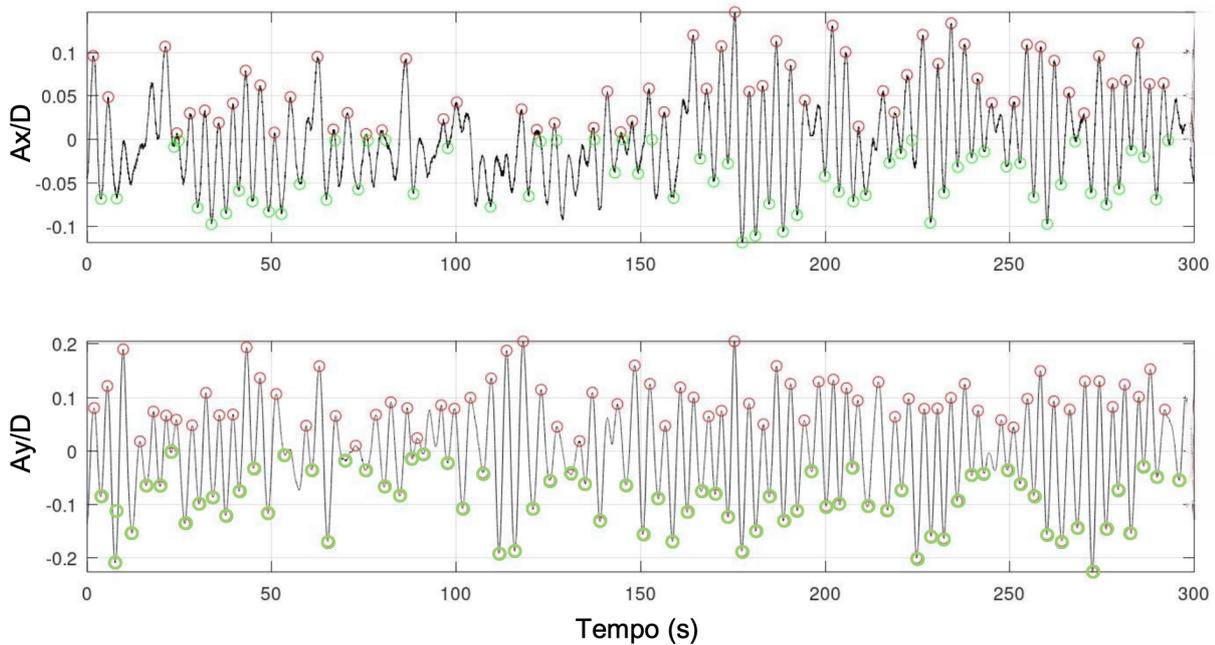
Fonte: Autora (2023).

Figura 4.30 – Históricos temporais de deslocamentos em linha e transversal com o escoamento, matriz de 3 cilindros, $\phi = 90^\circ$, $Vr = 5,33$



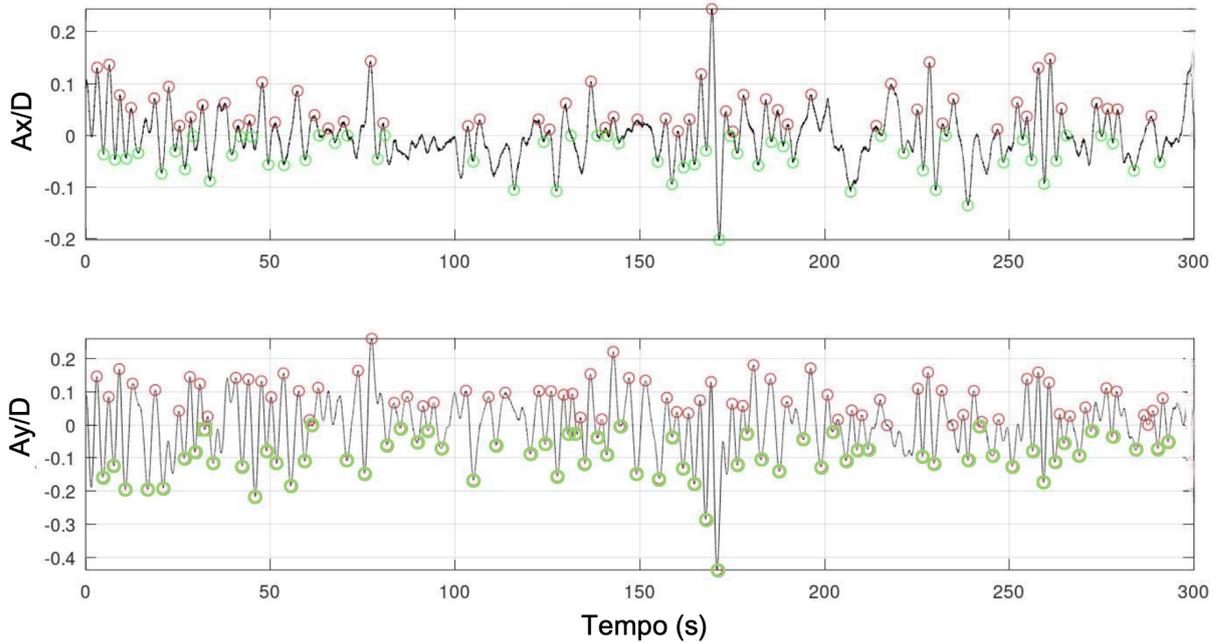
Fonte: Autora (2023).

Figura 4.31 – Históricos temporais de deslocamentos em linha e transversal com o escoamento, matriz de 3 cilindros, $\phi = 90^\circ$, $Vr = 8,35$



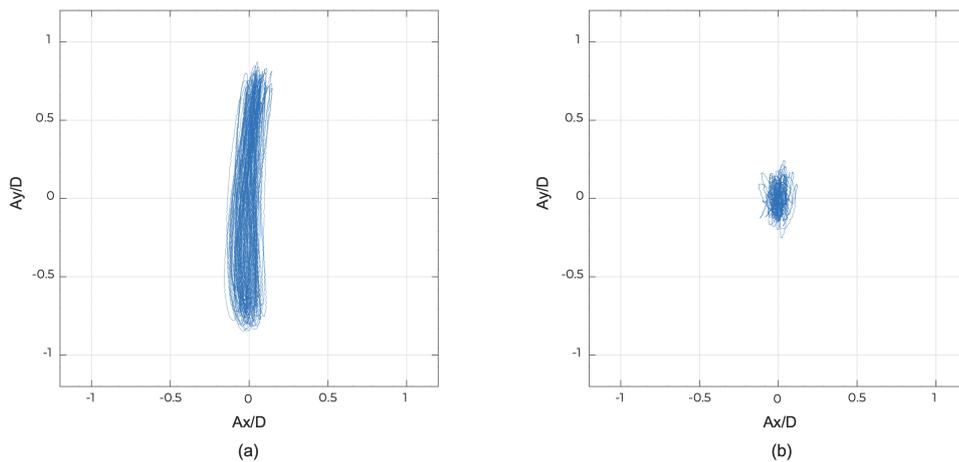
Fonte: Autora (2023).

Figura 4.32 – Históricos temporais de deslocamentos no sentido longitudinal e transversal ao escoamento, conjunto de 3 cilindros, $\phi = 90^\circ$, $V_r = 11,76$



Fonte: Autora (2023).

Figura 4.33 – Histórico de trajetórias no plano-XY para: (a) arranjo de 3 cilindros $S/L = 4$, $\phi = 0^\circ$ e $V_R = 9,93$ e (b) arranjo de 4 cilindros, $S/L = 4$, $\phi = 0^\circ$ e $V_R = 9,85$



Fonte: Autora (2023).

proeminente em velocidades reduzidas mais altas. No entanto, é crucial notar que há uma perda notável de sincronização na faixa intermediária de velocidades.

Este comportamento ressalta a dinâmica da interação fluido-estrutura, especialmente em configurações envolvendo três cilindros com seções transversais quadradas.

Estas descobertas são de grande importância, pois esclarecem a complexa interação entre a dinâmica estrutural e as forças induzidas pelos fluidos.

Em uma análise ampla dos resultados de todas as configurações na direção longitudinal do escoamento, um exame da amplitude não dimensional média entre os 10% dos valores mais altos revela que essas respostas exibem amplitudes substancialmente mais baixas em comparação com aquelas no direção transversal. Conseqüentemente, os valores de $A_x^{10\%}/D$ demonstram um maior grau de dispersão. Isto sugere que as interações fluido-estrutura na direção do escoamento longitudinal são marcadamente menos pronunciadas do que no plano transversal, onde as respostas de amplitudes são mais significativas.

O padrão de variação observado, com maior dispersão nas medidas longitudinais, indica uma complexa interação de forças e respostas dinâmicas, que são inerentemente dependentes da direcionalidade do escoamento em relação à estrutura. Esta compreensão diferenciada das respostas de amplitude direcional é crítica para o projeto e análise de estruturas sujeitas a escoamento, pois informa sobre potenciais anisotropias nas características dos movimentos que devem ser levados em conta para garantir a integridade e o desempenho estruturais.

Apesar deste estudo apresentar descobertas que poderiam ser consideradas novas no domínio da fenomenologia do baixo número de Reynolds, uma exploração mais aprofundada das várias facetas do comportamento do fenômeno neste regime permanece imperativa. Estas investigações, que podem ser experimentais e numéricas, estão no conhecimento do FIM.

5 CONCLUSÃO

Os experimentos deste trabalho foram realizados em um CAC, realizado no LIFE da UFSC-Joinville/SC, com modelos em escala ultra-reduzidos para avaliar fenômenos de FIM, em baixos números de Reynolds, em arranjos de cilindros de seção transversal quadrada livres para oscilar em 2GDL, com foco em configurações de três e quatro cilindros, com razões de espaçamento distintos (S/L). O objetivo era aprofundar a compreensão da dinâmica do FIM sob diversas condições.

A consistência foi mantida em todas as configurações, com razões de aspecto, $T/L = 2$ e massa reduzida, $m^* \cong 1,83$. As distâncias entre os centros dos cilindros foram definidas pela largura da face externa do cilindro, L , resultando em razões de números inteiros entre espaçamento entre os centros dos cilindros e L , $S/L = 2, 3$ e 4 .

Cada cenário de espaçamento, S , foi avaliado sob diferentes ângulos de ataque $0, 90$ e 180 graus para os arranjos de três cilindros, e 0 e 45 graus para as configurações de quatro cilindros. Ensaios experimentais foram conduzidos em sete velocidades de escoamentos diferentes, produzindo velocidades reduzidas na faixa de $4,69$ a $11,87$, o que equivale aos números de Reynolds variando de $597,50$ a $1317,50$. Esta investigação detalhada do FIM em arranjos de cilindros de seção quadrada teve como objetivo revelar comportamentos diferenciados em um espectro de velocidades de escoamento e configurações geométricas.

É importante ressaltar que após a revisão da pesquisa sobre Movimento Induzido pelo Escoamento (FIM), não foram encontradas publicações com os mesmos parâmetros deste estudo. Esta investigação indica que o baixo número de Reynolds em arranjos de três e quatro cilindros é um parâmetro chave que facilita e viabiliza, a um custo menor, a identificação de geometrias promissoras quando expostas a fenômenos FIM, destacando também esses fatores como considerações críticas na fase de projeto.. Embora as publicações descobertas sobre o tema variem, elas forneceram suporte substancial às discussões, desempenhando um papel fundamental na validação da consistência dos resultados obtidos nesta pesquisa.

A investigação do FIM em cilindros de seção quadrada forneceu resultados importantes, particularmente no que diz respeito às amplitudes e frequências ao longo de orientações perpendiculares e paralelas à direção do escoamento incidente. A investigação destacou uma configuração envolvendo quatro cilindros com razão de espaçamento $S/L = 4$, submetidas a um escoamento com ângulo de ataque de 45 graus, que apresentavam notável amplitude transversal, registrada como $A_y^{10\%}/D = 0,78$.

No contexto da mitigação da FIM, os resultados sugerem que manter um espaçamento mínimo entre cilindros, especificado como $S/L = 2$, é vantajoso, pois limita a amplitude de movimento, independentemente da forma da seção transversal ou

do posicionamento dos cilindros. Esta abordagem é considerada fundamental para a redução eficiente dos impactos do FIM.

Em relação à dinâmica dos movimentos transversais, os arranjos com cilindros de seção quadrada, com quatro cilindros em ângulo de ataque de 45 graus, que nesta configuração assume a forma de losango, mostraram propensão ao VIM, enquanto as cilindros de seção quadrada foram mais indicativas de um movimento galloping. fenômeno. No entanto, para determinar definitivamente o mecanismo predominante do FIM, seja galloping ou VIM, é crucial uma análise experimental adicional em vários ângulos de ataque.

As descobertas desta investigação foram comparadas com a literatura existente na área. Há um alinhamento qualitativo com os resultados obtidos por (GONÇALVES et al., 2020a) e (GONÇALVES et al., 2020b), que realizaram suas pesquisas por meio de experimentos em tanques de provas. Esta comparação sublinha a validade do método CAC com baixos números de Reynolds como uma alternativa econômica para estudos de FIM, oferecendo informações valiosas que são consistentes com os resultados de investigação estabelecidos.

Este conjunto de trabalho fornece percepções iniciais sobre os mecanismos complexos que impulsionam o FIM, embora seja necessário um conjunto mais profundo e abrangente de testes de modelo para uma compreensão conclusiva. As observações feitas com baixos números de Reynolds servem como uma referência valiosa para a validação de metodologias de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD).

A partir da revisão da literatura realizada, os resultados aqui apresentados parecem ser novos em termos do seu foco. Além disso, estes resultados permitem uma seleção mais eficiente e econômica de configurações ideais a partir de uma ampla gama de possibilidades. Eles fornecem um conjunto robusto de valores e discussões que são suficientes para uso como validação de abordagens numéricas de CFD. Antes deste estudo, os resultados numéricos para arranjos de cilindros com baixos números de Reynolds careciam de métodos de validação direta, contando, em vez disso, com comparações com resultados experimentais de cilindros únicos.

Experimentos com protótipos em escala real é muitas vezes impraticável devido às suas grandes dimensões e altos custos, e mesmo testes de modelos de média escala podem ser caros e desafiadores para gerenciar experimentalmente, muitas vezes exigindo mais de um indivíduo para conduzir os testes. Neste contexto, a utilização de um CAC com baixos números de Reynolds apresenta uma solução eficiente e gerenciável para investigar rapidamente fenômenos de FIM, pois permite que os experimentos sejam conduzidos de forma eficaz por um único indivíduo.

Apesar da aparente originalidade deste trabalho, continua a existir um potencial significativo para novos desenvolvimentos. Várias sugestões para pesquisas futuras são propostas para avançar a fronteira do conhecimento sobre FIM. Uma abordagem

poderia envolver adicionar rugosidade superficial aos arranjos, especialmente aquelas com maiores amplitudes de resposta, para examinar como esse parâmetro afeta a dinâmica do sistema, considerando assim o potencial uso da rugosidade como ferramenta de mitigação do fenômeno.

Além disso, testar um modelo com geometria com tamanho equivalente a um arranjo $S/L = 2$, devido à proximidade dos cilindros, seria valioso para determinar se ele se comporta de forma semelhante a uma monocolumna. A realização de experimentos com outras formas geométricas também seria altamente benéfica. Essas orientações poderiam melhorar significativamente a compreensão e o gerenciamento do FIM nas interações fluido-estrutura.

REFERÊNCIAS

- AJDIN, A. *Nearly 5bn needed for ports to scale up UK floating wind*. 2023. Disponível em: <<https://splash247.com/nearly-5bn-needed-for-ports-to-scale-up-uk-floating-wind/?fbclid=IwAR11vjM7foQkf5PYVR44RsUu2UtQ7mkF0anzs8wLUzxXmZlaG6L5czM3ioc>>.
- AMATO, R. Sulla risposta dinamica ed aeroelastica all'azione eolica di una torre a sezione rettangolare. Politecnico di Milano, 2009.
- ARAÚJO, L. E. *Introdução à Avaliação e Expressão de Incertezas em Medições*. 2. ed. [S.l.], 2017.
- BEARMAN, P. et al. Experiments on flow-induced vibration of a square-section cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 19–34, 1987.
- BEARMAN, P. W. Vortex shedding from oscillating bluff bodies. *Annual review of fluid mechanics*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 16, n. 1, p. 195–222, 1984.
- BLEVINS, R. D. *Flow-Induced Vibration*. 2nd edition. ed. [S.l.]: Krieger Publishing Company, 2001. ISBN 1575241838.
- BLEVINS, R. D.; COUGHRAN, C. S. Experimental investigation of vortex-induced vibration in one and two dimensions with variable mass, damping, and reynolds number. 2009.
- BLEVINS, R. D.; PLUNKETT, R. Formulas for natural frequency and mode shape. *Journal of Applied Mechanics*, v. 47, n. 2, p. 461, 1980.
- BRUNER, M. E. *Investigação experimental da vibração induzida pelo escoamento em arranjos de colunas circulares submetidos a regime de baixo Reynolds*. Dissertação de Mestrado — Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.
- BRUNER, M. E. et al. Experiments of flow-induced vibration no models in rigimes of low reynolds numbers: Part 1 – square-columns arrangements. In: *Proceedings of the 27th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2023*. Florianópolis, Brazil: [s.n.], 2023.
- ÇENGEL, Y.; CIMBALA, J. N. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2010.
- CHEN, C.-R.; CHEN, H.-C. Simulation of vortex-induced motions of a deep draft semi-submersible in current. *Ocean Engineering*, Elsevier, v. 118, p. 107–116, 2016.
- CINTRA, R. *Plataformas Semi Submersíveis – Semisubs*. 2023. Disponível em: <<https://portalmaritimo.com/plataformas-semi-submersiveis-semisubs/>>.
- DEEPTREKKER. *The Many Models of Offshore Platforms*. 2023. Disponível em: <<https://www.deeptrekker.com/resources/oil-energy-platforms>>.

DELOITTE. *Perspectivas para o Setor de Óleo e Gás*. 2023. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/br/pt/pages/energy-and-resources/articles/perspectivas-oleo-gas-produtos-quimicos.html>>.

DET NORSKE VERITAS. *DNVGL-ST-0119: Floating wind turbine structures*. Noruega, 2018.

DYKE, M. V. *An album of fluid motion*. [S.l.]: Parabolic Press Stanford, 1982. v. 176.

FUJARRA, A. L. et al. State-of-art on vortex-induced motion: A comprehensive survey after more than one decade of experimental investigation. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. [S.l.], 2012. v. 44915, p. 561–582.

GONÇALVES, R. T. et al. Fim-flow-induced motion of three-column platforms. *International Journal of Offshore and Polar Engineering, ISOPE*, v. 30, n. 02, p. 177–185, 2020b.

GONÇALVES, R. T. et al. Flow around circular cylinders with very low aspect ratio. *Journal of Fluids and Structures, Elsevier*, v. 54, p. 122–141, 2015.

GONÇALVES, R. T. et al. Fim-flow-induced motions of four-column platforms. *Applied Ocean Research, Elsevier*, v. 95, p. 102019, 2020a.

GONÇALVES, R. T. et al. Experimental study on vortex-induced motions of a semi-submersible platform with four square columns, part i: Effects of current incidence angle and hull appendages. *Ocean engineering, Elsevier*, v. 54, p. 150–169, 2012.

INOUE, R. et al. *Offshore wind power next big thing in Japan's green push?* 2023. Disponível em: <<https://www.asahi.com/ajw/articles/14818684>>.

INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE: 7.5-02-07-03.13: Guideline for VIM testing. Zurich, 2021.

JAIMAN, R. K. t. Fully coupled fluid-structure interaction for offshore application. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, v. 5, n. 1, p. 757–765, maio 2009.

JAUVTIS, N.; WILLIAMSON, C. The effect of two degrees of freedom on vortex-induced vibration at low mass and damping. *Journal of Fluid Mechanics, Cambridge University Press*, v. 509, p. 23–62, 2004.

JEŽOV, J. *Pressure sensitive lateral line for underwater robot*. [S.l.]: TUT Press, 2013.

JIANG, Y. et al. The hydrodynamic design and critical techniques for 1m× 1m water tunnel. In: AIP PUBLISHING. *AIP conference proceedings*. [S.l.], 2018. v. 1955, n. 1.

JIANG, Z. Installation of offshore wind turbines: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*, v. 139, p. 110576, 2021.

KALGUTKAR, S. V. et al. Design, fabrication and analysis of low speed water tunnel. *Journal of Material Science and Mechanical Engineering (JMSME) Volume*, v. 3, 2016.

KANEKO, S. et al. *Flow induced vibrations*. [S.l.]: Elsevier Science, 2008.

- LIANG, Y. et al. Experimental and numerical study on vortex-induced motions of a deep-draft semi-submersible. *Applied Ocean Research*, Elsevier, v. 67, p. 169–187, 2017.
- LIE, H. et al. Free-span viv testing of full-scale umbilical. In: ISOPE. *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*. [S.l.], 2007. p. ISOPE–I.
- LIU, M. et al. Experimental study on vortex-induced motions of a semi-submersible with square columns and pontoons at different draft conditions and current incidences. In: *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. Elsevier, 2017. p. 326–338. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016%2Fj.ijnaoe.2016.11.003>>. Acesso em: 07 junho 2023.
- MACHADO, N. *Eólica offshore deve atrair US\$ 1 tri na próxima década*. 2022. Disponível em: <<https://epbr.com.br/eolica-offshore-deve-atrair-us-1-tri-na-proxima-decada/>>.
- MEI, X.; XIONG, M. Effects of second-order hydrodynamics on the dynamic responses and fatigue damage of a 15 mw floating offshore wind turbine. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 207, n. 107371, nov. 2021.
- NAKAMURA, T. et al. *Flow-induced vibrations: classifications and lessons from practical experiences*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2013.
- NEMES, A. et al. The interaction between flow-induced vibration mechanisms of a square cylinder with varying angles of attack. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 710, p. 102–130, 2012.
- NOGUEIRA, P. *Investimento offshore de energia eólica quadruplica apesar da crise econômica causada pelo Covid-19*. 2020. Disponível em: <<https://clickpetroleoegas.com.br/investimento-offshore-de-energia-eolica-quadruplica-apesar-da-crise-economica>>
- OEDIGITAL. *World's First 100,000-ton Deepwater Semi-submersible Platform Launched*. 2021. Disponível em: <<https://www.oedigital.com/news/484810-world-s-first-100-000-ton-deepwater-semi-submersible-platform-launched>>.
- PAÏDOUSSIS, M. P.; PRICE, S. J.; LANGRE, E. D. *Fluid-structure interactions: cross-flow-induced instabilities*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2010.
- PETROBRAS. *Tipos de Plataformas*. 2015. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/infograficos/tipos-de-plataformas/desktop/index.html>>.
- POWERTECHNOLOGY. *Fukushima Floating Offshore Wind Farm*. 2015. Disponível em: <<https://www.power-technology.com/projects/fukushima-floating-offshore-wind-farm/?cf-view&cf-closed>>.
- QIAO, D. t. Comparative analysis on fatigue damage of deepwater hybrid mooring line. *AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME)*, v. 29, n. 1, p. 443–452, maio 2010.
- REIS, P. *O que é energia eólica offshore?* 2020. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/o-que-e-energia-eolica-offshore/>>.

RIJKEN, O.; LEVERETTE, S. Experimental study into vortex induced motion response of semi submersibles with square columns. In: *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. [S.l.: s.n.], 2008. v. 48210, p. 263–276.

RODDIER, D.; FINNIGAN, T.; LIAPIS, S. Influence of the reynolds number on spar vortex induced motions (vim): multiple scale model test comparisons. In: *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 43451, p. 797–806.

SAEED, M. et al. Design and development of low-speed water tunnel. In: IEEE. *2018 15th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. [S.l.], 2018. p. 614–619.

SAKAMOTO, H.; ARIE, M. Vortex shedding from a rectangular prism and a circular cylinder placed vertically in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 126, p. 147–165, 1983.

SCLAVOUNOS D.P., T. C.; LEE, S. Floating offshore wind turbines: Responses in a sea state, pareto optimal designs and economic assessment. *Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference.*, v. 1, n. 11, p. 443–452, jun. 2008.

SHARMA, R. et al. Issues in offshore platform research-part 1: Semi-submersibles. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Elsevier, v. 2, n. 3, p. 155–170, 2010.

SOUZA, R. *Petróleo ainda reina, mas renováveis pressionam e ganha cada vez mais espaço no mercado mundial*. 2020. Disponível em: <<https://clickpetroleoegas.com.br/petroleo-ainda-reina-mas-renovaveis-pressionam-e-ganha-cada-vez-mais-espaco>>

STAPPENBELT, B.; LALJI, F.; TAN, G. Low mass ratio vortex-induced motion. School of Engineering, The University of Queensland, 2007.

STECKLEY, A. Motion-induced wind forces on chimneys and tall buildings. 1989.

SUMER, B. M. et al. *Hydrodynamics around cylindrical structures*. [S.l.]: World scientific, 2006. v. 26.

WILLIAMSON, C. H.; GOVARDHAN, R. Vortex-induced vibrations. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Annual Reviews, v. 36, p. 413–455, 2004.

ZDRAVKOVICH, M. M. Flow around circular cylinders; vol. i fundamentals. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 350, n. 1, p. 377–378, 1997.

ZHANG, L. et al. Second-order hydrodynamic effects on the response of three semisubmersible floating offshore wind turbines. *Ocean Engineering*, v. 207, n. 107371, jun. 2020.

ZHANG, X. et al. Numerical studies on vortex-induced motions of a multi-column deep-draft oil and gas exploration platform. *Ocean Engineering*, Elsevier, v. 145, p. 77–94, 2017.

ZHAO, J. et al. Fluid–structure interaction of a square cylinder at different angles of attack. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 747, p. 688–721, 2014.