



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

MONIQUE ELLEN BRUNER

**Investigação experimental da vibração induzida pelo escoamento em arranjos  
de colunas circulares submetidos a regime de baixo Reynolds**

Joinville  
2022

MONIQUE ELLEN BRUNER

**Investigação experimental da vibração induzida pelo escoamento em arranjos  
de colunas circulares submetidos a regime de baixo 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: Prof. André Luís Condino Fugarra,  
Dr.

Joinville  
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bruner, Monique Ellen

Investigação experimental da vibração induzida pelo escoamento em arranjos de colunas circulares submetidos a regime de baixo Reynolds / Monique Ellen Bruner ; orientador, André Luis Condino Fugarra , 2022.

101 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Vibrações Induzidas pelo Escoamento. 3. Arranjos de cilindros circulares. 4. Baixos números de Reynolds. 5. Experimentos em canal de água circulante. I. , André Luis Condino Fugarra. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

MONIQUE ELLEN BRUNER

**Investigação experimental da vibração induzida pelo escoamento em arranjos de colunas circulares submetidos a regime de baixo Reynolds**

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

Prof<sup>a</sup>. Talita Sauter Possamai, Dra.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Thiago Antonio Fiorentin, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rodolfo Trentin Gonçalves, Dr.  
Universidade de Tóquio (UTokyo)

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.

---

Prof. Roberto Simoni, Dr.  
Subcoordenador do Programa de  
Pós-Graduação

---

Prof. André Luís Condino Fugarra, Dr.  
Orientador

Joinville, 2022.

Este trabalho é dedicado à Lovelace, Curie,  
Hopper, Earhart e a todas as outras mulheres  
da ciência que vieram antes de mim, e também  
a todas as outras que virão depois.

## AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas entraram e saíram da minha vida durante os anos em que me dediquei a este trabalho. A algumas delas devo gratidão pela ajuda, outras pela paciência e outras que devo agradecer por me mostrar o tipo de ser humano que não quero ser.

Agradeço à minha mãe e aos meus avós por terem me criado e feito de mim o que sou hoje. De todos aqui citados, foram os que mais me falaram para não deixar ninguém dizer que eu não era capaz de algo. Agora estou aqui, finalizando este trabalho responsável por me tirar o sono tantas noites. Minha família sempre foi a minha base, por isso também agradeço ao meu irmão, meu padrasto e aos tios e tias que estiveram ao meu lado, e se mostraram compreensivos com as minhas ausências em aniversários e festas.

Devo ser grata pela companhia e amizade vindas da Laura, da Letícia e do Léo, que estão comigo desde a graduação e foram os maiores presentes que a UFSC já me deu. Ainda sobre amizades, agradeço a Karen, Lucas, Felipe, Victor e Gabriel, meus parceiros de café e de laboratório, sem a ajuda deles, esta dissertação não aconteceria. Deixo com vocês a tarefa de continuar esta pesquisa e beber da minha caneca. A competência e a dedicação de vocês me inspirou a continuar quando passei por momentos de incerteza, e vocês sabem disso... Os de Verdade sei quem são e tudo mais. Agradeço ao Daniel, por ouvir todas as minhas angústias e me proporcionar os melhores cafés pré-LIFE antes de começar um dia de ensaios. Também devo agradecer ao pessoal do FSIrg num geral, boa sorte para todos e todas.

Agradeço ao meu orientador André Fajarra pelos anos de dedicação e por ter me incumbido este tema que irá desencadear tantos trabalhos do grupo de pesquisa. Agradeço ao CNPq (processo N° 437114/2018-0 da Chamada MCTIC/CNPq N° 28/2018) por viabilizar os ensaios que compõem este trabalho por meio da construção do Canal de Água Circulante da UFSC-Joinville. Também devo agradecer à Petrobras, que por meio de seu fomento vinculado à FEESC, me concedeu a bolsa de estudos que garantiu minha permanência no pós-ECM. Esta bolsa permitiu minha participação no projeto de pesquisa em tema correlato ao do mestrado, e que também é de interesse para as Vibrações Induzidas pelo Escoamento.

Agradeço a todas as mulheres que me inspiraram a estar aqui hoje, que trilharam o caminho árduo do qual muitas de nós ainda estão ajudando a tirar as pedras. Algumas se casam, têm filhos e isto não influencia em nada na nossa competência e entrega na pesquisa. Docentes, nunca recusem a presença feminina em seus laboratórios.

Alguns se esforçam para nos apagar, mas estaremos sempre ali, sendo de aço ou de flores, para mostrar que de frágil, nosso sexo não tem nada.

*“Nunca estou realmente satisfeita por entender alguma coisa;  
porque, entenda-o tão bem quanto eu possa,  
minha compreensão só pode ser uma fração infinitesimal  
de tudo que eu quero entender...”  
(LOVELACE, 1815-1851)*

## RESUMO

As interações fluido-estrutura são fenômenos caracterizados pela ação do fluido em escoamento sobre as estruturas, os quais devem ser considerados já nas fases iniciais do projeto de sistemas de engenharia. Seu caráter oscilatório pode resultar em falhas por fadiga da estrutura. Alguns tipos de Vibração Induzida pelo Escoamento (VIE) são fenômenos desencadeados a partir da sincronização entre uma das frequências de oscilação do sistema, que pode ser um cilindro isolado, ou um arranjo deles, e a frequência de emissão de vórtices promovida pelo escoamento no seu entorno. A partir dessa sincronização, ocorre uma oscilação auto-excitada e autolimitada, com amplitude próxima à dimensão característica do sistema, a denominada Vibração Induzida por Vórtices (VIV). Neste contexto, este trabalho investiga experimentalmente os fundamentos do fenômeno de VIE, possivelmente VIV, com vistas à triagem de modelos em escala reduzida de flutuadores de plataformas para suporte de turbinas eólicas oceânicas, promovendo a seleção dos melhores casos para investigações aprofundadas em trabalhos futuros via fluidodinâmica computacional em números de Reynolds da escala real, além das possibilidades dos próprios resultados experimentais assim obtidos já servirem como parte da validação para os próprios modelos numéricos de simulação na mesma faixa de número de Reynolds. Os modelos físicos deste trabalho são arranjos de três ou quatro cilindros circulares equidistantes entre si, com razões  $S = 2D, 3D$  e  $4D$ , onde  $D$  é o diâmetro do modelo, testados segundo aproamentos em  $0, 45, 90$  e  $180$  graus, a depender do arranjo. Os escoamentos incidentes são caracterizados por números de Reynolds baixos,  $524 \leq Re \leq 1196$ , equivalentes a cinco velocidades distintas em canal de água circulante. Deslocamentos nos dois graus de liberdade principais dos arranjos são registrados a partir de um sistema de aquisição e tratamento de imagens. Para a determinação das amplitudes e frequências adimensionais de VIE, aplicam-se análises estatísticas e de incerteza, bem como a *Fast Fourier Transform* (FFT), o que, então, permite comparações com resultados em números de Reynolds mais altos encontrados na literatura. Os arranjos de menor espaçamento demonstraram menor amplitude de oscilação em relação aos demais, além de que o aproamento não apresentou influência apreciável nos resultados em termos de amplitude e frequência para os cilindros de maior espaçamento.

**Palavras-chave:** Vibrações Induzidas pelo Escoamento. Arranjos de cilindros circulares. Baixos números de Reynolds. Experimentos em canal de água circulante.

## ABSTRACT

The fluid-structure interactions are phenomena characterized by the action of the flowing fluid on the structures, which must be considered in the initial phases of the design of engineering systems. Its oscillatory character can result in fatigue failures of the structure. Some types of Flow Induced Vibration (FIV) are phenomena triggered by the synchronization between one of the oscillation frequencies of the system, which can be an isolated cylinder, or an arrangement of them, and the frequency of emission of vortices promoted by the flow in its surroundings. From this synchronization, a self-excited and self-limited oscillation occurs, with amplitude close to the characteristic dimension of the system, the so-called Vortex-Induced Vibration (VIV). In this context, this work experimentally investigates the foundations of the FIV phenomenon, possibly VIV, with a view to screening reduced-scale models of platform floats to support oceanic wind turbines, promoting the selection of the best cases for further investigations in future work via computational fluid dynamics in real-scale Reynolds numbers, in addition to the possibility that the experimental results thus obtained already serve as part of the validation for the numerical simulation models themselves in the same Reynolds number range. The physical models in this work are arrangements of three or four circular cylinders equidistant from each other, with ratios  $S = 2D, 3D$  and  $4D$ , where  $D$  is the diameter of the model, tested according to headings at 0, 45, 90 and 180 degrees, depending on of the arrangement. The incident flows are characterized by low Reynolds numbers,  $524 \leq Re \leq 1196$ , equivalent to five distinct velocities in a circulating water channel. Displacements in the two main degrees of freedom of the arrays are recorded from an image acquisition and treatment system. For the determination of the dimensionless amplitudes and frequencies of VIE, statistical and uncertainty analyzes are applied, as well as the *Fast Fourier Transform* (FFT), which then allows comparisons with results in higher Reynolds numbers found in literature. The arrangements with smaller spacing showed a smaller amplitude of oscillation in relation to the others, in addition to the fact that the heading had no appreciable influence on the results in terms of amplitude and frequency for the cylinders with greater spacing.

**Keywords:** Flow-Induced Vibrations. Circular cylinders array. Low Reynolds numbers. Experiments in a circulating water channel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistemas de produção fixos e flutuantes. . . . .	21
Figura 2 – Unidade flutuante (em amarelo) de suporte à FOWT Kincardine instalada na Escócia. . . . .	23
Figura 3 – Forças agindo sobre um corpo estacionário imerso em escoamento fluido uniforme. . . . .	27
Figura 4 – Mecanismo de emissão de vórtices. . . . .	29
Figura 5 – Variação do escoamento conforme o aumento do número de Reynolds. . . . .	31
Figura 6 – Classificação das Vibrações Induzidas pelo Escoamento com foco nos escoamentos estáveis. . . . .	33
Figura 7 – Composição da resposta de um agrupamento de tubos. . . . .	33
Figura 8 – Comparação qualitativa entre amplitudes adimensionais em função da velocidade reduzida para cilindros longos. . . . .	35
Figura 9 – Comparação qualitativa entre amplitudes adimensionais em função da velocidade reduzida para cilindros curtos. . . . .	36
Figura 10 – VIM como um caso particular de VIV. . . . .	37
Figura 11 – (a) Ilustração do experimento conduzido por Kubo <i>et al.</i> (1995). (b) Seções submetidas aos ensaios. . . . .	42
Figura 12 – Trajetórias X-Y de uma parte das velocidades reduzidas estudadas. . . . .	44
Figura 13 – Modelos ensaiados experimentalmente. . . . .	45
Figura 14 – Resultados para as configurações III e IV. . . . .	46
Figura 15 – Trajetórias X-Y para o modelo mais arredondado. . . . .	47
Figura 16 – Amplitudes de resposta nas direções X e Y. . . . .	49
Figura 17 – Amplitudes de resposta na direção Y. (a) $\theta = 45^\circ$ (b) $\theta = 15^\circ$ (c) $\theta = 30^\circ$ (d) $\theta = 45^\circ$ . . . . .	50
Figura 18 – Aproamentos ensaiados. (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 90^\circ$ (c) $\alpha = 180^\circ$ . . . . .	52
Figura 19 – Amplitudes transversais adimensionais. . . . .	52
Figura 20 – Esquema do modelo no tanque de reboque. . . . .	54
Figura 21 – Amplitudes adimensionais transversais dos arranjos circulares. . . . .	54
Figura 22 – Amplitudes de resposta transversais para $m^* = 2,36$ e $m^* = 6,54$ em um e dois graus de liberdade. . . . .	56
Figura 23 – Amplitudes de resposta transversais em função do número de Reynolds para $m^* = 5,02/\pi$ e $\zeta = 0,02$ . . . . .	57
Figura 24 – (a) Amplitudes de resposta transversais e inline para diferentes fatores de amortecimento a uma mesma razão de massa. (b) Amplitudes de respostas transversais para um mesmo amortecimento e diferentes razões de massa. . . . .	57
Figura 25 – Sistema de coordenadas utilizado . . . . .	60

Figura 26 – Estrutura montada para a execução dos experimentos de VIE no Canal de Água Circulante (CAC) da UFSC-Joinville. . . . .	62
Figura 27 – Modelos de cilindro único e arranjos de 3 e 4 cilindros circulares (colunas). . . . .	62
Figura 28 – Ilustração dos arranjos a serem ensaiados . . . . .	64
Figura 29 – Elementos do processo de calibração: o <i>ground plane</i> à esquerda; a <i>calibration wand</i> abaixo à direita; e as regiões mapeadas nos gráficos do alto também à direita. . . . .	65
Figura 30 – Incerteza-padrão para as três funções densidade de probabilidade .	69
Figura 31 – Valores de $k$ para as três funções densidade de probabilidade . . .	69
Figura 32 – Registros temporais para o cilindro único, $V_R = 6,58$ . . . . .	72
Figura 33 – Médias entre os 10% maiores valores de amplitude adimensional na direção transversal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com os arranjos de 4 colunas. . . . .	73
Figura 34 – Frequências adimensionais na direção transversal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 4 colunas. . . . .	75
Figura 35 – Médias entre os 10% maiores valores de amplitude adimensional na direção longitudinal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 4 colunas. . . . .	76
Figura 36 – Frequências adimensionais na direção longitudinal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 4 colunas. . . . .	77
Figura 37 – Exemplos de trajetórias no plano-XY para o cilindro único em $V_R = 6,58$ e para os arranjos de 4 colunas distantes $S/D = 4$ e $S/D = 2$ em aproamento de $0^\circ$ e $V_R = 10,05$ . . . . .	77
Figura 38 – Registros temporais para o arranjo $S/D=4$ e aproamento $0^\circ$ , $V_R = 8,23$ .	79
Figura 39 – Médias entre os 10% maiores valores de amplitude adimensional na direção transversal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 3 colunas. . . . .	80
Figura 40 – Frequências adimensionais na direção transversal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 3 colunas. . . . .	81
Figura 41 – Médias entre os 10% maiores valores de amplitude adimensional na direção longitudinal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 3 colunas. . . . .	82
Figura 42 – Frequências adimensionais na direção longitudinal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 3 colunas. . . . .	83

Figura 43 – Exemplos de trajetórias no plano-XY para o cilindro único em $V_R = 6,58$ e para os arranjos de 4 colunas distantes $S/D = 4$ e $S/D = 2$ em aproamento de $0^\circ$ e $V_R = 8,23$ . . . . .	83
Figura 44 – Valores RMS das amplitudes adimensionais na direção transversal ao escoamento para os arranjos de 4 colunas. . . . .	99
Figura 45 – Valores RMS das amplitudes adimensionais na direção longitudinal ao escoamento para os arranjos de 4 colunas. . . . .	100
Figura 46 – Valores RMS das amplitudes adimensionais na direção transversal ao escoamento para os arranjos de 3 colunas. . . . .	101
Figura 47 – Valores RMS das amplitudes adimensionais na direção longitudinal ao escoamento para os arranjos de 3 colunas. . . . .	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Levantamento de publicações que versem sobre a resposta de arranjos de cilindros. . . . .	40
Tabela 2 – Relação dos calados, velocidades, $V_R$ e números de Reynolds ensaiados. . . . .	61
Tabela 3 – Massas dos modelos e razão de massa calculada. . . . .	64
Tabela 4 – Matriz de ensaios a ser conduzida. . . . .	66
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de decaimento. . . . .	71
Tabela 6 – Correspondência dos Algarismos com as velocidades reduzidas. . .	85
Tabela 7 – Médias dos 10% maiores picos na direção X, $A_x/D$ . . . . .	85
Tabela 8 – Médias dos 10% maiores picos na direção Y, $A_y/D$ . . . . .	86
Tabela 9 – Incertezas expandidas para $A_x/D$ . . . . .	87
Tabela 10 – Incertezas expandidas para $A_y/D$ . . . . .	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAC	Canal de Água Circulante
CFD	Fluidodinâmica Computacional / <i>Computational Fluid Dynamics</i>
DDES	<i>Delayed Detached Eddy Simulation</i>
FFT	Transformada Rápida de Fourier / <i>Fast Fourier Transform</i>
FOWT	Turbina Eólica Flutuante Offshore / <i>Floating Offshore Wind Turbine</i>
FPSO	<i>Floating Production Storage Offloading</i>
GDL	Graus de liberdade
IDDES	<i>Improved Delayed Detached eddy simulation</i>
LIFE	Laboratório de Interação Fluido Estrutura
PLA	Plástico Poliácido Lático
TLP	<i>Tension Leg Platform</i>
VIE	Vibração Induzida pelo escoamento
VIM	Movimento Induzido por Vórtices
VIV	Vibração Induzida por Vórtices

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_R$	Razão de aspecto
$D$	Diâmetro
$F_D$	Força de arrasto
$F_L$	Força de sustentação
$F_R$	Força total
$L_{sub}$	Comprimento submerso efetivo
$Re$	Número de Reynolds
$S$	Distância entre colunas
$U^*$	Incerteza expandida
$U_\infty$	Corrente livre
$U$	Velocidade do escoamento
$V_R$	Velocidade reduzida
$\nu$	Viscosidade cinemática
$\sigma$	Desvio-padrão
$\zeta_x$	Fator de amortecimento na direção X
$\zeta_y$	Fator de amortecimento na direção Y
$f_n$	Frequência natural
$f_{0_x}$	Frequência natural na direção X.
$f_{0_y}$	Frequência natural na direção Y.
$f_{n_x}$	Frequência natural na direção X
$f_{n_y}$	Frequência natural na direção Y
$k$	Rugosidade superficial
$m^*$	Razão mássica
$m_f$	Massa de fluido deslocada pelo sistema
$m_s$	Massa sólida estrutural oscilante
$u_A$	Incerteza tipo A
$u_B$	Incerteza tipo B
$u$	Incerteza-padrão
$n$	Número de amostras

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	OBJETIVO GERAL	19
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.4	ESTRUTURA DO TEXTO	20
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>21</b>
2.1	OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS OFFSHORE E AS TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE	21
2.2	GRANDEZAS ADIMENSIONAIS	23
<b>2.2.1</b>	<b>Número de Reynolds <math>Re</math></b>	<b>24</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Razão de aspecto <math>A_R</math></b>	<b>24</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Razão de massa <math>m^*</math></b>	<b>25</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Velocidade reduzida <math>V_R</math></b>	<b>25</b>
2.3	ESCOAMENTOS EXTERNOS	25
<b>2.3.1</b>	<b>Separação do escoamento</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Emissão de vórtices em cilindros</b>	<b>28</b>
2.4	VIBRAÇÃO INDUZIDA PELO ESCOAMENTO (VIE)	30
<b>2.4.1</b>	<b>Classificação e modelagem das Vibrações Induzidas pelo Escoa- mento</b>	<b>32</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Vibração Induzida por Vórtices (VIV) e Movimento Induzido por Vórtices (VIM)</b>	<b>34</b>
2.5	ESTADO DA ARTE ACERCA DA VIBRAÇÃO INDUZIDA PELO ES- COAMENTO (VIE)	39
<b>2.5.1</b>	<b>Subsídios obtidos do trabalho de Kubo <i>et al.</i> (1995)</b>	<b>41</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Subsídios obtidos do trabalho de Han <i>et al.</i> (2015)</b>	<b>43</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Subsídios obtidos do trabalho de Liu <i>et al.</i> (2016)</b>	<b>44</b>
<b>2.5.4</b>	<b>Subsídios obtidos do trabalho de Chen e Chen (2016)</b>	<b>46</b>
<b>2.5.5</b>	<b>Subsídios obtidos do trabalho de Zhang <i>et al.</i> (2017)</b>	<b>47</b>
<b>2.5.6</b>	<b>Subsídios obtidos do trabalho de Liang <i>et al.</i> (2017)</b>	<b>48</b>
<b>2.5.7</b>	<b>Subsídios obtidos do trabalho de Gao <i>et al.</i> (2019)</b>	<b>49</b>
<b>2.5.8</b>	<b>Subsídios obtidos do trabalho de Gonçalves <i>et al.</i> (2020a)</b>	<b>51</b>
<b>2.5.9</b>	<b>Subsídios obtidos do trabalho de Gonçalves <i>et al.</i> (2020b)</b>	<b>53</b>
<b>2.5.10</b>	<b>Subsídios obtidos do trabalho de Gómez <i>et al.</i> (2022)</b>	<b>55</b>
<b>2.5.11</b>	<b>Subsídios obtidos do trabalho de Stappenbelt <i>et al.</i> (2007)</b>	<b>55</b>
<b>2.5.12</b>	<b>Subsídios obtidos do trabalho de Blevins e Coughran (2009)</b>	<b>56</b>
<b>2.5.13</b>	<b>Síntese dos subsídios obtido a partir dos trabalhos consultados</b>	<b>58</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>60</b>

3.1	GRAUS DE LIBERDADE E SISTEMA DE COORDENADAS . . . . .	60
3.2	APARATO EXPERIMENTAL . . . . .	61
3.3	SISTEMA DE RASTREAMENTO ÓPTICO . . . . .	65
3.4	MATRIZ DE ENSAIOS . . . . .	66
3.5	METODOLOGIA DE ANÁLISE . . . . .	67
3.6	SUBSÍDIOS QUANTO À ANÁLISE DE INCERTEZAS . . . . .	68
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>71</b>
4.1	RESULTADOS E DISCUSSÕES PARA OS ARRANJOS COM 4 COLUNAS . . . . .	73
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES PARA OS ARRANJOS COM 3 COLUNAS . . . . .	79
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS . . . . .</b>	<b>89</b>
5.1	SÍNTESE DAS CONCLUSÕES DESTE TRABALHO . . . . .	89
5.2	PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .	92
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE A – AMPLITUDES ADIMENSIONAIS RMS . . . . .</b>	<b>99</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As interações fluido-estruturais são acoplamentos de leis que descrevem a dinâmica de fluidos e a mecânica estrutural, sendo caracterizadas por fenômenos determinados pelas interações entre uma estrutura deformável, ou em movimento, e o escoamento de um fluido, sendo este interno ou externo à estrutura (KANEKO *et al.*, 2008). Tais fenômenos ocorrem com frequência em nosso cotidiano, seja em sistemas naturais, como o caso do escoamento das válvulas sanguíneas, ou de sistemas artificiais, como tubulações e componentes de sistemas mecânicos; sempre quando submetidos a correntes de ar, escoamento de fluidos, ondas, correntezas ou, então, a mais de um destes fatores em simultâneo. Por oportuno, destaca-se que é importante considerar tais interações já nas fases iniciais do projeto de sistemas de engenharia, devido às possíveis falhas por fadiga decorrentes do surgimento de um comportamento oscilatório dessa natureza na estrutura (DEFENSOR FILHO, 2018).

A Vibração Induzida por Vórtices (VIV), do inglês *Vortex-induced Vibration*, é um dos fenômenos que possui caráter ressonante, e caso particular de Vibração Induzida pelo Escoamento (VIE). Trata-se de um fenômeno desencadeado a partir da sincronização entre uma das frequências naturais de oscilação do sistema e a frequência de emissão de vórtices advinda do escoamento no seu entorno. A partir dessa sincronização, ocorre uma oscilação auto-excitada e autolimitada com amplitude próxima à da seção transversal da estrutura.

Entretanto, existe um caso ainda mais particular de VIV, chamado de Movimento Induzido por Vórtices (VIM), que é utilizado para definir grandes plataformas flutuantes que possuem períodos de oscilação maiores, superiores a cem segundos (FUJARRA *et al.*, 2012). No caso das plataformas, se trata de um fenômeno complexo, onde ocorre o acoplamento dos movimentos da plataforma com as forças hidrodinâmicas (MAXIMIANO *et al.*, 2017).

O conhecimento acerca das modelagens analítica e numérica de fenômenos físicos pode ser considerado o cerne da engenharia (NAKAMURA *et al.*, 2013). Teoricamente, os problemas de interação fluido-estrutural podem ser modelados matematicamente por meio de um conjunto de equações diferenciais e condições de contorno adequadas, ou por meio de métodos computacionais como a Fluidodinâmica Computacional / *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Estes códigos computacionais apesar de serem relativamente versáteis, ainda não são capazes de modelar e descrever todos os problemas físicos existentes devido aos altos custos computacionais requeridos para a solução de problemas complexos, como a utilização de *clusters*.

Quando um fenômeno não pode ser caracterizado por métodos analíticos e numéricos, ou quando estes não são viáveis e ainda há o interesse em validá-los, a abordagem experimental é uma opção. A princípio, ensaios experimentais deveriam

utilizar protótipos em escala real do sistema de interesse, porém este pode ser dispendioso, como é o caso das plataformas *offshore*. Não é possível construir um protótipo da estrutura para que seja verificado o VIM, por exemplo. Uma opção viável é a construção de um modelo em escala reduzida para recriar o fenômeno com a maior fidelidade possível.

Raramente, no entanto, é possível reproduzir todas as condições de operação, ou de protótipos, em um arranjo experimental com todas as grandezas envolvidas. Então, deve-se ajustar as condições experimentais a quantidades adimensionais, como o número de Reynolds, por exemplo, de maneira a reproduzir de forma mais fidedigna possível a condição prototípica.

No caso das interações fluido-estruturais, ambas similaridades devem ser consideradas: a do fluido e a da estrutura, sendo que esta última para o caso das plataformas *offshore*, é obtida com o emprego de modelos cilíndricos rígidos elasticamente restaurados por intermédio de suportes elásticos, ou até mesmo molas equivalentes precisamente calibradas.

No âmbito deste trabalho, serão utilizados para o estudo da Vibração Induzida pelo Escoamento, arranjos de três cilindros, cuja configuração se assemelha a uma Turbina Eólica Flutuante Offshore / *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT), e quatro cilindros, configuração de uma plataforma de produção de petróleo do tipo semissubmersível. Importante destacar que, para efeito de comparação direta entre resultados, para os dois tipos de arranjos, compostos de 3 ou 4 colunas de seção circular, sempre será considerada uma razão de aspecto igual a  $L_{sub}/D = 2$ , onde  $L_{sub}$  é o comprimento submerso do cilindro e  $D$  o diâmetro e razão de massa variando de acordo com o número de colunas, sendo valores entre  $1,8 < m^* < 7$ . Além disso, as distâncias entre os centros destes corpos é função do diâmetro do cilindro circular, em razões inteiras  $S/D = 2, 3$  e  $4$ . Ainda, para cada distância entre centros, também são considerados os aproamentos, ou ângulos de incidência, de  $0$  e  $45$  graus para arranjos de 4 colunas, e de  $0, 90$  e  $180$  graus para arranjos de 3 colunas. Os modelos são testados mediante um conjunto de cinco velocidades distintas de escoamento, resultando em velocidades reduzidas na faixa de 4 a 14, o que corresponde a números de Reynolds no intervalo de 524 e 1196.

Os modelos em escala reduzida foram confeccionados em Plástico Poliacido Láctico (PLA) por meio de impressão 3D e foram submetidos a ensaios no Canal de Água Circulante (CAC), localizado no Laboratório de Interação Fluido Estrutura (LIFE), no campus Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina. Trata-se de um canal onde o controle da velocidade de escoamento ocorre por meio da alteração do calado na seção de teste, onde os arranjos foram submetidos a ensaios por tempo suficiente longo para que pudesse ser feita sua caracterização em parâmetros de interesse para VIE. A aquisição de dados ocorreu por meio de um sistema de rastreamento óptico

comercial, o Optitrack. Os dados coletados passaram por um tratamento e análise por meio de rotinas computacionais em Octave, a partir de técnicas de análise estatística e por intermédio da Transformada Rápida de Fourier / *Fast Fourier Transform* (FFT).

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho foram comparados principalmente com um caso de validação, que se trata de um modelo de cilindro único idêntico à cada uma das colunas dos arranjos. Também foram avaliados os modelos entre si, verificando os conjuntos que possuem melhor suscetibilidade ao fenômeno, mediante a influência do aproamento na dinâmica do sistema em diferentes velocidades.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Na literatura acadêmica acerca do fenômeno de Vibração Induzida pelo Escoamento, existe um número limitado de trabalhos experimentais que avaliem arranjos de cilindros em números de Reynolds abaixo de 10000. Entretanto, a quantidade aumenta quando busca-se trabalhos que possuam abordagens numéricas e estes resultados obtidos computacionalmente necessitam de validação.

Uma vez que simulações numéricas para avaliar o fenômeno de VIM requerem grande poder computacional, este trabalho tem como uma das principais justificativas mapear o comportamento de modelos de plataforma em escala reduzida, em baixos números de Reynolds. Assim, validam-se os resultados provenientes de CFD, mas também podem ser selecionados os arranjos de interesse para um posterior estudo, em trabalhos futuros, em altos números de Reynolds, diminuindo o número de casos a serem avaliados.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia experimental para investigação do fenômeno de Vibração Induzida pelo Escoamento em modelos em escala reduzida e regime de baixo Reynolds. Além desta metodologia, o trabalho também possui o intuito de obter as respostas em VIE, como amplitudes e frequências, de estruturas compostas por um conjunto de três e quatro cilindros circulares com diferentes espaçamentos. Além da variação no número de cilindros e nas distâncias entre estes, também são avaliados diferentes ângulos de incidência do escoamento em uma faixa de número de Reynolds entre 524 e 1196.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Construir modelos em escala reduzida de cilindros únicos e arranjos de três e quatro colunas circulares, de forma a obter baixo número de Reynolds no

sistema.

- b) Propor um aparato experimental que seja capaz de obter registros temporais para os modelos.
- c) Caracterizar os arranjos de cilindros circulares para uma faixa definida de velocidades em termos de frequência natural de oscilação no ar e na água.
- d) Obter as trajetórias adimensionais na direção do escoamento ( $A_x/D$ ) e na direção transversal ao escoamento ( $A_y/D$ ) dos sistemas de cilindro único e arranjos.
- e) Obter as médias entre os 10% de maiores picos de deslocamento nas direções X e Y para cada combinação de arranjo-velocidade-aproamento-distância entre colunas.
- f) Verificar e discutir a aderência dos resultados obtidos frente a literatura acerca do tema.
- g) Verificar a influência da distância entre colunas na resposta do sistema, bem como os aproamentos.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TEXTO

O texto é estruturado em mais quatro capítulos. Esta introdução é sucedida por uma revisão teórica dos conceitos de mecânica dos fluidos necessários para compreender e analisar os ensaios experimentais, além de uma coleção de subsídios obtidos de publicações acerca da FIV. No capítulo subsequente, a metodologia empregada nos experimentos e na análise destes é descrita com base nos materiais e métodos empregados. Os resultados experimentais obtidos são elencados e discutidos no quarto capítulo, de forma a compará-los com a literatura acerca da resposta em arranjos de cilindros submetidos a escoamentos de baixo número de Reynolds. O último capítulo indica as conclusões deste estudo e sugere trabalhos futuros que sigam esta mesma linha.

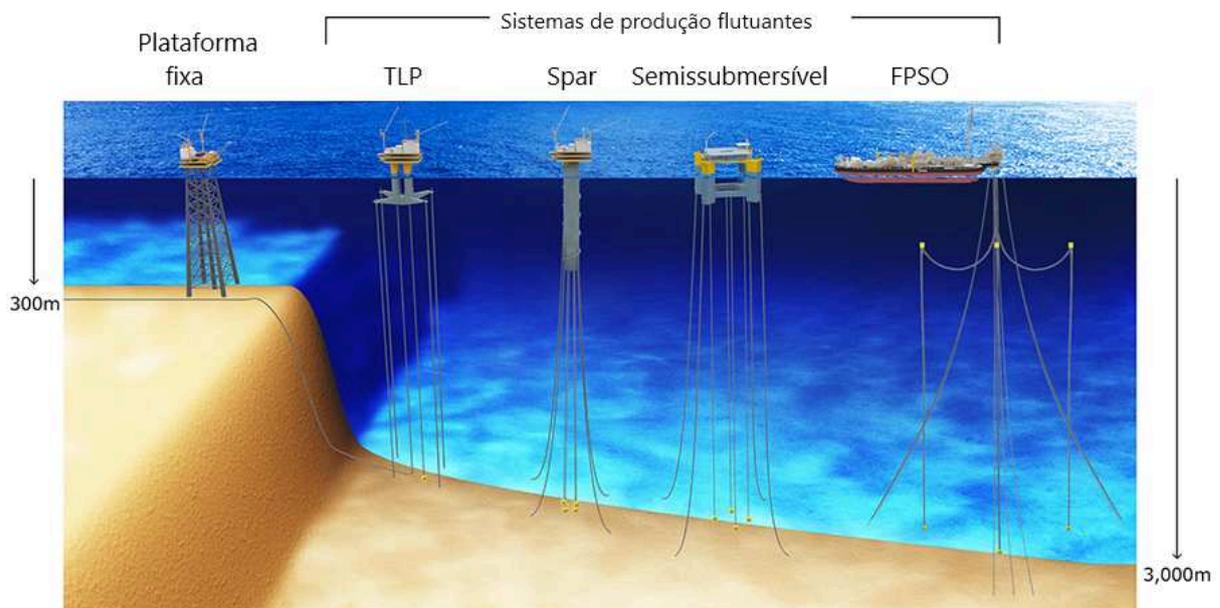
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo possui duas funções: a primeira delas é construir o conhecimento teórico acerca da fenomenologia da Vibração Induzida pelo Escoamento e, principalmente, sua conceitualização. Para tanto, são apresentados conceitos e formulações da mecânica dos fluidos, que tratam dos escoamentos externos, da emissão de vórtices, do arrasto e da sustentação. A segunda função deste capítulo, adicionalmente, é revisar a literatura de forma a colecionar subsídios científicos a partir de um elenco de publicações que abordem a temática e que possuam principalmente abordagens experimentais em seu escopo, utilizando modelos em escala reduzida com características semelhantes aos deste estudo.

### 2.1 OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS OFFSHORE E AS TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE

As plataformas de produção de petróleo e gás podem ser classificadas como fixas e flutuantes (Figura 1). Como a própria nomenclatura diz, plataformas fixas estão presas ao solo, ao passo que as plataformas flutuantes possuem sistemas de ancoragem e são estruturas complacentes (EL-REEDY, 2012), ou seja, admitem certo grau de movimento no plano da superfície livre em relação a uma posição de equilíbrio.

Figura 1 – Sistemas de produção fixos e flutuantes.



Fonte: Adaptado de MODEC (2022).

Com o aumento das lâminas d'água nos campos de exploração, se fez necessário desenvolver novas técnicas e estruturas para que fosse possível essa tarefa de extração e produção de petróleo. Dentre essas soluções, os tipos de unidade de

extração e produção offshore são a *Floating Production Storage Offloading* (FPSO), *Tension Leg Platform* (TLP), spar e semissubmersível (detalhes também na Figura 1).

De acordo com Speight (2015), a instalação do tipo FPSO consiste em um casco, semelhante a um petroleiro ou convertido a partir dele, que se mantém ancorado ao leito marinho. De fato, FPSO é a sigla para *Floating Production, Storage and Offloading*, ou seja, um sistema para a produção, armazenamento e descarga de petróleo e gás. A produção ocorre no FPSO ancorado que processa e armazena óleo e gás extraídos, e regularmente descarrega o volume acumulado para um navio aliviador, que é responsável por transportá-lo até um terminal de recebimento junto à costa.

As plataformas do tipo TLP são flutuantes, mas presas a um determinado local por meio de tendões verticais extremamente tracionados que estão conectados ao leito marinho. São projetos empregados em lâminas d'água de até 900 metros e, apesar de serem similares às plataformas do tipo FPSO ou semissubmersíveis, ainda são considerados conceitos de construção relativamente novos.

Plataformas do tipo spar são constituídas por um único grande casco cilíndrico circular, ou por um conjunto de cilindros circulares interconectados e, eventualmente, complementados por estruturas treliçadas em sua porção inferior. No topo dessa estrutura cilíndrica ficam os conveses compostos por equipamentos de produção e alojamentos e a estrutura é ancorada ao leito marinho.

Por sua vez, a plataforma do tipo semissubmersível é formada por uma série de conveses que são apoiados em colunas e flutuadores submersos, cuja manutenção da posição no plano da superfície livre pode se dar tanto por um sistema de ancoragem tradicional, composto de âncoras e cabos, quanto por um sistema de posicionamento dinâmico, por meio de propulsores nas bases das colunas ou dos flutuadores. Plataformas do tipo semissubmersível e FPSO têm em comum a aplicação em sítios de produção à grandes lâminas d'águas, (CHANDRASEKARAN, 2020).

Embora se acredite que ainda exista uma grande quantidade de petróleo e gás em poços submarinos, um questionamento recorrente recai sobre o tempo pelo qual ainda teremos meios de obter energia a partir dessas fontes. Com a necessidade crescente de se obter energia, de preferência segundo maneiras cada vez mais limpas, outra aplicação para estruturas flutuantes offshore tem sido para o suporte de turbinas eólicas flutuantes offshore (FOWT).

As plataformas FOWT são sistemas flutuantes complexos, com conceitos similares aos da TLP, spar e da semissubmersível. Ainda que geometricamente de menor porte, as unidades flutuantes deste tipo passam por critérios mais exigentes em termos de estabilidade e da magnitude dos movimentos admitidos, como forma de garantir a operação das torres e aerogeradores para os quais dá suporte em alto mar.

Alguns projetos de unidades flutuantes para FOWT utilizam três colunas circulares em arranjo triangular, como é o caso da Kincardine (Figura 2).

Figura 2 – Unidade flutuante (em amarelo) de suporte à FOWT Kincardine instalada na Escócia.



Fonte: MODEC (2022).

De acordo com Liu *et al.* (2017), a geometria de plataformas do tipo semissubmersível também é suscetível ao fenômeno de VIM, ainda mais complexo que aquele presente em estruturas de cilindro único, como é o caso das plataformas do tipo spar.

Para o caso das plataformas multicolunas, o fenômeno de emissão de vórtices ocorre ao redor de cada coluna e, desta forma, a interferência entre esteiras compõe um modelo de emissão complexo, que depende de vários aspectos, dentre os quais, destaca-se o ângulo de incidência (ou aproamento) da correnteza.

Conforme já descrito no capítulo anterior, estes são justamente os aspectos em foco neste trabalho, visto que em seus objetivos consta o estudo da dinâmica de modelos em escala reduzida que são semelhantes a unidades flutuantes de FOWT, verificando a influência de parâmetros geométricos de construção, qual sejam a distância entre colunas e o ângulo de incidência da correnteza com vistas ao fenômeno de Vibração Induzida pelo Escoamento (VIE).

## 2.2 GRANDEZAS ADIMENSIONAIS

Nas próximas seções deste capítulo, e de fato ao longo de todo o texto, números adimensionais serão citados frequentemente. Estes dão o embasamento para o entendimento fenomenológico envolvido, quer seja para a própria concepção dos modelos em escala reduzida, quer para a interpretação e comparação dos resultados experimentais obtidos com aqueles disponíveis na literatura. Assim sendo, esta seção trata

exclusivamente das grandezas adimensionais de maneira sucinta, subsídio importante para a compreensão da fenomenologia em foco.

De uma maneira geral, as grandezas adimensionais são números ditos puros e que não possuem unidade física atrelada a eles. São constituídas a partir de um conjunto de grandezas físicas, que por meio de relações matemáticas, se simplificam. Esses números adimensionais possuem significado quando relacionados a sistemas específicos em um determinado campo de aplicação.

### 2.2.1 Número de Reynolds $Re$

O número de Reynolds  $Re$ , relaciona forças inerciais e viscosas envolvidas nos problemas de mecânica dos fluidos:

$$Re = \frac{UD}{\nu}, \quad (1)$$

onde  $U$  é a velocidade do escoamento, medida em  $[m/s]$ ,  $D$  é a dimensão característica do corpo, medida em  $[m]$ , e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido, medida em  $[m^2/s]$ .

O número de Reynolds, portanto, permite avaliar qualitativamente o tipo de escoamento em relação à estabilidade do fluxo, ou seja, se este flui de forma laminar ou turbulenta. Além disso, conforme será mostrado mais adiante, sabe-se que o aumento de  $Re$  implica no aumento das amplitudes de respostas de VIE, particularmente aquelas devidas aos fenômenos de VIV/VIM.

### 2.2.2 Razão de aspecto $A_R$

Para os fenômenos de VIE, a razão de aspecto  $A_R$  é outra grandeza adimensional, definida como o quociente entre o comprimento submerso efetivo e a dimensão da seção transversal do sistema estudado, também chamado de comprimento característico<sup>1</sup>:

$$A_R = \frac{L_{sub}}{D}, \quad (2)$$

onde  $L_{sub}$  é o comprimento submerso efetivo, medido em  $[m]$ , e  $D$  a dimensão da seção transversal, também em  $[m]$ .

A razão de aspecto é, desta forma, uma grandeza adimensional utilizada para qualificar a característica tridimensional do escoamento a jusante de um cilindro. Assim sendo, quando maior for o valor de  $A_R$ , maior a possibilidade de se considerar que os efeitos tridimensionais a jusante de um cilindro imerso em escoamento fluido uniforme estejam concentrados a pouca distância de sua extremidade livre.

<sup>1</sup> No âmbito deste estudo, será adotado o diâmetro do cilindro.

### 2.2.3 Razão de massa $m^*$

A razão de massa  $m^*$ , ou massa reduzida como também é conhecida, refere-se à relação entre a massa estrutural do sistema em oscilação e a massa de fluido deslocado pela porção imersa do sistema:

$$m^* = \frac{m_s}{m_f}, \quad (3)$$

onde  $m_s$  é a massa estrutural em oscilação, e  $m_f$  é a massa de fluido deslocado pelo sistema, ambas medidas em [kg].

Conforme revisão bibliográfica mais adiante, sabe-se que a razão de massa também tem efeito que impacta de forma significativa as amplitudes de respostas dos fenômenos de Vibração Induzida pelo Escoamento, de tal forma que, quanto maior o valor de  $m^*$ , normalmente menor será a amplitude a vibração observada.

### 2.2.4 Velocidade reduzida $V_R$

Finalizando a apresentação das grandezas adimensionais importantes para este trabalho, descreve-se a velocidade reduzida  $V_R$ , que é a razão entre a velocidade do escoamento incidindo em um corpo, e o produto da frequência natural de oscilação do sistema pela sua dimensão característica, o que, de fato, tem relação com a velocidade intrínseca de oscilação do sistema. Assim sendo:

$$V_R = \frac{U}{f_n D}, \quad (4)$$

onde  $U$  é a velocidade do fluido, medida em [m/s],  $f_n$  é a frequência natural do sistema, medida em [Hertz], e  $D$  é novamente sua dimensão característica, medida em [m].

Como grandeza adimensional, a velocidade reduzida é importante para a apresentação, caracterização e discussão sobre as mudanças que acontecem com as amplitudes e frequências de respostas durante o fenômeno de sincronização, característica marcante do fenômeno de VIV, mais adiante descrito.

## 2.3 ESCOAMENTOS EXTERNOS

Voltando à fundamentação teórica, os escoamentos são denominados externos quando ocorrem ao redor de um corpo imerso.

De acordo com Munson *et al.* (2013), duas abordagens são utilizadas para se obter informações acerca das forças fluidas desenvolvidas neste tipo de escoamento. A primeira delas é a teórica, basicamente composta por investigações analíticas e numéricas, das quais provém uma parte significativa do conhecimento que se possui atualmente. A segunda, é a experimental, linha investigativa imprescindível para a abor-

dagem de problemas e fenômenos ainda sem uma compreensão completa e fechada, como é o caso do fenômeno de VIV.

Entretanto, no âmbito dos fenômenos de interação fluido-estrutural de VIE, esse conhecimento teórico (analítico e/ou numérico) ainda é consideravelmente limitado ao trato de geometrias mais simples, e em condições menos severas de excitação, devido à complexidade das equações governantes.

Há que se destacar, no entanto, os grandes avanços na área de métodos numéricos aplicados à fluidodinâmica computacional, que têm viabilizado análises de geometrias e arranjos estruturais mais complexos e em condições mais severas, na medida em que avança principalmente o poder computacional disponível. Apesar disso, grande parte do conhecimento que se possui acerca dos escoamentos externos ainda é produto de investigações experimentais em escala reduzida (MUNSON *et al.*, 2013); abordagem metodológica fundamental deste trabalho.

Ainda no campo dos escoamentos externos, a interação entre um corpo e um fluido pode ser descrita por forças que atuam na interface fluido-corpo. Essa interação ocorre quando existe um movimento relativo entre o corpo e o escoamento – se o corpo se move através de um fluido ou se um fluido se move ao redor de um corpo –, dando origem a forças que podem ser descritas como funções:

- da tensão de cisalhamento na parede (resultante dos efeitos viscosos);
- da tensão normal (resultante da pressão); e
- dos esforços de campo (resultante da gravidade, tipicamente).

A velocidade do escoamento ao qual um corpo está submetido é chamada de velocidade de escoamento livre, usualmente denotada por  $U_\infty$ . A distribuição da velocidade próxima ao corpo estacionário, no entanto, varia de zero na sua superfície (na ausência de escorregamento) até o valor da velocidade de escoamento livre, longe da superfície do corpo.

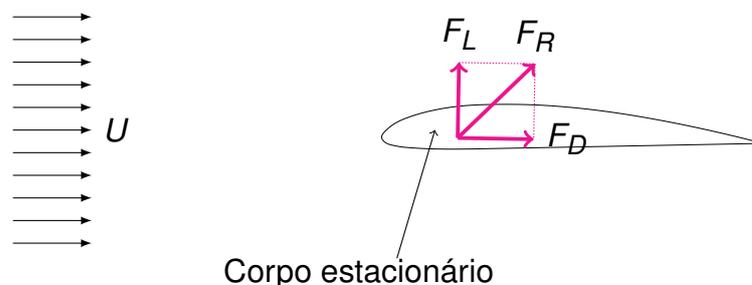
De acordo com Munson *et al.* (2013), entre muitos outros autores, o formato do corpo influencia o escoamento ao seu redor e, portanto, o campo de velocidades e pressões adjacente, sendo este escoamento considerado bidimensional quando a geometria estudada tem grande razão de aspecto  $A_R$ , com seção transversal constante e o escoamento é normal à direção longitudinal.

Esta abordagem é apropriada quando o corpo possui comprimento suficiente para que os efeitos em suas extremidades sejam desprezados e o escoamento incidente possa ser considerado uniforme.

A Figura 3 representa um corpo estacionário submerso e submetido a um escoamento de velocidade uniforme  $U$ . O fluido exerce uma força, a força total ( $F_R$ ), no corpo estacionário, perpendicular à superfície deste. Esta força total pode ser decom-

posta em duas componentes, uma na direção do movimento e outra perpendicular ao movimento.

Figura 3 – Forças agindo sobre um corpo estacionário imerso em escoamento fluido uniforme.



Fonte: Autoria própria (2022).

A componente da força total que está na direção do escoamento é chamada de força de arrasto ( $F_D$ ), enquanto aquela perpendicular ao escoamento é a força de sustentação ( $F_L$ ). Se houver simetria na seção transversal do corpo imerso ao escoamento fluido, a força de sustentação só ocorre quando houver um ângulo de ataque do corpo em relação ao escoamento. Do contrário, quando a direção do escoamento e o eixo do corpo simétrico estiverem paralelos, não há força de sustentação e apenas o arrasto ocorre.

### 2.3.1 Separação do escoamento

Caso o fluido em escoamento encontre um corpo de superfície curva, por exemplo circular, o fluido acompanha a curvatura no início do corpo, mas muito provavelmente não a acompanhará na porção final.

Assim, quando submetido a velocidades suficientemente altas e ao redor de um corpo, o fluido se desprende de sua superfície, em um fenômeno chamado de separação de escoamento. A causa dessa separação tem sua origem na geometria divergente do ambiente de escoamento na parte posterior do corpo, o que resulta em um gradiente de pressão adverso. É este gradiente que causa a separação da camada limite e a formação de uma camada cisalhante.

O ponto da geometria onde ocorre a separação depende de fatores como o número de Reynolds e a rugosidade superficial do corpo. Assim, se torna difícil prever o exato local onde esta separação irá ocorrer, a menos que o corpo possua cantos vivos ou mudanças abruptas na geometria da superfície, locais onde certamente acontecerá a separação do escoamento.

De acordo com Çengel e Cimbala (2010), entre outros autores, por exemplo, ao ocorrer a separação, é formada uma região “separada” entre o corpo e o escoamento.

mento, dotada de baixa pressão e onde ocorre a recirculação e o refluxo. Os efeitos da separação ainda podem ser percebidos a distâncias consideráveis a jusante do corpo, percebidos, por exemplo, por intermédio das flutuações na velocidade quanto comparada com a velocidade de escoamento livre  $U_{\infty}$ . A região do escoamento a jusante do corpo onde os efeitos deste sobre a velocidade são percebidos é chamada de esteira.

Como complemento vale descrever que a região separada chega ao fim quando as duas correntes de escoamento em cada lado do corpo se reconectam. Portanto, a região separada é um volume fechado, enquanto a esteira continua crescendo a jusante do corpo, até que se torne quase uniforme novamente. Efeitos viscosos e rotacionais são os mais significativos na camada limite, na região separada, e na esteira (ÇENGEL; CIMBALA, 2010).

Importante destacar também que a separação geralmente ocorre em escoamentos incidindo sobre longos cilindros ou esferas. Como resultado dela, vórtices são emitidos de maneira alternada, formando uma esteira a jusante do corpo.

As próximas seções descrevem as características e consequências dessa esteira de vórtices.

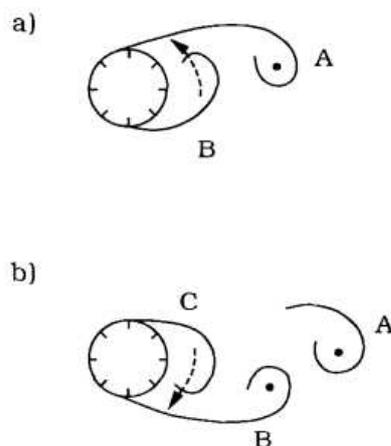
### 2.3.2 Emissão de vórtices em cilindros

Uma consequência importante da separação do escoamento é a formação e desprendimento de estruturas de fluido circulante na região da esteira, chamadas vórtices. A geração periódica dessas estruturas a jusante do corpo dá origem à esteira de vórtices, portanto, um resultado da emissão de vórtices.

Para números de Reynolds maiores que 40, ocorre o descolamento da camada limite, a separação do escoamento, e a formação de um par de vórtices contrarrotativos. Para pequenas perturbações, o par de vórtices, que é instável, se desequilibra na intensidade, e dá início à emissão alternada desses.

O mecanismo de emissão de vórtices é explicado por Gerrard (1966 apud SUMER *et al.*, 2006) e ilustrado na Figura 4a e Figura 4b. Segundo essa descrição, o vórtice maior A aumenta significativamente e atrai o vórtice B através da esteira. É a diferença de direção nos vórtices que irá ocasionar o desprendimento do vórtice A e este será convectado a jusante pelo escoamento. O vórtice C é formado do mesmo lado que o vórtice A (Figura 4b) e o vórtice B irá cumprir o papel do vórtice A, ou seja, ele irá aumentar o suficiente para atrair o vórtice C para a esteira e então se desprender. Esse desprendimento ocorre em uma dada frequência, conhecida como frequência de emissão de vórtices ( $f_s$ ), e importante para fenômenos ressoantes que podem acontecer, por exemplo a VIV.

Figura 4 – Mecanismo de emissão de vórtices.



Fonte: Sumer (2006).

O número de Reynolds  $Re$  tem influência sobre outros parâmetros adimensionais que descrevem o escoamento ao redor de um cilindro, ou seja, conforme este número se eleva, ocorrem mudanças no regime de escoamento, as quais podem ser ilustrativamente sumarizadas conforme a Figura 5.

Sumer *et al.* (2006) discutem as variações ilustradas na Figura 5. De acordo com os autores, a separação começa a aparecer em Reynolds maiores do que 5. Na faixa que compreende os valores  $5 < Re < 40$ , um par fixo de vórtices simétricos se forma na esteira e conforme o número de Reynolds se eleva, o tamanho desses vórtices também aumenta (BATCHELOR, 2000 apud SUMER *et al.*, 2006).

Se o número de Reynolds continua a aumentar, a esteira começa a apresentar instabilidade, o que eventualmente irá iniciar o fenômeno de emissão de vórtices. Este fenômeno, conforme já descrito, consiste no surgimento de vórtices alternadamente convectados em cada um dos lados do cilindro, a uma certa frequência característica. Consequentemente, o modelo a jusante do cilindro passa a exibir uma esteira de vórtices.

Para o intervalo de Reynolds  $40 < Re < 200$ , a esteira de vórtices é laminar, com a emissão praticamente bidimensional. A turbulência na região da esteira se inicia de forma transitória entre  $200 < Re < 300$ , e a esteira se torna totalmente turbulenta quando o número de Reynolds é maior que 300. Neste caso, inicia-se o regime subcrítico do escoamento, com uma camada limite laminar até  $Re < 3 \times 10^5$ . A partir deste valor, a camada limite começa a apresentar turbulência crescente com o número de Reynolds, sendo que a transição ocorre no ponto de separação.

No intervalo de  $3 \times 10^5 < Re < 3,5 \times 10^5$ , o chamado regime crítico, a turbulência na camada limite ocorre no ponto de separação de um dos lados do cilindro, enquanto o

outro lado permanece laminar. Essa assimetria tem impacto no registro da sustentação ao longo do tempo, sendo que este passa a não ter média zero.

O regime supercrítico compreende os valores de  $3,5 \times 10^5 < Re < 1,5 \times 10^6$ . A separação da camada limite é turbulenta em ambos os lados do cilindro, entretanto, a transição completa da camada limite ainda não ocorre, o que garante a existência de uma região transitória entre os pontos de estagnação e de separação da camada limite.

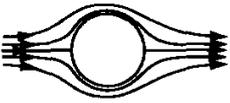
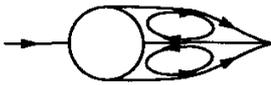
A camada limite só se torna completamente turbulenta para Reynolds maiores que  $1,5 \times 10^6$ , o que ocorre em apenas um dos lados do cilindro. O outro possui camada limite parte turbulenta e parte laminar. Esse regime chamado de transição superior, compreende valores até  $4,5 \times 10^6$ . Quando o número de Reynolds aumenta ainda mais, então finalmente ocorre o regime transcrito, onde a camada limite se torna completamente turbulenta.

## 2.4 VIBRAÇÃO INDUZIDA PELO ESCOAMENTO (VIE)

Os problemas de vibração devido ao escoamento ocorrem em muitas soluções tecnológicas e plantas industriais. Isto, em geral, impede o bom funcionamento ou baixa a eficiência desses sistemas. Como já descrito, a força atuando no corpo imerso em escoamento fluido irá variar devido à instabilidade do escoamento, e esta, por sua vez, pode causar vibração no corpo.

Há que se destacar, no entanto, que, mesmo para condições de escoamento constante, os problemas de vibração podem ser causados pelo desprendimento de vórtices a jusante do corpo, ou mesmo por outros fenômenos de interação fluido-estrutura acontecendo nas proximidades.

Figura 5 – Variação do escoamento conforme o aumento do número de Reynolds.

<p>a)</p> 	<p><math>Re &lt; 5</math></p>
<p>b)</p> 	<p><math>5 &lt; Re &lt; 40</math></p>
<p>c)</p> 	<p><math>40 &lt; Re &lt; 200</math></p>
<p>d)</p> 	<p><math>200 &lt; Re &lt; 300</math></p>
<p>e)</p> 	<p><math>300 &lt; Re &lt; 3 \times 10^5</math></p> <p>Subcrítico</p>
<p>f)</p> 	<p><math>3 \times 10^5 &lt; Re &lt; 3.5 \times 10^5</math></p> <p>Crítico (transição inferior)</p>
<p>g)</p> 	<p><math>3.5 \times 10^5 &lt; Re &lt; 1.5 \times 10^6</math></p> <p>Supercrítico</p>
<p>h)</p> 	<p><math>1.5 \times 10^6 &lt; Re &lt; 4 \times 10^6</math></p> <p>Transição superior</p>
<p>i)</p> 	<p><math>4 \times 10^6 &lt; Re</math></p> <p>Transcrítico</p>

Fonte: Adaptado de Sumer (2006).

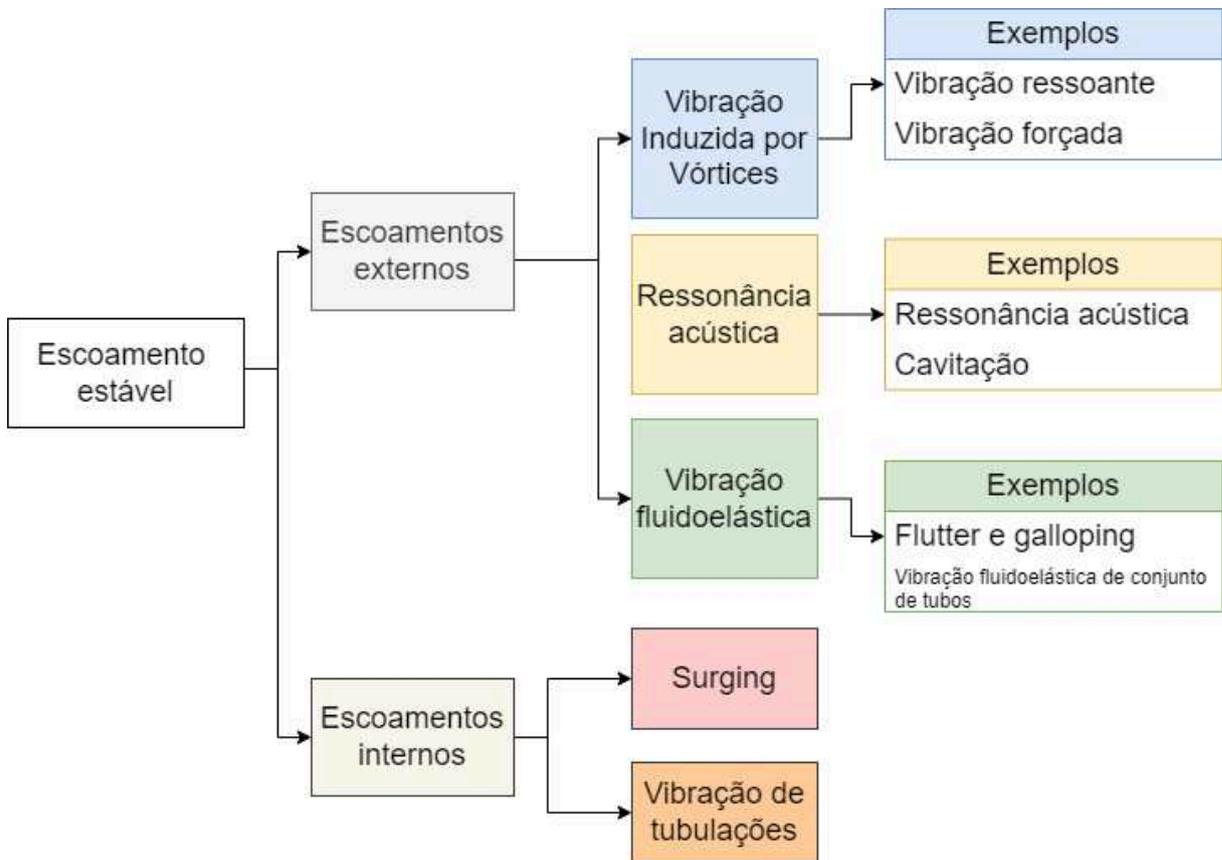
### 2.4.1 Classificação e modelagem das Vibrações Induzidas pelo escoamento

Nakamura *et al.* (2013) classificam o fenômeno de VIE com base no tipo de escoamento envolvido, sendo estes o escoamento estável, instável e bifásico.

Para a vibração em escoamento estável, o cenário observado quase sempre é aquele advindo da interação entre fluido e estrutura, levando a amplitudes de vibração cada vez maiores. No escoamento instável, por outro lado, as forças de turbulência são a fonte dominante de excitação da vibração estrutural. Já no escoamento bifásico, como este consiste em uma mistura de dois fluidos de densidades diferentes, a variação temporal do momento do escoamento atua como uma fonte de excitação para a estrutura. Além disso, a variação do momento e a variação da pressão também contribuem para a vibração estrutural. A Figura 6 apresenta a classificação, focada em escoamentos estáveis, particularmente aqueles tratados neste trabalho.

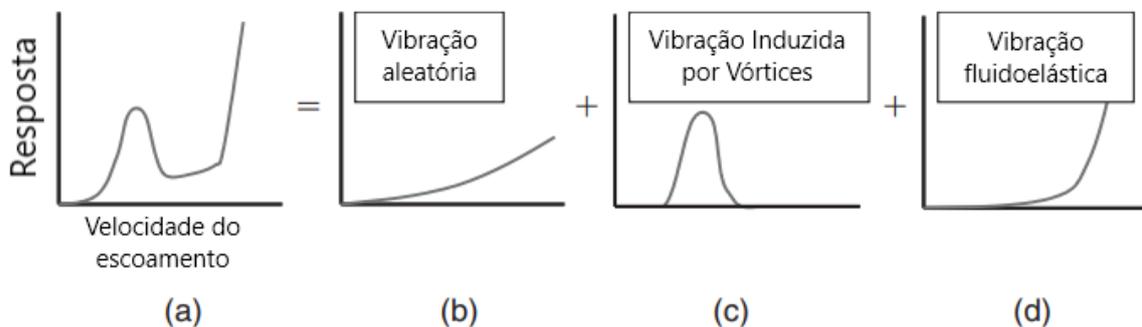
Existe uma tendência de se associar excitações de origem fluida à emissão de vórtices, porém deve-se ter em mente que a emissão de vórtices é um dos tantos mecanismos que podem ser responsáveis por fenômenos vibratórios. Assim, Nakamura *et al.* (2013) defendem que um comportamento oscilatório pode ter origem em um ou mais mecanismos e que especificar sua origem pode ser difícil. Um dos exemplos utilizados pelos autores é o da curva de resposta de um agrupamento de tubos excitado pelo escoamento na direção transversal.

Figura 6 – Classificação das Vibrações Induzidas pelo Escoamento com foco nos escoamentos estáveis.



Fonte: Adaptado de Nakamura *et al.* (2013).

Figura 7 – Composição da resposta de um agrupamento de tubos.



Fonte: Adaptado de Nakamura *et al.* (2013).

A resposta para o exemplo proposto por Nakamura *et al.* (2013) é dada graficamente na Figura 7, onde esta pode ser considerada como a sobreposição (composição)

de três fenômenos vibratórios com origens distintas. O primeiro é uma excitação turbulenta proporcional à velocidade de escoamento (Figura 7 (b)), o segundo é a VIV causada pela ressonância entre a frequência de emissão de vórtices e a frequência natural da estrutura (Figura 7 (c)) e a terceira causa é a instabilidade fluido-elástica após uma velocidade crítica de escoamento, o que resulta em um aumento abrupto da amplitude de vibração, Figura 7 (d).

Em relação aos experimentos conduzidos neste trabalho, sabe-se de antemão que o fenômeno de VIE também é resultado de uma sobreposição devido à própria natureza do sistema investigado, conjunto de cilindros circulares solitários entre si. Neste caso, no entanto, sabe-se que a predominância é de um fenômeno muito parecido com o VIV, assunto explorado na próxima seção.

#### **2.4.2 Vibração Induzida por Vórtices (VIV) e Movimento Induzido por Vórtices (VIM)**

Para a caracterização do fenômeno de vibração predominante nas unidades flutuantes offshore, um conceito importante ainda precisa ser apresentado, que é o conceito de estrutura ou corpo rombudo. Bearman (1984) define corpo rombudo aquele que, imerso em escoamento fluido, gera separação do mesmo em uma proporção substancial da sua superfície.

A literatura sobre VIV diz respeito principalmente a este tipo de corpo, uma vez que sistemas de engenharia, como pontes e trocadores de calor são considerados corpos rombudos (BLEVINS, 1990). Geralmente, tais vibrações são de preocupação secundária nos projetos, pelo menos até que sejam detectadas falhas graves, com perda de vidas e enormes passivos ambientais e econômicos.

Para a análise fluido-estrutural são elaborados modelos tanto para o fluido quanto para a estrutura. Os modelos estruturais tendem a ser considerados como osciladores lineares enquanto os modelos fluidos são mais difíceis de se definir, já que tratam de fenômenos não-lineares, normalmente envolvidos com múltiplos graus de liberdade simultaneamente excitados.

No processo de emissão de vórtices, a distribuição de pressão ao longo da superfície do corpo muda. Quando esses vórtices não são formados de forma simétrica, as forças de sustentação são diferentes em cada um dos lados do cilindro, o que resulta em um movimento transversal em relação ao escoamento. Essa movimentação influencia na própria formação de vórtices, resultando em movimento de amplitude limitada.

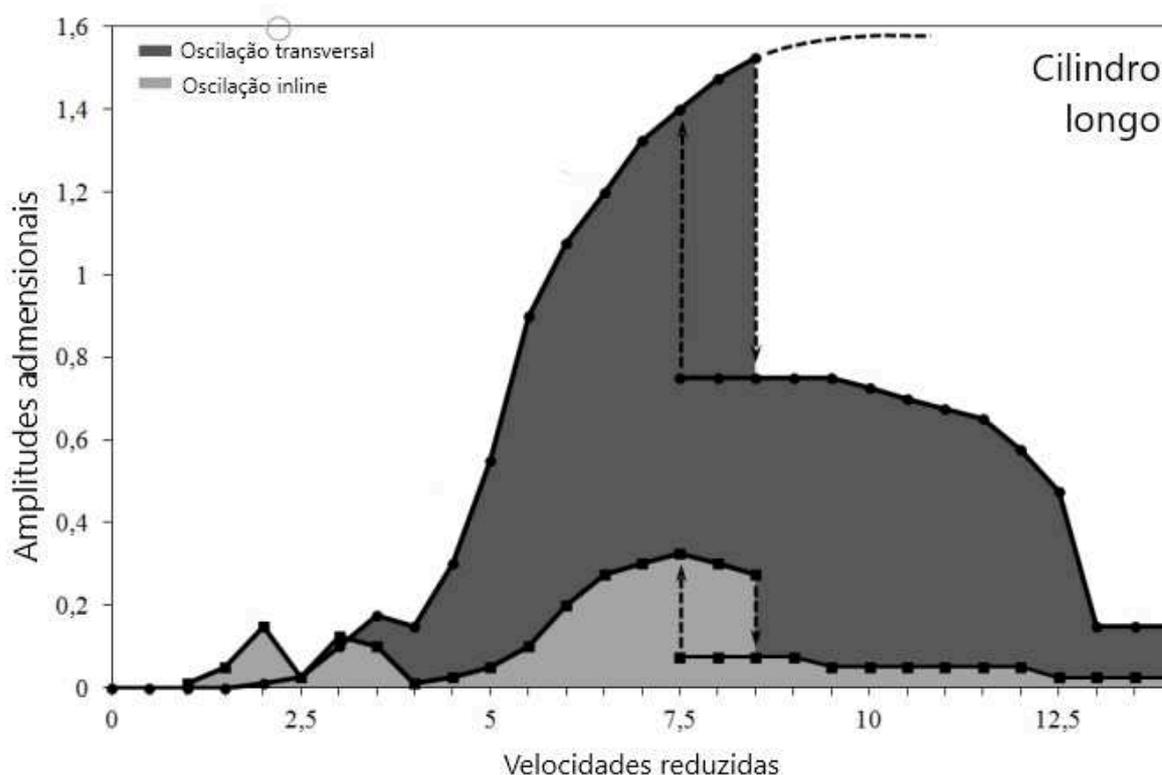
Blevins (1990) define o VIV como um fenômeno auto-excitado e autolimitado, porém de amplitude de respostas pequenas – da ordem do diâmetro do corpo –, mas que pode levar à falha por fadiga em estruturas. Por esta razão, o fenômeno possui grande importância de estudo, além da importância prática para as aplicações onde

ocorre.

O fenômeno de VIV ocorre quando há a sincronização entre a(s) frequência(s) natural(is) da estrutura submetida ao escoamento e própria frequência de emissão de vórtices. Esta sincronização de frequências é denominada *lock-in*.

O *lock-in*, se dá em uma determinada faixa de velocidades, para cada modo natural de vibração da estrutura. Outro fator que influencia no *lock-in* é a velocidade de incidência do escoamento. De acordo com Blevins (1990 apud HANNES, 2015), uma vez que os perfis de velocidade não são constantes e uniformes, pode ocorrer o agravamento dos efeitos de fadiga em estruturas longas e esbeltas, resultado da excitação multimodal.

Figura 8 – Comparação qualitativa entre amplitudes adimensionais em função da velocidade reduzida para cilindros longos.



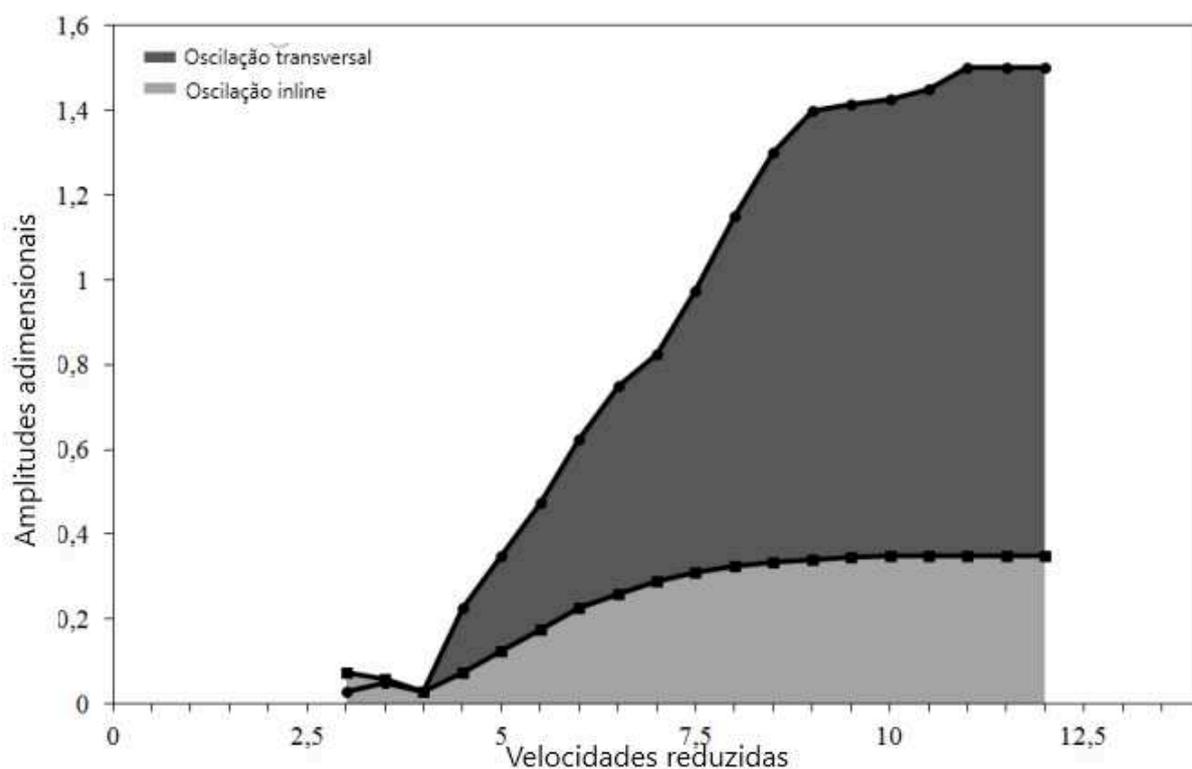
Fonte: Adaptado de Fujarra *et al.* (2012).

Além da fadiga na estrutura, Santos (2010) aponta que ocorre uma amplificação no coeficiente de arrasto como consequência da sincronização, resultante da geração de forças adicionais no sentido do escoamento. Como consequência, ocorre a movimentação no sistema, e um aumento do amortecimento devido ao acréscimo no coeficiente de arrasto.

Segundo Fujarra *et al.* (2012), o Movimento Induzido por Vórtices (VIM) é um caso particular de VIV. Ambos possuem o mesmo mecanismo de interação fluido-

estrutural – o mesmo comportamento auto-excitado e autolimitado – porém, a designação VIM é utilizada para sistemas grandes, como plataformas offshore de produção de petróleo e gás, onde os períodos de oscilação são dezenas de vezes maiores que aqueles normalmente identificados no fenômeno de VIV.

Figura 9 – Comparação qualitativa entre amplitudes adimensionais em função da velocidade reduzida para cilindros curtos.



Fonte: Adaptado de Fajarra *et al.* (2012).

Ainda segundo Fajarra *et al.* (2012), apesar das similaridades entre VIV e VIM, a fenomenologia do VIM em unidades flutuantes apresenta quatro aspectos referentes ao seu comportamento dinâmico e, por isso, merecem atenção especial. O VIM é caracterizado por altos números de Reynolds, oscilações em mais de um grau de liberdade, baixa razão de aspecto da geometria dos sistemas e baixa razão de massa.

Figura 10 – VIM como um caso particular de VIV.



Fonte: Adaptado de Fajarra *et al.* (2012).

Na Figura 10 podem ser observados os quatro aspectos principais que um sistema deve possuir para ser classificado como um sistema experimentando o Movimento Induzido por Vórtices. Plataformas reais do tipo monocoluna, segundo Fajarra *et al.* (2012), possuem números de Reynolds superiores a  $10^7$  na região supercrítica. De acordo com Blevins e Coughran (2009 apud FUJARRA *et al.*, 2012), o número de Reynolds influencia na amplitude transversal máxima para cilindros nus com  $m^* = 5,3$  para o intervalo  $Re = 2 \times 10^2$  a  $Re = 1 \times 10^5$ . Existe um segundo parâmetro a ser considerado, que é a rugosidade relativa da superfície e que, de acordo com os mesmos autores, ao ser aumentada de rugosidade relativa  $k/D = 1 \times 10^{-5}$  para  $k/D = 5 \times 10^{-3}$ , promove a redução da amplitude transversal de reposta para a metade, o que possivelmente tem relação com a mudanças na camada limite.

Roddier *et al.* (2009 apud FUJARRA *et al.*, 2012) inferiram a partir de estudos conduzidos em modelos de plataformas spar com  $L/D = 1,7$  que, primeiramente, os testes em escala reduzida de unidades flutuantes são uma boa solução para estudar os efeitos do VIM de forma confiável. Outro ponto levantado é que testes no regime subcrítico<sup>2</sup> são aceitáveis e levemente conservadores, e que as diferenças são mínimas para  $V_R \geq 7$ , no regime subcrítico.

Quando se busca similaridade entre comportamentos hidrodinâmicos exibidos por modelos e os sistemas em escala real, o número de Reynolds é o parâmetro mais importante a ser considerado. Entretanto, para o caso de unidades flutuantes submetidas ao fenômeno de VIM, se torna inviável a similaridade de Reynolds entre modelo reduzido e sistema real, já que para atingir tal similaridade, seria necessário

<sup>2</sup>  $300 < Re < 3 \times 10^5$

operar os ensaios em altas velocidades, impossíveis em tanques de prova.

A movimentação em mais de um grau de liberdade é de suma importância para sistemas submetidos ao VIM, principalmente em termos de vida em fadiga de *risers* e linhas de ancoragem de unidades flutuantes. Apesar de um sistema real se movimentar em todos os seis graus de liberdade, avaliar o comportamento de um modelo em escala reduzida em todos eles não é algo trivial. Majoritariamente, os estudos feitos em modelos de pequena escala versam sobre dois graus de liberdade: no sentido do escoamento e transversal ao escoamento. A simples coexistência de oscilações em ambas as direções traz mudanças significativas no comportamento dinâmico do sistema, que muitas vezes exhibe oscilações em formato de O ou 8. No tocante a abordagens experimentais, conjuntos de cabos e molas podem ser utilizados em montagens de ensaios de forma a permitir a movimentação nos seis graus de liberdade. Para um dimensionamento preciso do sistema restaurador, é necessário levar em consideração não apenas a rigidez, mas também problemas de amortecimento, movimentos e perturbações das linhas restauradoras (FUJARRA *et al.*, 2012).

Fujarra *et al.* (2012) comenta em sua publicação de estado da arte acerca de VIM, que plataformas de petróleo possuem valores de razão de massa até inferiores a um. Blevins e Coughran (2009) avaliaram a influência da razão de massa, coeficiente de amortecimento e do número de Reynolds para sistemas de 1 e 2 Graus de liberdade (GDL). Foi reconhecido um ramo de movimentos acoplados em formato de 8 e altas amplitudes na direção transversal, sem discutir o padrão de desprendimento responsável por isso. Ao aumentar a razão de massa, os movimentos acoplados deixaram de existir em valores menores de velocidade reduzida. Por outro lado, diminuindo a razão de massa, o ramo inferior de resposta apareceu gradualmente em velocidades reduzidas mais baixas.

A razão de aspecto é um parâmetro que possui influência principalmente no tocante às emissões de vórtices no sistema. Segundo Fujarra *et al.* (2012), existe um consenso de que a frequência de emissão de vórtices  $f_s$  diminui conforme a razão de aspecto diminui. A maioria dos estudos envolvendo este parâmetro são de cilindros em cantilever, com uma extremidade engastada e outra livre, ou seja, existem poucos estudos que versem acerca da influência da razão de aspecto na dinâmica do fenômeno de VIM, mesmo em regimes de baixo Reynolds. O trabalho de Gonçalves *et al.* (2011) evidencia que os cilindros em 2 graus de liberdade continuam apresentando ressonância de emissão de vórtices, mesmo em razões de aspecto menores, de forma similar o que ocorre em cilindros mais longos.

Neste trabalho, por se investigar as VIE em modelos reduzidos submetidos a escoamentos de baixos números de Reynolds e com apenas dois graus de liberdade analisados, sabe-se de antemão que o fenômeno de Movimento Induzido por Vórtices (VIM) é predominante. Ainda assim, para efeito de completude, a designação adotada

será a de VIE, que engloba todos os possíveis mecanismos de excitação que podem estar presentes na dinâmica em foco.

## 2.5 ESTADO DA ARTE ACERCA DA VIBRAÇÃO INDUZIDA PELO ESCOAMENTO (VIE)

As duas primeiras conferências relacionadas ao tema relativo à vibração induzida por fluidos ocorreram em 1972 e 1979, ambas como iniciativa do Prof. Naudascher, da universidade alemã de Karlsruhe (NAKAMURA *et al.*, 2013). Na conferência de 1979, foram apresentados muitos problemas práticos relacionados à vibração e ruído induzidos pelo escoamento em uma ampla variedade de campos industriais, como sistemas mecânicos, engenharia civil, aeronaves, navios e usinas nucleares. A conferência incluiu muitos resultados interessantes que ainda hoje são pertinentes, e que compõe a literatura clássica acerca do tema.

O termo *Flow-Induced Vibration (FIV)*<sup>3</sup> foi proposto em 1977 pelo Dr. Robert Blevins, autor do primeiro livro-texto acerca do fenômeno (BLEVINS, 1990)). Trata-se, provavelmente, da primeira publicação que classifica a VIE baseada nos dois tipos básicos de escoamento: o estacionário induzido e o instável relativo. O segundo livro do mesmo autor (BLEVINS; PLUNKETT, 1980) foca nas frequências e modos de vibração de sistemas, tanto fluidos quanto estruturais, sempre relacionados aos fenômenos de VIE.

A publicação de Bearman (1984) é outra obra seminal, que é uma revisão da literatura acerca da emissão de vórtices em corpos rombudos oscilantes. Dentre uma variedade de trabalhos avaliada, é citado um dos primeiros trabalhos que abordam os efeitos relacionados a vórtices em estruturas livres para oscilar, publicado por Feng (1968). Os experimentos de Feng foram realizados em um túnel de vento, com cilindros circulares de três polegadas de diâmetro, e também com cilindros de seção-D. O estudo mostrou que o escoamento ao redor de corpos rombudos pode se alterar rapidamente com a mudança da velocidade.

Bearman (1984), analisando o experimento conduzido por Feng (1968), conclui que a relação entre a velocidade reduzida  $V_R$  e a amplitude de movimento pode tornar difícil a determinação da importâncias de ambos os parâmetros no campo de escoamento. Entretanto, a vibração forçada utilizada no experimento traz o benefício de se controlar as condições experimentais. Contudo, devido a interação com os parâmetros estruturais, apenas uma faixa curta de velocidades e amplitudes adimensionais em experimentos de vibração forçada se mostraram importantes para posteriores estudos de vibração forçada pelo escoamento.

---

<sup>3</sup> Vibração Induzida pelo Escoamento

Tabela 1 – Levantamento de publicações que versem sobre a resposta de arranjos de cilindros.

<b>Autor (ano)</b>	<b>Seção</b>	<b>Colunas</b>	<b>S/D</b>	<b>Abordagem</b>	<b>Re</b>	<b><math>\theta</math></b>
Gómez <i>et al.</i> (2022)	C	4	3,5	N	150	0, 45
Gonçalves <i>et al.</i> (2020a)	C, Q, D	3	2, 3 e 4	E	$10^3 - 110 \times 10^3$	0, 90 e 180
Gonçalves <i>et al.</i> (2020b)	C, Q, D	4	2, 3 e 4	E	$10^3 - 110 \times 10^3$	0, 45
Chen e Chen (2016)	Q	4	$\sim 4$	N	-	45
Zhang <i>et al.</i> (2017)	Q	4	$\sim 4$	E	$16 \times 10^3 - 37 \times 10^3$	0, 15, 22.5, 45
Liu <i>et al.</i> (2016)	Q	4	3,72	E	$1,8 \times 10^4 - 10^5$	0, 15, 30, 45
Kubo <i>et al.</i> (1995)	C	2, 3, 4	2, 3 e 4	E	$710 - 4,2 \times 10^4$	0, 45, 90 e 180.
Gao <i>et al.</i> (2019)	C	4	5	N	150	0, 45
Liang <i>et al.</i> (2017)	Q	4	3,72	N-E	$2 \times 10^4 - 10^5$	0, 45
Han <i>et al.</i> (2015)	C	4	5	N	80, 160	0
Blevins e Coughran (2009)	C	1	-	E	$170 - 150 \times 10^3$	-
Stappenbelt <i>et al.</i> (2007)	C	1	-	E	$\sim 10^4$	-

Legenda: C - Circular ; Q - Quadrada ; D - Diamante; N - Abordagem numérica ; E - Abordagem experimental.

Fonte: Autoria própria (2022).

Cinco décadas depois da primeira conferência sobre o assunto, ainda não se possui uma compreensão fechada acerca dos fenômenos de VIE. Desta forma, esta seção tem como objetivo sintetizar o conteúdo de publicações que versam sobre a VIE em arranjos de três ou quatro cilindros, com abordagem experimental e/ou numérica e principalmente, que investiguem o fenômeno em termos de amplitudes e frequências de resposta.

A Tabela 1 elenca dez artigos encontrados no levantamento. Palavras-chave como *cylinder array*, *cylinder arrangement*, *low Reynolds*, *three columns*, *four columns*, *experimental*, *response*, *VIV*, *VIM* e *FIV* foram utilizadas nas buscas, nas bases de dados ScienceDirect, Scopus e Mendeley. Foram excluídas publicações cujos resultados fossem focados em emissão de vórtices e medições de força, e artigos com maior ou menor número de colunas do que o presente trabalho.

Nesta busca, nenhuma publicação que trate de experimentos realizados em arranjos de três e quatro cilindros, na mesma faixa de Reynolds deste trabalho, foi encontrada. Assim, até onde se pôde apurar, pode-se inferir que se trata de um trabalho com contribuição diferenciada, talvez original, nesse tema.

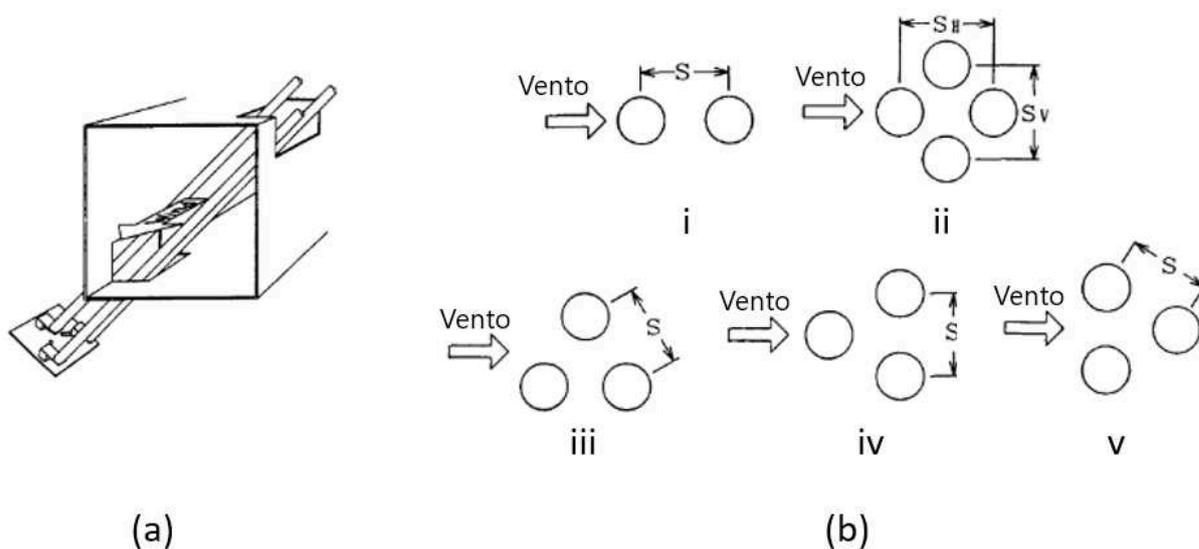
### 2.5.1 Subsídios obtidos do trabalho de Kubo *et al.* (1995)

O estudo mais antigo mediante as diretrizes de busca descritas foi o publicado por Kubo *et al.* (1995). Diferente dos demais, trata-se de um estudo aerodinâmico, realizado em túnel de vento, que avalia os estais de pontes. Os experimentos visam estudar a substituição de um único estai por configurações de estais de menor diâmetro, e mais leves, de forma a resultar em estruturas mais baratas e eficientes. Fenômenos de interação fluido-estrutural como VIV, *flutter* e *galloping* são especialmente importantes para caso de pontes, tendo como exemplo o caso da Ponte de Tacoma, em 1940, onde a estrutura entrou em ressonância em um vendaval, causando o colapso da estrutura (ARIOLI; GAZZOLA, 2017).

Segundo os autores, o emprego de sistemas com múltiplos cilindros induzem *galloping* causado pela esteira de um elemento no outro, o que proporciona uma amplificação na vibração. No entanto, é importante ressaltar que, atualmente, o fenômeno de *galloping* é tratado majoritariamente em estruturas rombudas e assimétricas, como cilindros de seção quadrada, por exemplo.

Conforme ilustrado na Figura 11, os experimentos foram conduzidos em túnel de vento, utilizando detector de deslocamento a laser, com modelos em condição de ângulo de ataque zero, caracterizados por tubos longos de alumínio com 25 mm de diâmetro e 4 m de comprimento, em agrupamentos de dois, três e quatro espécimes. Os autores também variaram a distância entre os cilindros, sendo  $S/D = 2$  e  $4$  para arranjos de 3 colunas e  $S/D = 3$  e  $4$  para o arranjo de quatro colunas. A faixa de Reynolds estudada para testes sem ângulo de ataque foi de  $7,2 \times 10^2$  a  $4,2 \times 10^4$ .

Figura 11 – (a) Ilustração do experimento conduzido por Kubo *et al.* (1995). (b) Seções submetidas aos ensaios.



Fonte: Adaptado de Kubo *et al.* (1995)

Segundo esses experimentos, Kubo *et al.* (1995) avaliaram os comportamentos das colunas independentes (não solidárias) e estes resultados mostraram que para o arranjo (iii) da Figura 11, tanto o cilindro a montante, quanto o cilindro acima, sofrem puramente o fenômeno de VIV, enquanto o cilindro a jusante apresenta um *galloping* induzido pela esteira. Não é discutida a distância para este aproamento em especial. Os arranjos (iv) e (v), por sua vez só tem *galloping* induzido pela esteira na configuração de  $S/D = 2$ , o arranjo com maior distância relativa sofre majoritariamente VIV para cada uma das três colunas.

Para o caso de quatro colunas, notou-se que VIV foi excitado para o cilindro a montante em velocidades reduzidas superiores a 5, o que havia acontecido para os demais arranjos. De acordo com Kubo *et al.* (1995), o mecanismo de excitação do VIV para este caso é diferente do comum, uma vez que os cilindros acima e abaixo do cilindro a montante delimitam a esteira formada pelo cilindro a vante, o que faz com que as respostas aerodinâmicas são induzidas por uma faixa maior de velocidades. Os cilindros centrais deste arranjo possuem resposta similar a de cilindros únicos, enquanto o cilindro a jusante sofre com efeitos de esteira, também apresentando o fenômeno de *galloping* em ambos os espaçamentos estudados. Por fim, o estudo conclui que o arranjo ótimo para a aplicação é o (iii) Figura 11, com espaçamento  $S/D = 4$ .

Apesar deste estudo contribuir para este trabalho de forma a compreender a dinâmica das colunas do modelo isoladamente, o fato de não ter sido avaliado o conjunto solidário o impossibilita de ser comparado de forma quantitativa com esta

dissertação. Porém, a avaliação em separada de cada um dos caos é justificável pela sua aplicação na construção civil e também pelas limitações tecnológicas da época.

### 2.5.2 Subsídios obtidos do trabalho de Han *et al.* (2015)

Han *et al.* (2015) conduzem um estudo puramente numérico de conjuntos de quatro cilindros livres para oscilar com distância relativa de 5, a números de Reynolds iguais a 80 e 160, na faixa de velocidade reduzida compreendida entre 3 e 14. O foco dos autores é visualizar a emissão de vórtices e a esteira, além de parâmetros de força como coeficientes de arrasto e sustentação, bem como trajetórias dos cilindros.

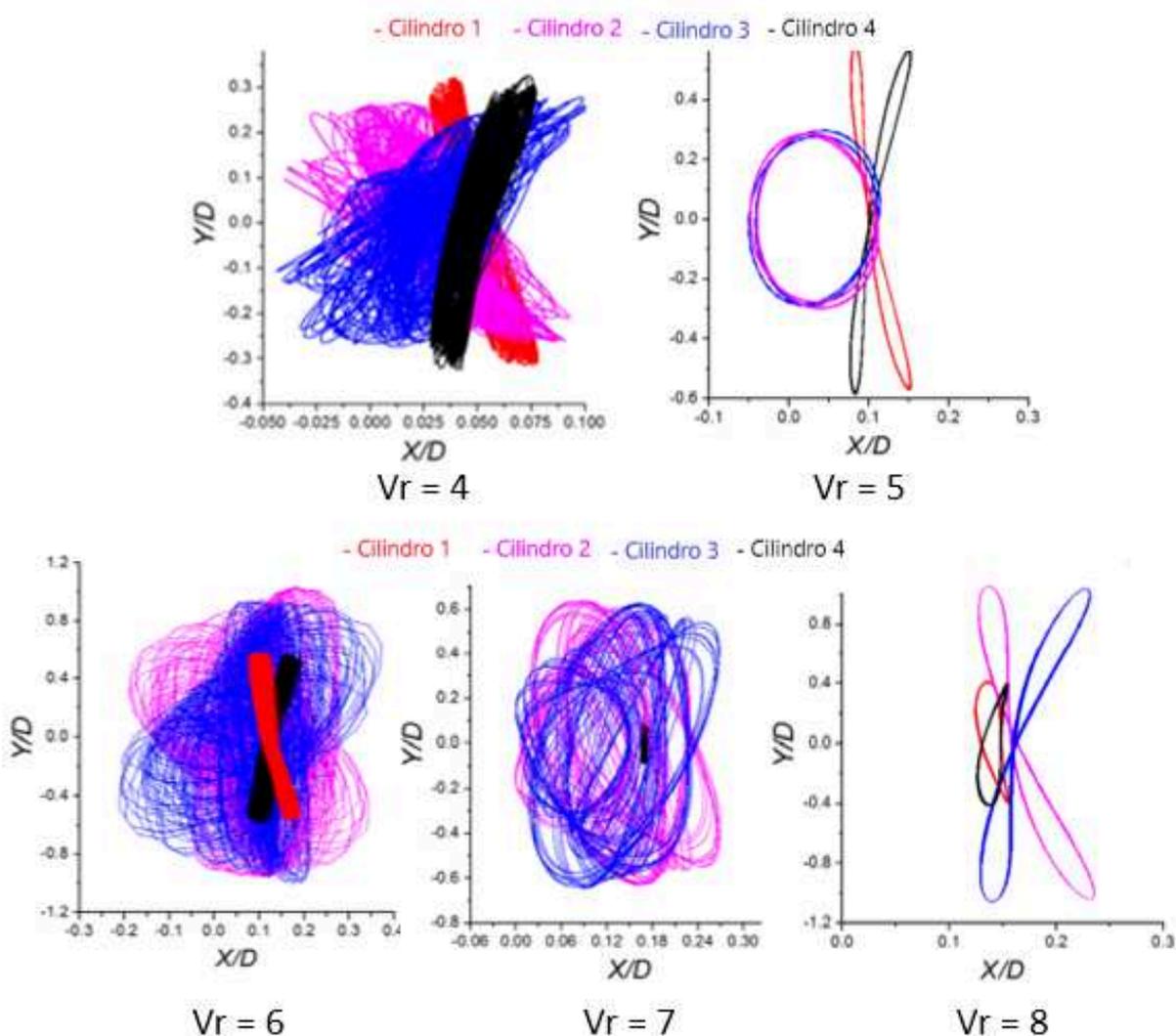
A seleção da distância se deve por esta ser a esperada para a formação de uma esteira madura, além de facilitar a visualização de possíveis efeitos da esteira do cilindro a montante nos demais. Os baixos números de Reynolds, que estão dentro do regime de fluxo laminar, são adotados para permitir um estudo bidimensional (2-D). O objetivo é revelar os mecanismos básicos da interação fluido-estrutura e investigar o efeito das velocidades reduzidas variando de 3 a 14 para cada cilindro. Além disso, alguns dados experimentais são comparados com os resultados numéricos para demonstrar as características básicas do sistema VIV de quatro cilindros.

Os cilindros são idênticos e cada um deles é conectado a um sistema massa-mola, de forma a indicar que estão livres para oscilar de maneira independente. A densidade de cada cilindro é considerada uniformemente distribuída, o que implica que as frequências naturais nas duas direções são iguais a  $f_{n_x} = f_{n_y} = f_n$ . O ângulo de incidência do escoamento é  $0^\circ$ , portanto todo o sistema é simétrico em relação à linha central. Para obter a maior amplitude, o efeito de amortecimento externo para cada cilindro é nulo. A massa reduzida do cilindro é 6.

Em termos de frequência, o estudo mostra que elas aumentam conforme a velocidade do escoamento aumenta, e que os dois cilindros superiores possuem a mesma performance entre si, e o mesmo ocorre com os dois inferiores. Ocorre a sincronização nas regiões de velocidade reduzida entre 5 e 7 na direção do escoamento, e entre 5 e 8 na direção transversal ao escoamento para o número de Reynolds mais baixo. Para  $Re = 160$ , dois ramos de excitação estão presentes, sendo um primeiro na faixa clássica de 5 a 7, e outro na faixa de 3 a 14.

Outro ponto interessante é que o estudo apresentou trajetórias X-Y não-simétricas e figuras irregulares em “formato de 8” e em “formato de O” foram observadas, que podem ser verificadas na Figura 12.

Figura 12 – Trajetórias X-Y de uma parte das velocidades reduzidas estudadas.



Fonte: Adaptado de Han *et al.* (2015)

Sob as vibrações induzidas pela esteira, as amplitudes vibratórias máximas gerais nas direções longitudinal e transversal são maiores para os cilindros a jusante do que nos cilindros a montante. Os aumentos na amplitude são causados principalmente pelos efeitos ressonantes. As regiões de ressonância são analisadas e os fenômenos de ressonância dupla são observados para todos os cilindros.

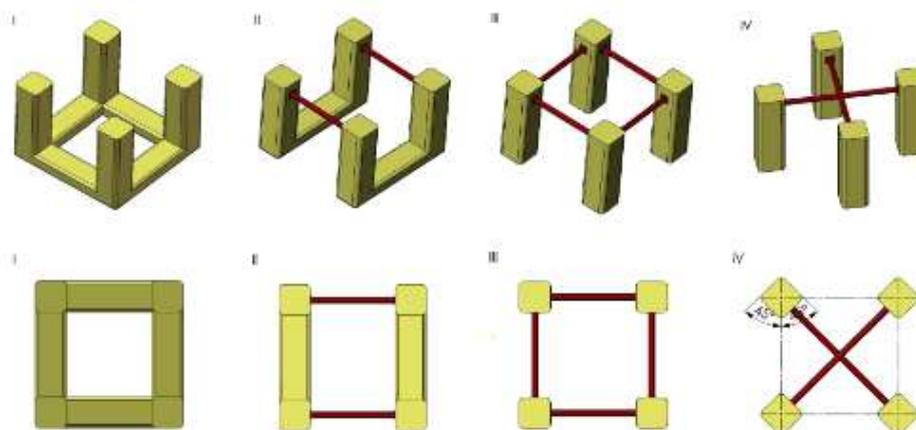
### 2.5.3 Subsídios obtidos do trabalho de Liu *et al.* (2016)

Diferente dos estudos apresentados anteriormente, Liu *et al.* (2016) verificam a influencia dos pontões em plataformas semissubmersíveis de maior calado. Tratam-se de projetos que melhoram movimentos verticais ao passo que leva a VIM crítico atribuídas a cargas flutuantes nas colunas. Tanto os pontões quanto as colunas produzem

interferências complexas de esteira e, assim, influenciam o fenômeno de VIM deste tipo de plataforma.

Quatro configurações diferentes foram estudadas, sendo estas de 4 pontões + 4 colunas, 2 pontões + 4 colunas, 4 colunas quadradas e 4 colunas rombudas, que nada mais são do que seções quadradas, rotacionadas 45° e sem cantos vivos (Figura 13). Foram variados no estudo os ângulos de aproamento e as velocidades de ensaio, e os resultados de interesse são frequências, amplitudes e medidas de força.

Figura 13 – Modelos ensaiados experimentalmente.



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2016).

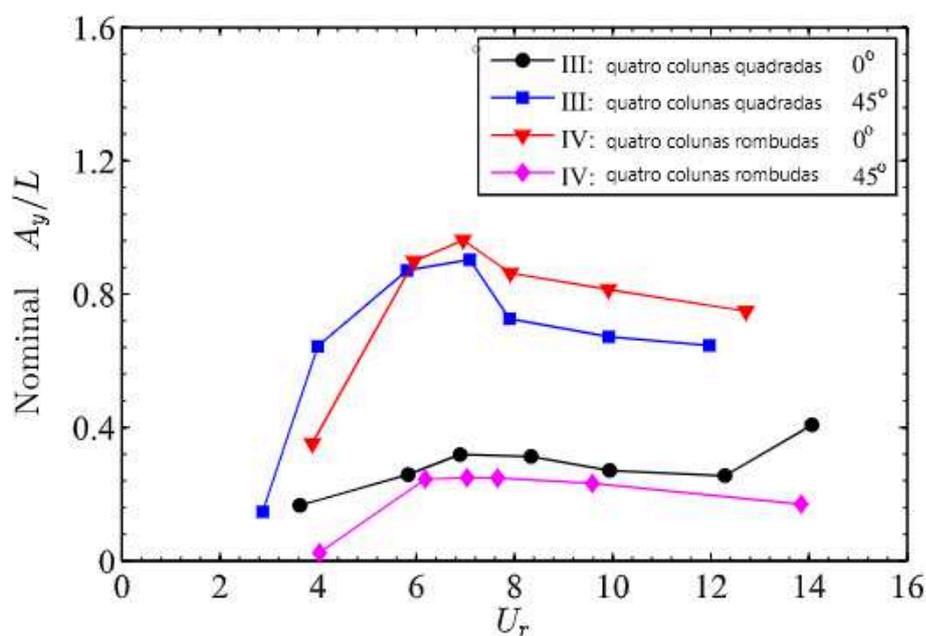
Os experimentos foram conduzidos em tanque de reboque e o range de velocidades que poderiam ser ensaiadas pelo carro de reboque e o comprimento do tanque foram fatores que determinaram a magnitude dos períodos típicos de respostas de VIM, e também determinaram o número de ciclos a serem registrados nos ensaios.

Liu *et al.* (2016) desenvolveram uma configuração experimental usando rolamentos de ar que pode permitir que o modelo se mova livremente no plano horizontal. Além disso, um conjunto de molas horizontais fracas foi empregado para fornecer a força de restauração horizontal para o modelo e para sintonizar aos períodos naturais no plano da superfície da água. Os cabos de amarração foram projetados para ficar acima do nível da água para evitar perturbar o processo de desprendimento do vórtice. Os movimentos de 6 graus de liberdade do modelo foram registrados pelo sistema de aquisição de movimento Qualisys, em sincronização com as forças de restauração usando quatro células de carga, uma para cada linha de ancoragem horizontal. Os resultados foram analisados tomando as estatísticas dos registros de tempo.

A Figura 14 apresenta as respostas transversais para as configurações que possuem apenas colunas. É possível verificar que as duas configurações de maior resposta são a III - 45° e a IV - 0°, aderente a estudos anteriores. As investigações

experimentais indicaram que o cilindro quadrado mostrava diferentes fenômenos de despreendimento de vórtices em diferentes ângulos de incidência. Quando o ângulo de incidência do cilindro quadrado é  $0^\circ$ , o VIE é dominado pelo *galloping* transversal (ou seja, a amplitude da oscilação aumenta linearmente com a velocidade reduzida, para além de alguns valores limiares); quando o ângulo de incidência do cilindro quadrado é de  $45^\circ$ , o VIE é dominado pela VIV, como no caso do cilindro de seção circular. Isso provavelmente é responsável pelas maiores amplitudes na direção transversal quando as colunas são posicionadas a  $45^\circ$  da corrente incidente.

Figura 14 – Resultados para as configurações III e IV.



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2016).

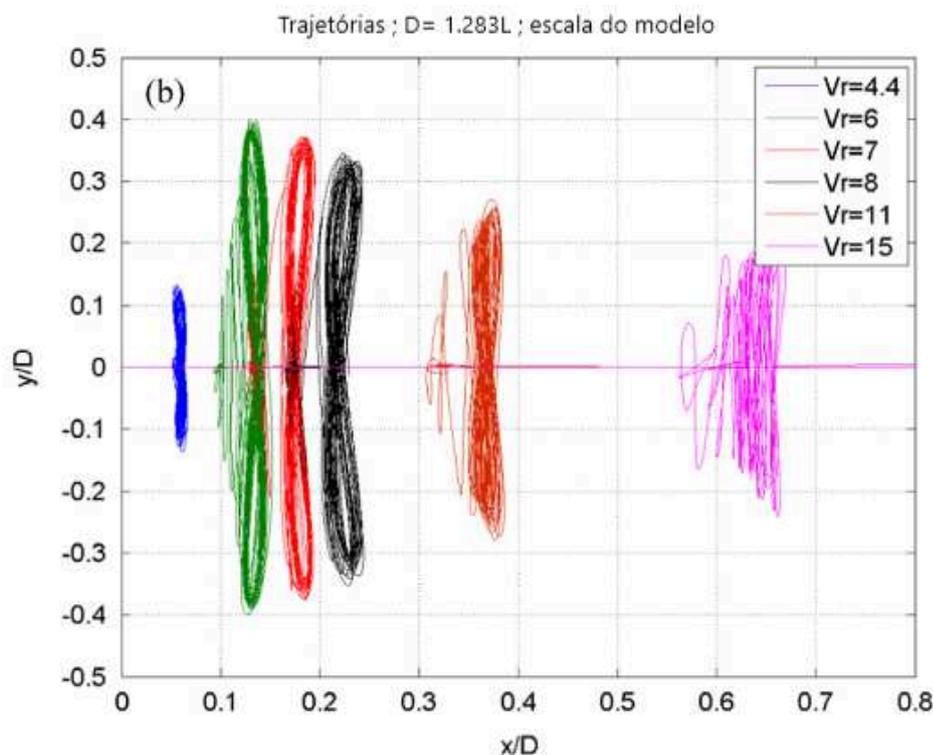
Apesar de se tratar de uma publicação de geometria de seção distinta do presente estudo, suas discussões e resultados são de grande valia para compreender os resultados aqui obtidos.

#### 2.5.4 Subsídios obtidos do trabalho de Chen e Chen (2016)

Chen e Chen (2016) realizam um estudo numérico envolvendo plataformas de quatro colunas de seção quadrada, com cantos vivos e cantos arredondados, em um aprofundamento de  $45^\circ$ . O estudo avalia um modelo com quatro pontões, o que torna o movimento dos cilindros solidários entre si, e isto influencia na resposta do sistema. Vale ressaltar que a simulação de CFD é rodada tanto para um conjunto em escala

real, quanto para um na escala reduzida 1:70. São avaliados parâmetros de força, amplitude de resposta do sistema e trajetórias no plano X-Y (Figura 15).

Figura 15 – Trajetórias X-Y para o modelo mais arredondado.



Fonte: Adaptado de Chen e Chen (2016).

Como esperado, o arredondamento dos cantos vivos influencia nos resultados, sendo que o pico de amplitude transversal ocorre no intervalo de  $6 < V_R < 7$ . Além disso, tanto o modelo quanto a plataforma em escala real possuem resultados aderentes entre si, porém a plataforma apresenta resultados maiores quando se aumenta o arredondamento do canto vivo. Chen e Chen (2016) justificam esta ocorrência devido à natureza caótica das interações entre forças/momentos e movimentos, mais que aqueles advindos da própria redução de escala.

### 2.5.5 Subsídios obtidos do trabalho de Zhang *et al.* (2017)

Zhang *et al.* (2017) apresentam estudos numéricos sobre VIM de uma plataforma flutuante de exploração de petróleo e gás com múltiplas colunas. Os cálculos numéricos são realizados usando uma simulação *Improved Delayed Detached eddy simulation* (IDDES) juntamente com uma abordagem de grade móvel. As respostas de movimento transversal e de rotação no plano (yaw), trajetórias de movimento, frequências de movimento e densidade espectral de energia dos movimentos são computadas e analisadas sistematicamente.

Depois de extensas comparações com experimentos, confirma-se que as soluções numéricas aderem com os resultados experimentais e são melhores do que aquelas via simulação *Delayed Detached Eddy Simulation* (DDES). As diferenças de respostas de movimento transversal entre resultados computacionais e experimentos são inferiores a 10% na região de lock-in. As simulações numéricas revelam que as respostas VIM transversais ocorrem em uma faixa de velocidades reduzidas de 7,0 a 14,0. A maior amplitude transversal nominal, em torno de 35% da largura da coluna, ocorre para incidência de corrente de 22,5°.

Verificou-se que as respostas do VIM atuam principalmente ao longo das diagonais da plataforma para aproamentos de 15°, 22,5° e 45°, sendo as s frequências de movimento transversal e de yaw para estas incidências maiores do que aquelas para o de 0°. Os níveis de energia das respostas do movimento de yaw para incidências de corrente 15°, 22,5° e 45°, são cerca de 10% daqueles para incidência de corrente 0°.

Além disso, estudos paramétricos foram realizados para examinar o efeito da altura da coluna submersa no VIM. Isso demonstra que o VIM na direção transversal cresce significativamente quando a altura da coluna submersa ( $L_{sub}/D$ ) é maior que 1. Para ser mais específico, em comparação com o caso com  $L_{sub}/D = 1,44$ , o VIM na direção transversal em  $L_{sub}/D = 3,0$  aumenta em cerca de 120%.

### 2.5.6 Subsídios obtidos do trabalho de Liang *et al.* (2017)

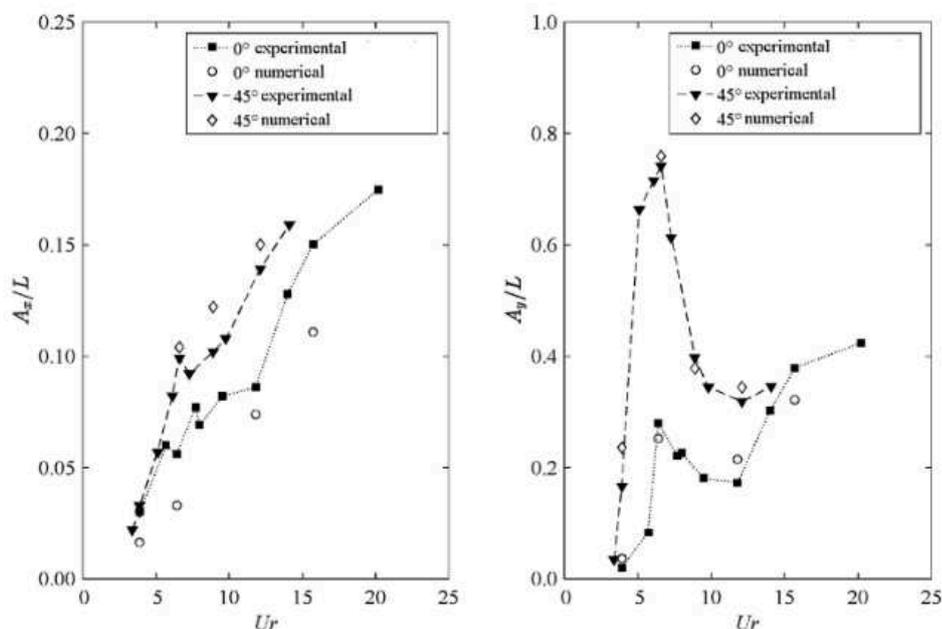
Liang *et al.* (2017) realizaram um estudo experimental sobre VIM em uma plataforma semissubmersível de calado profundo em um tanque de reboque, com o objetivo de investigar os efeitos do VIM na hidrodinâmica geral da estrutura. A fim de estudar a física dos fluidos associada ao VIM do modelo, uma simulação numérica foi realizada para examinar as características do desprendimento de vórtices e suas interações devido às múltiplas colunas cilíndricas.

As medições experimentais foram obtidas para movimentos planos horizontais, incluindo movimentos transversais, longitudinais e de rotação (yaw), bem como forças de arrasto e sustentação na estrutura. A análise espectral foi ainda realizada com base no histórico de tempo registrado. Esses dados foram posteriormente utilizados para validar o modelo numérico. O experimento possui uma configuração similar à proposta por Liu *et al.* (2016), utilizando células de carga e amarrações com molas para o posicionamento do modelo no tanque.

Como pode ser visto na Figura 16, os casos de ângulo de incidência 45° apresentam maiores valores de resposta em VIM nas duas direções. Para ambos os casos, a maior amplitude adimensional transversal ocorreu para  $V_R$  próximo a 6,5. O lock-in ocorre em faixas diferentes, dependendo do ângulo de incidência, sendo entre 6 e 9,5 para 45° e 5 e 9 para 0°. Também verificou-se que com o aumento da velocidade, o

movimento na direção longitudinal também se amplia para ambos os aproamentos.

Figura 16 – Amplitudes de resposta nas direções X e Y.



Fonte: Adaptado de Liang *et al.* (2017).

O texto também discute o fato de que os resultados numéricos replicarem os experimentais de maneira apropriada, porém resultando em valores maiores a baixos valores de  $V_R$ . Liang *et al.* (2017) também mencionam que a baixas velocidades, os efeitos de arrasto do tanque podem ter afetado os resultados experimentais, mas que esses efeitos são mitigados com o aumento da velocidade de reboque, especialmente na região em que ocorre o lock-in.

Resultados numéricos detalhados sobre as características do fluxo de vórtices revelaram que durante o lock-in, os processos de desprendimento de vórtices das colunas a montante aumentam os processos de desprendimento de vórtices das colunas a jusante, levando ao rápido aumento da magnitude do VIM. Além das medições experimentais, para os dois aproamentos uniformes ( $0^\circ$  e  $45^\circ$ ) investigados, dados numéricos abrangentes do estudo paramétrico sobre as características do VIM em uma ampla faixa de velocidades reduzidas também servirão como referências para estudos futuros.

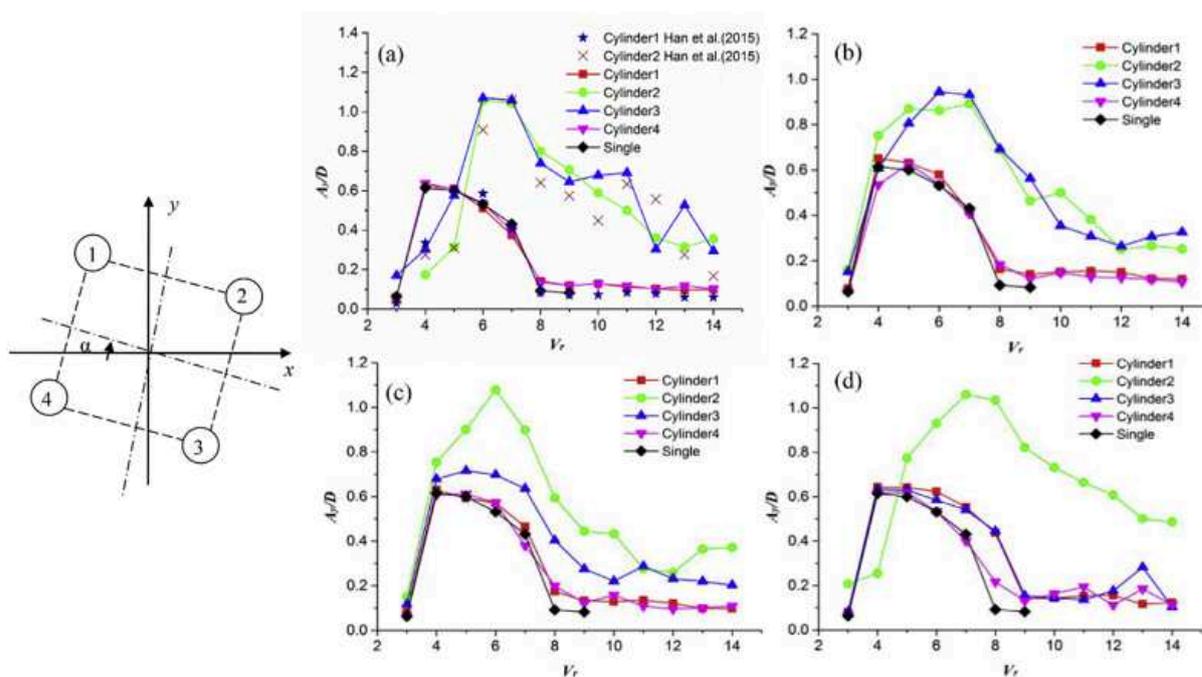
### 2.5.7 Subsídios obtidos do trabalho de Gao *et al.* (2019)

Gao *et al.* (2019) apresentam um estudo numérico do VIV de dois graus de liberdade em quatro cilindros circulares montados elasticamente em um arranjo quadrado com um baixo número de Reynolds de 150 e razão de massa de 2,0. O ângulo de

incidência variando entre  $0^\circ$  a  $45^\circ$  e a velocidade reduzida varia de 3 a 14. Os efeitos do ângulo de incidência e velocidade reduzida nas respostas dinâmicas e padrões de fluxo de esteira atrás de quatro cilindros são investigados. Cada um dos cilindros são livres para vibrar, não sendo um conjunto solidário.

Os resultados obtidos no que diz respeito a amplitudes de resposta na direção transversal ao escoamento podem ser vistos na Figura 17. Estes resultados mostram que o ângulo de incidência tem um efeito significativo nas amplitudes de vibração e dos quatro cilindros, especialmente para os cilindros a jusante, onde as máximas amplitudes de vibração e coeficientes de força ocorrem principalmente no cilindro a jusante. Com o aumento do ângulo de incidência, a trajetória orbital para cada cilindro torna-se irregular e complicada, especialmente para velocidades reduzidas maiores que 8, correspondendo a múltiplas frequências de oscilação.

Figura 17 – Amplitudes de resposta na direção Y. (a)  $\theta = 45^\circ$  (b)  $\theta = 15^\circ$  (c)  $\theta = 30^\circ$  (d)  $\theta = 45^\circ$



Fonte: Adaptado de Gao *et al.* (2019).

Em velocidades reduzidas entre 4 e 14, vários picos de amplitudes no sentido da corrente para os cilindros 2 e 3 a jusante são observados. Uma possível explicação para esta observação é que os comportamentos do escoamento de entrada e da esteira para os cilindros a jusante são muito mais complexos do que os a montante, envolvendo interações entre as camadas de cisalhamento separadas dos cilindros a montante e os vórtices mútuos lançados a montante e a jusante, resultando em grandes amplitudes em uma ampla gama de velocidades reduzidas.

A partir das discussões acima, vale a pena notar que, independentemente dos ângulos incidentes, os cilindros a jusante geralmente experimentam grandes amplitudes transversais e correntes para a maioria das velocidades reduzidas examinadas. Curiosamente, as amplitudes transversais e correntes para os cilindros a jusante permanecem maiores do que os cilindros a montante em grandes velocidades reduzidas. Isso pode ser causado pelo prolongamento do regime de lock-in dos cilindros a jusante e pelas vibrações induzidas pela esteira dos cilindros a jusante, para as quais a distância entre os cilindros a montante e a jusante é considerada suficiente para permitir que os vórtices desprendidos dos cilindros a montante e as interações complexas entre os vórtices lançados dos cilindros a montante e a jusante e os cilindros a jusante podem resultar em altas amplitudes.

### 2.5.8 Subsídios obtidos do trabalho de Gonçalves *et al.* (2020a)

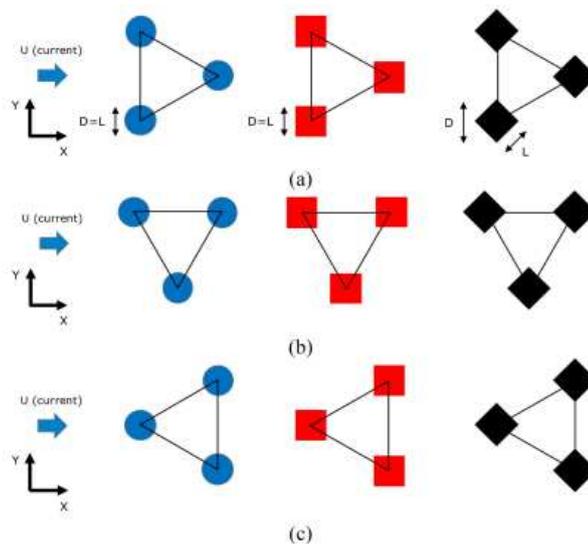
Dentre as publicações elencadas nesta seção, esta é a segunda que trata de arranjos de três cilindros. Gonçalves *et al.* (2020a) justificam a utilização de arranjos de três colunas de FOWT para projetos recentes e mais arrojados. A maioria dos estudos relacionados a cilindros arranjados em forma triangular trata de geometrias fixas (sem graus de liberdade), onde o objetivo é avaliar a interferência da esteira, mas em variação de distâncias ou de aproamentos do sistema. Os autores destacam que não haviam resultados experimentais na literatura que envolvessem o fenômeno de VIV para esta configuração.

Nesta linha, Gonçalves *et al.* (2020a) utilizam da abordagem experimental para entender o fenômeno. Modelos em escala reduzida, com seções transversais quadradas, circular e diamante são rebocados em um tanque, avaliando também os ângulos de incidência do escoamento ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $180^\circ$ ) e as distância entre colunas  $S/D = 2, 3, 4$  com velocidade máxima de reboque de 0,4 m/s.

O experimento consiste em modelos de acrílico com diâmetro de 250 mm para a seção circular e 220 mm para a seção quadrada, posicionados com auxílio de uma barra que suporta-os e facilita a troca do arranjo e seu posicionamento. Primeiramente foram conduzidos ensaios de decaimento para caracterizar a frequência do sistema em seus seis graus de liberdade, para então as corridas no carro de reboque fossem realizadas (Figura 18).

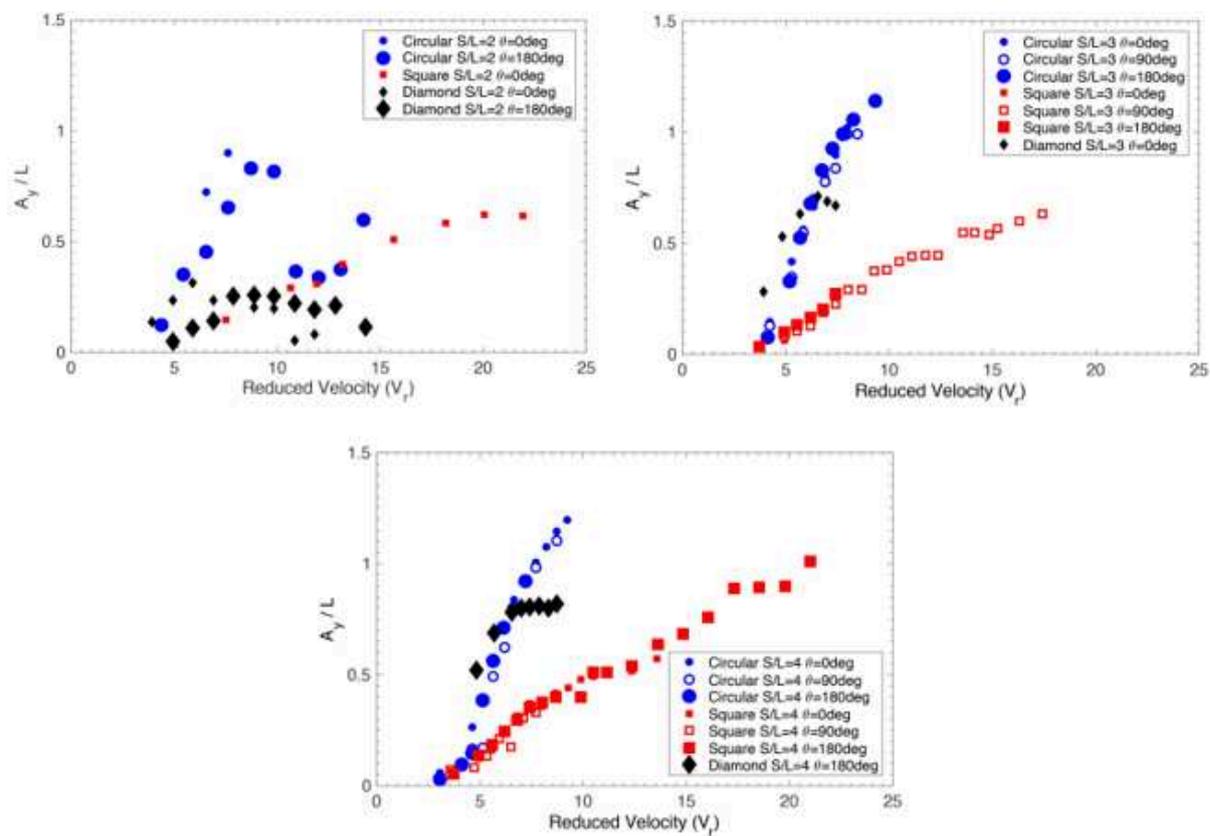
Como resultado (Figura 19), para todos os espaçamentos, a geometria da seção influencia nos resultados, sendo que os arranjos circulares mostraram maior amplitude de resposta nos três graus de liberdade avaliados (longitudinal X, transversal Y e rotacional yaw).

Figura 18 – Aproamentos ensaiados. (a)  $\alpha = 0^\circ$  (b)  $\alpha = 90^\circ$  (c)  $\alpha = 180^\circ$ .



Fonte: Gonçalves *et al.* (2020a).

Figura 19 – Amplitudes transversais adimensionais.



Fonte: Gonçalves *et al.* (2020a).

No caso  $S/D = 2$ , o ângulo de incidência afetou principalmente no grau de liberdade transversal, sendo que para o aproamento zero, as amplitudes foram maiores devido à interferência da esteira gerada pelos cilindros a montante no único cilindro a jusante. Na posição de  $180^\circ$ , a esteira do cilindro a montante causou redução da sustentação nos dois cilindros a montante.

No caso das colunas  $S/D = 3$ , o ângulo de incidência não afetou a amplitude de resposta de forma significativa na direção transversal, porém diferenças puderam ser observadas nos demais graus de liberdade. Não foi possível observar uma redução na amplitude de movimento com o aumento de  $V_R$  para as colunas circulares, porém havia a limitação de  $V_R < 10$  para a investigação do fenômeno.

Para os arranjos com maior espaçamento, o ângulo de incidência não demonstrou efeito nas amplitudes em Y, porém em X, principalmente para a seção circular, o aproamento é importante para os ângulos de  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Supõe-se que seja devido ao impacto do arrasto do modelo.

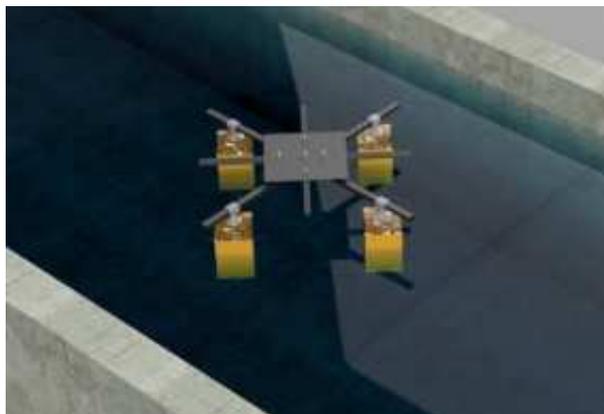
As conclusões principais são de que a partir de  $S/D = 3$ , a distância entre colunas pode ser negligenciada, uma vez que os resultados se mostram próximos. Outro ponto levantado é de que os ângulos de incidência afetam principalmente os movimentos na direção do escoamento. Comparando os resultados do estudo com a literatura sobre o tema, Figura 19 defende que os arranjos com três colunas possuem maior amplitude de movimento na transversal nas seções circulares.

### 2.5.9 Subsídios obtidos do trabalho de Gonçalves *et al.* (2020b)

Gonçalves *et al.* (2020b) realizaram experimentos em uma matriz de quatro cilindros flutuantes com baixa relação de aspecto, e três distâncias diferentes entre os centros das colunas,  $S/D = 2, 3$  e  $4$ . Assim como os arranjos do mesmo autor para conjuntos de três colunas, todos os ensaios foram realizados em um tanque de reboque. A matriz de quatro colunas foi suportada elasticamente por um conjunto de quatro molas lineares para fornecer baixo amortecimento estrutural ao sistema. Três diferentes geometrias de seção das colunas foram testadas, circular, quadrada e diamante. Dois diferentes ângulos de incidência de corrente foram testados,  $0$  e  $45$  graus. Essas configurações das matrizes de quatro colunas foram selecionadas para cobrir o alcance das principais plataformas SS – semissubmersíveis e TLP – tension leg. Os objetivos eram entender a natureza do fenômeno de VIE dos sistemas de quatro colunas. A faixa do número de Reynolds abrange  $10.000 < Re < 110.000$ .

O arranjo experimental utilizado para o posicionamento das colunas é similar ao presente em Gonçalves *et al.* (2020b) (Figura 20). Foram empregadas ao total quinze velocidades de reboque para cada uma das configurações estudadas. Os ensaios de VIV foram precedidos por ensaios de decaimento nos seis graus de liberdade de forma a caracterizar o sistema de interesse.

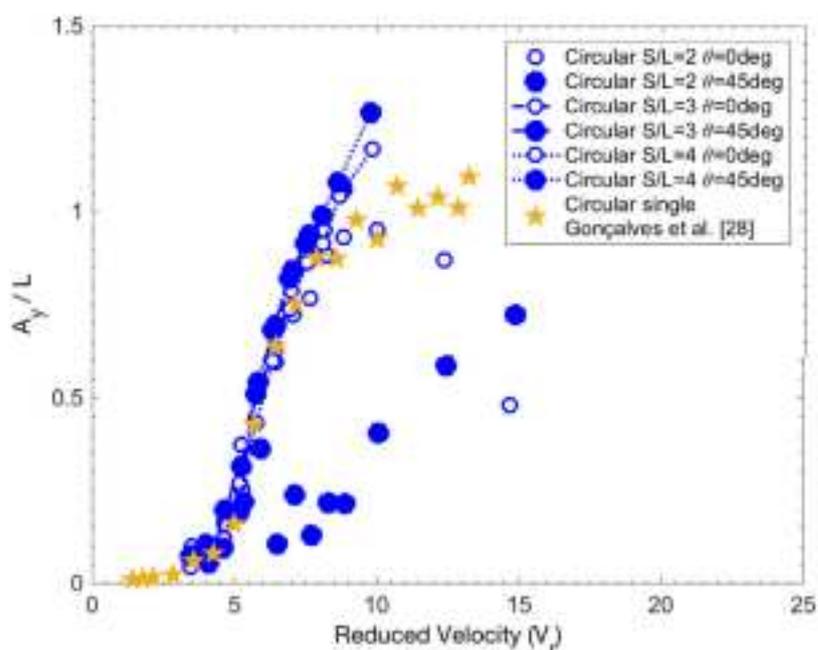
Figura 20 – Esquema do modelo no tanque de reboque.



Fonte: Gonçalves *et al.* (2020b).

Novamente, os cilindros circulares em geral apresentaram amplitudes transversais maiores do que as demais seções. Outro resultado que se repetiu foi que a distância passa a não ter mais influência para os arranjos com  $S/D > 3$ . Para  $S/D > 2$ , a fenomenologia não é afetada pelo aproamento em faixas de  $V_R < 10$ .

Figura 21 – Amplitudes adimensionais transversais dos arranjos circulares.



Fonte: Gonçalves *et al.* (2020b).

Em relação à geometria das seções das colunas, os resultados de amplitude mostraram valores maiores para o arranjo de quatro colunas do que para o caso de

um único cilindro para os casos circulares e de diamante, nos quais foi apresentada resposta dominada por VIM. Por sua vez, as amplitudes para o caso quadrado único foram maiores do que para o conjunto. Neste caso, observou-se a resposta dominada pelo fenômeno de *galloping*. Com relação à distância entre os centros das colunas, os resultados de amplitude para as quatro matrizes de colunas com  $S/D = 3$  e  $4$  foram muito semelhantes. A matriz de quatro cilindros com  $S/D = 2$  atuou como um único cilindro ou alterou significativamente a interferência da esteira devido à proximidade das colunas.

#### **2.5.10 Subsídios obtidos do trabalho de Gómez *et al.* (2022)**

O trabalho conduzido por Gómez *et al.* (2022) acompanha a linha das abordagens numéricas já descritas nas demais publicações de configuração similar. Se trata de um estudo em um e dois graus de liberdade de um conjunto de quatro cilindros circulares sujeitos a aproamentos de  $0$  e  $45$  graus, avaliados em  $Re = 150$  e  $S/D = 3,5$ , em velocidades reduzidas de  $1$  a  $14$ .

No estudo é mostrado que para  $S/D > 3,5$  existe um rápido desenvolvimento da esteira para o caso de dois graus de liberdade. Além disso, quando o segundo grau de liberdade é liberado neste espaçamento inicial, o espaçamento efetivo entre os cilindros muda com o tempo, permitindo uma interação mais intensa entre o cilindro a jusante e a esteira a montante. Verificou-se que quando a razão de espaçamento reduzida de  $5$  para  $3,5$ , a amplitude de oscilação transversal máxima geral levemente afetada.

Os cilindros lado a lado na configuração de  $45^\circ$  apresentam uma razão de frequência igual a  $2$ , sugerindo que o efeito da esteira do cilindro a montante e que passa pelos cilindros induz uma rigidez extra que é incorporada por meio da esteira na rigidez da estrutura.

A importância de elencar este estudo não está apenas no modelo utilizado, mas por este ser o mais recente. Em sua fundamentação teórica é mencionado que não existem trabalhos experimentais em baixo Reynolds que envolvam conjuntos livres para oscilar, muito menos arranjos solidários como o do presente trabalho.

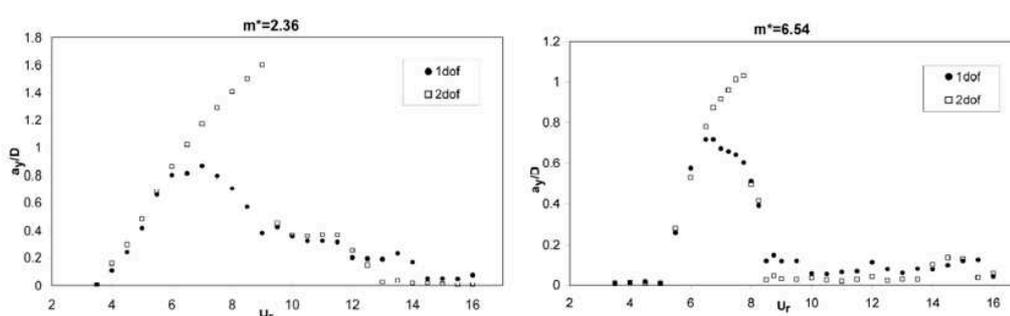
#### **2.5.11 Subsídios obtidos do trabalho de Stappenbelt *et al.* (2007)**

O VIM em estruturas flutuantes é influenciado pelas baixas razões de massa dos sistemas, o que faz com que os sistemas, ao serem submetidos ao fenômeno, respondem com amplitudes maiores ao atingir o ramo de resposta superior. Desta forma, Stappenbelt *et al.* (2007) visa investigar, por meios experimentais, a magnitude de resposta de cilindros com baixas razões de massa (de  $2,4$  a  $13$ ), a um fator de amortecimento constante de  $0,6\%$ . Os autores não esclarecem o valor do número de

Reynolds empregado nos ensaios, mas estima-se, com base nos artigos utilizados como referência da publicação, que está na ordem de  $10^4$ .

Nos resultados apresentados pelos autores, a máxima amplitude foi considerada como sendo a média dos 10% de maiores picos, a mesma utilizada pelo presente trabalho e que será discutida na próxima seção. Stappenbelt *et al.* (2007) (Figura 22) mostra que, conforme esperado, a faixa de lock-in aumenta com a redução na razão de massa, e também existe uma ligeira mudança nos máximos de amplitude transversal correspondentes para velocidades reduzidas mais altas com o aumento da razão de massa.

Figura 22 – Amplitudes de resposta transversais para  $m^* = 2,36$  e  $m^* = 6,54$  em um e dois graus de liberdade.



Fonte: Stappenbelt *et al.* (2007)

A sincronização do desprendimento de vórtices e das frequências de vibração se iniciam nas velocidades reduzidas mais baixas e se estende até as velocidades reduzidas mais altas para os casos de razão de massa mais baixa.

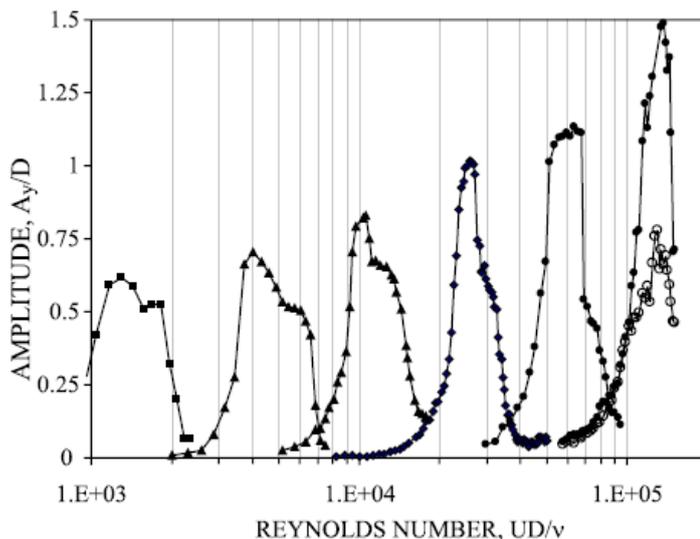
### 2.5.12 Subsídios obtidos do trabalho de Blevins e Coughran (2009)

Blevins e Coughran (2009) avaliam a resposta de cilindros únicos elásticos por meio de ensaios experimentais. O intervalo de Reynolds empregado está compreendido entre a faixa de 170 e 150000. O estudo desenvolve uma base de dados sistemática para respostas unidimensionais e bidimensionais em termos de amplitude, frequência e arrasto, variando características do sistema como fator de amortecimento (0,2% a 40%) e razões de massa.

Um dos principais resultados apresentados no artigo (Figura 23) é o da influência do número de Reynolds na amplitude de resposta do sistema. Nota-se que a amplitude de resposta na faixa de lock-in diminui em faixas de número de Reynolds menor, sendo esta 60% do diâmetro para Reynolds  $\sim 1500$ , frente a um diâmetro de amplitude para a faixa de  $Re \sim 25000$ . Acerca da rugosidade da superfície, apresentada na figura no último gráfico, onde os círculos cheios representam o cilindro liso e os

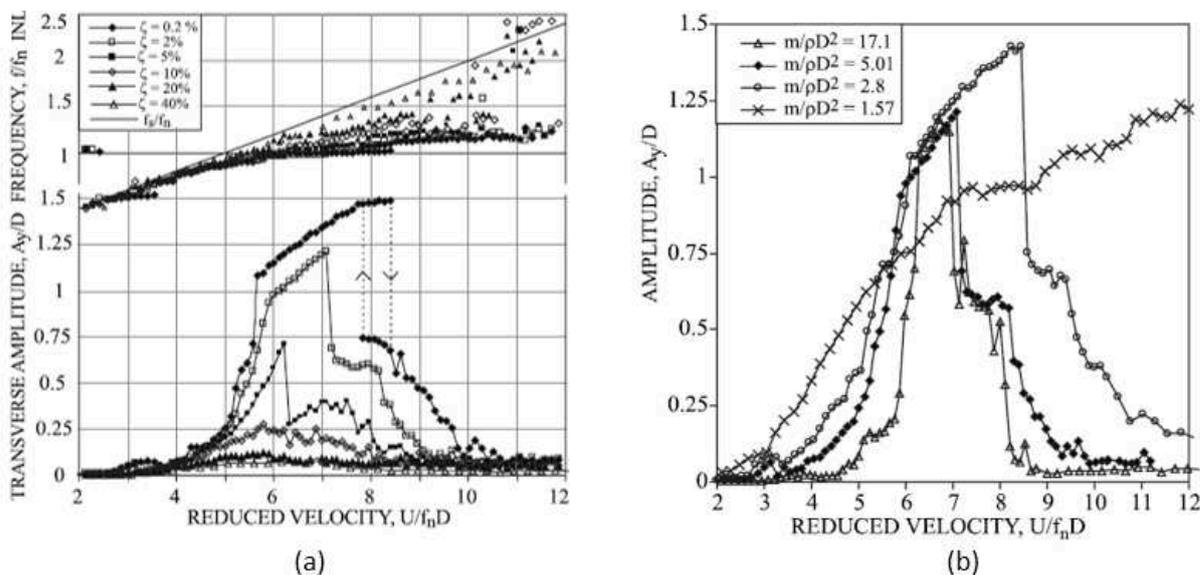
círculos vazios representam o cilindro rugoso, a amplitude cai para a metade quando a superfície possui rugosidade.

Figura 23 – Amplitudes de resposta transversais em função do número de Reynolds para  $m^* = 5,02/\pi$  e  $\zeta = 0,02$



Fonte: Blevins e Coughran (2009).

Figura 24 – (a) Amplitudes de resposta transversais e inline para diferentes fatores de amortecimento a uma mesma razão de massa. (b) Amplitudes de respostas transversais para um mesmo amortecimento e diferentes razões de massa.



Fonte: Blevins e Coughran (2009).

O estudo concluiu que ao se aumentar o fator de amortecimento, para uma mesma razão de massa, a amplitude de resposta diminui para ambas as direções (transversal e no sentido do escoamento). O efeito pode ser verificado na Figura 24(a), ao aumentar o fator de frequência em dez vezes, além de ocorrer uma diminuição do valor máximo da amplitude adimensional na direção transversal, a faixa de velocidades reduzidas onde ocorre o lock-in também é afetada, sendo cada vez menor conforme o aumento do fator de amortecimento. Blevins e Coughran (2009) também verificam a influência da razão de massa em um sistema, para um dado amortecimento. O aumento da razão de massa encurta o intervalo de resposta em VIV, e também diminui consideravelmente a amplitude máxima de resposta do sistema.

### 2.5.13 Síntese dos subsídios obtido a partir dos trabalhos consultados

A Tabela 1 apresenta as publicações citadas anteriormente, destacando as características mais importantes no que diz respeito a suas similaridades, e/ou diferenças, com o presente trabalho.

A título de síntese, o primeiro aspecto a ser discutido é a seção transversal dos modelos ensaiados no âmbito das publicações. Dois trabalhos versam sobre arranjos de cilindros circulares, o primeiro deles é o artigo de Kubo *et al.* (1995), que utiliza cilindros longos em túnel de vento, posicionados na configuração de 45°. Além deste, as duas publicações de Gonçalves *et al.* (2020a,b) são as que possuem maior semelhança com os experimentos do presente trabalho, porém com o objetivo de verificar a influência da geometria da seção, além de demais aspectos, em uma situação em números de Reynolds maiores.

Além disso, a grande maioria das publicações com abordagens experimentais versa sobre arranjos de quatro colunas quadradas (com ou sem cantos vivos). A fenomenologia nestes casos pode ser diferente, o *galloping* se faz presente, mas de um modo geral, o comportamento do sistema é similar.

O primeiro aspecto inovador e mais importante do presente trabalho em comparação com os demais, está no número de Reynolds. Trabalhos a números de Reynolds menores que 200, utilizando arranjos de colunas, são todos numéricos, o que indica não ser uma condição fácil de se replicar de forma experimental. É necessário uma velocidade ou de reboque, ou de escoamento baixa, modelos muito pequenos, e para isso, necessitam de grande precisão na concepção e montagem. Muitas vezes também é necessário se trabalhar com fluidos mais viscosos, como misturas de água e glicerina, que se trata de uma mistura sensível à temperatura e que necessariamente precisam estar em ambientes controlados. Além de todos estes aspectos, é necessário um sistema de aquisição de dados preciso e capaz de registrar as respostas em VIM com o mínimo possível de incerteza.

Discorrendo exclusivamente acerca dos trabalhos de abordagem numérica, to-

dos eles utilizam exclusivamente trabalhos de cilindros únicos para a verificação e validação dos resultados obtidos. Praticamente todas as publicações elencadas versam sobre o estudo da resposta em cada coluna do arranjos isoladamente, e assume-se que essa modelagem tem origem na ausência de trabalhos experimentais que tratem de um conjunto solidário. Resultados numéricos necessitam de validação, portanto, o presente trabalho tem como intuito também servir de apoio para validação de modelos numéricos e triar, dentre uma gama de arranjos, qual solução seria a mais viável para uma dada aplicação.

As características percussoras deste estudo não estão apenas no baixo número de Reynolds, mas também na quantidade de colunas ensaiadas. Dos trabalhos citados, apenas dois versam sobre arranjos de três colunas (Gonçalves *et al.* (2020a) e Kubo *et al.* (1995)), sendo que um não possui uma discussão voltada essencialmente à aspectos que são inerentes ao fluido, já que os ensaios de Kubo *et al.* (1995) foram realizados em túnel de vento.

Nenhuma das publicações elencadas possui todos os aspectos presentes neste trabalho, sendo que existem diferenças quanto ao número de colunas, à abordagem, seção escolhida e principalmente, o número de Reynolds. Conforme foi discutido anteriormente neste capítulo, este é um parâmetro que afeta de forma significativa a resposta do sistema. De todos os trabalhos e autores citados, os que mais se assemelham com esta dissertação, são os de Gonçalves *et al.* (2020a) e Gonçalves *et al.* (2020b) e alguns dos resultados obtidos serão discutidos fazendo um paralelo com estes trabalho, mas também utilizando dos subsídios fornecidos pelos outros artigos.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para a obtenção dos resultados deste estudo. A abordagem adotada é a experimental, onde modelos em escala reduzida são submetidos a ensaios em um Canal de Água Circulante de baixo Reynolds.

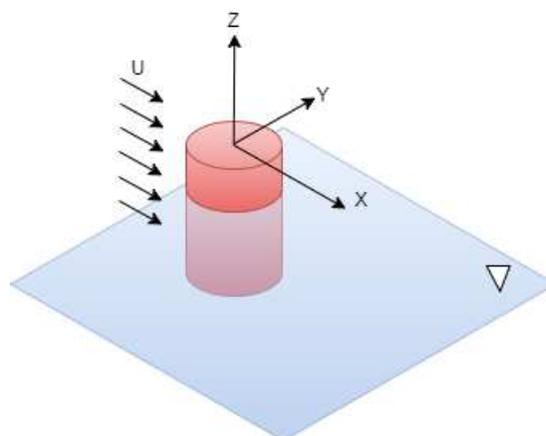
Primeiramente, explica-se o arranjo experimental adotado, discorrendo também acerca do modelo e conjuntos submetidos aos experimentos, que finalmente são consolidados em uma matriz de ensaios. Outro ponto apresentado neste capítulo diz respeito à obtenção dos dados por meio de um sistema de aquisição de imagens comercial. E, por último, descreve-se o método de análise dos registros temporais obtidos ao decorrer das rodadas de experimentos.

De antemão é importante esclarecer que, dada a natureza reduzida dos modelos experimentais testados, para a caracterização das dimensões lineares (distâncias e tamanhos, principalmente) decidiu-se utilizar milímetros ao invés de metros. A justificativa é que esta adoção facilita a visualização dimensional dos arranjos face ao tamanho da seção de testes do CAC.

#### 3.1 GRAUS DE LIBERDADE E SISTEMA DE COORDENADAS

Neste trabalho, é adotado o sistema de coordenadas ilustrado na Figura 25. De acordo com este sistema, para as análises são consideradas as duas direções principais de resposta possível com o arranjo experimental mais adiante descrito, quais sejam: a direção-Y, denominada de transversal ao escoamento, e a direção-X, denominada de longitudinal ao escoamento. A velocidade de escoamento  $U$ , por sua vez, é assumida uniforme e alinhada com a dimensão longitudinal do CAC.

Figura 25 – Sistema de coordenadas utilizado



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.2 APARATO EXPERIMENTAL

De início é necessário esclarecer que toda vez que o termo **arranjo** é empregado adiante, este se refere exclusivamente ao agrupamento formado pelos cilindros posicionados a uma distância definida. Portanto, o termo **aparato**, neste ponto em diante, será utilizado em referência ao conjunto composto: pelos arranjos de cilindros, pelo suporte elástico (estrutura em pórtico, fixações e haste), pelo sistema de rastreamento óptico, e pela própria seção de testes do CAC.

Os experimentos foram realizados no CAC do Laboratório de Interação Fluido-Estrutura (LIFE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no campus Joinville. A seção de teste do canal possui dimensões de 1200 mm x 575 mm (comprimento × largura). O controle da velocidade de escoamento foi feito por meio da variação do calado, o quais foram selecionados de forma a atingir um intervalo de velocidade reduzida  $V_R$  compreendido entre 4 e 9,2, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Relação dos calados, velocidades,  $V_R$  e números de Reynolds ensaiados.

Lâmina d'água (mm)	Velocidade (mm/s)	$V_R$			Re
		1 col	3 col	4 col	
150	59,8	9,2	11,5	14,04	1196
200	42,8	6,58	8,23	10,05	856
225	38,1	5,86	7,33	8,94	762
250	33,1	5,09	6,37	7,77	662
300	26,2	4,06	5,04	6,15	524

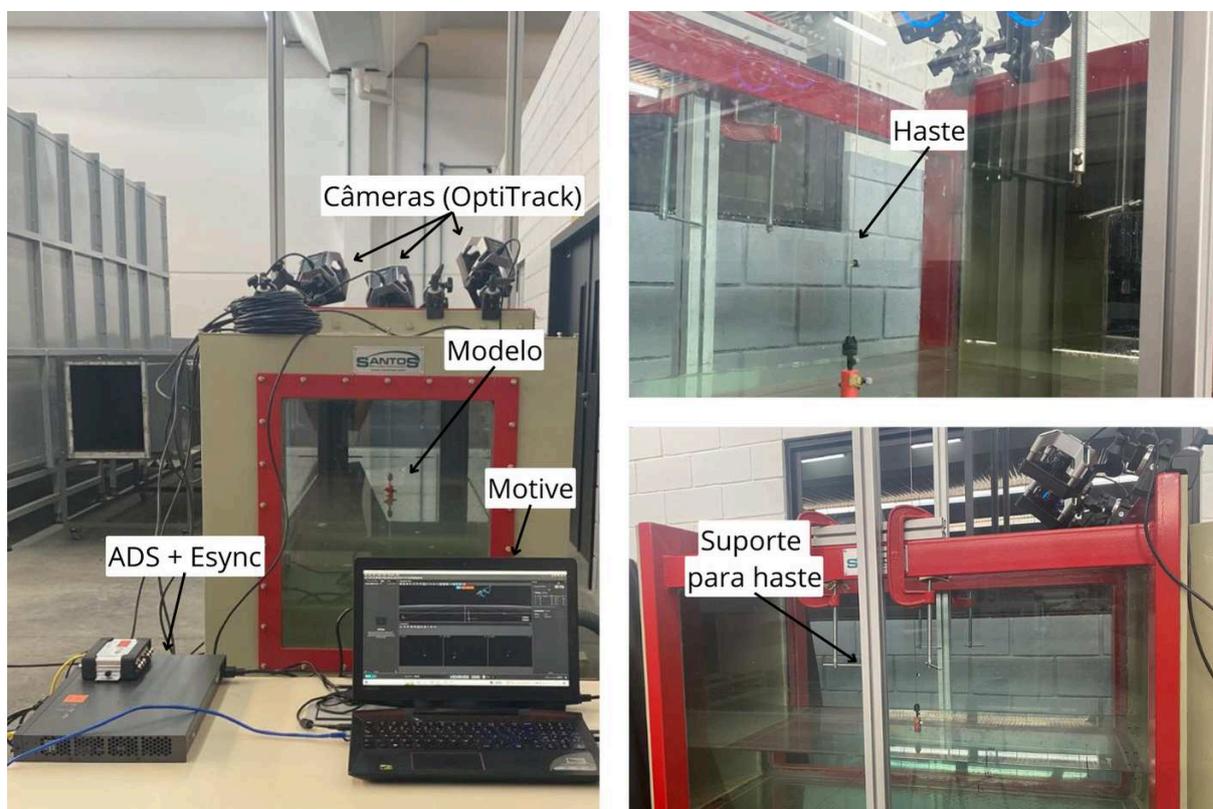
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Todos os arranjos experimentais (conjuntos de cilindros) foram submetidos às mesmas cinco velocidades de escoamento. A faixa foi selecionada tendo em vista o intervalo de ressonância de VIV conhecido da literatura,  $5 < V_R < 7$ , naturalmente tomando como referência o comportamento de um único cilindro circular. A Figura 26 mostra o aparato experimental composto por:

- modelo (no caso, o cilindro único);
- haste do suporte elástico (responsável pelas restaurações nas direções longitudinal e transversal);
- sistema de rastreamento óptico (OptiTrack, que compreende um sistema de aquisição e condicionamento de dados gerenciado pelo programa Motive, um sincronizador Esync, e alvos solidários aos modelos); e
- o próprio CAC.

Cada um desses elementos será melhor descrito ao decorrer do texto.

Figura 26 – Estrutura montada para a execução dos experimentos de VIE no CAC da UFSC-Joinville.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 27 – Modelos de cilindro único e arranjos de 3 e 4 cilindros circulares (colunas).



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Os modelos (cilindro único e arranjos de 3 ou 4 cilindros) foram suportados elasticamente por meio de uma haste de aço inox de 1,5 mm de espessura e 2200 mm de comprimento posicionada no centro da seção de teste com auxílio de um suporte rígido de alumínio. O emprego da haste longa permite que o sistema possua dois graus de liberdade, um na direção do escoamento (*inflow*) e outro na direção transversal ao escoamento (*cross-flow*), além de contribuir com baixos amortecimentos.

Ao todo foram fabricados 5 modelos de seção circular, sendo um empregado para o ensaio de cilindro único, e os quatro restantes utilizados para compor os arranjos de três ou quatro cilindros (Figura 27).

Todos os cilindros circulares possuem o mesmo diâmetro externo de 20 mm. A razão de aspecto adotada neste estudo foi de  $A_R = 2$ , ou seja,  $L_{sub}=40$  mm. Estes modelos foram fabricados por meio de impressão 3D, utilizando filamento de PLA. Uma vez que este tipo de material absorve água, para que os modelos possam ser utilizados na seção de testes por longos períodos, cobertura de verniz foi aplicada, e a altura do calado em cada modelo foi demarcada com tinta esmalte cinza. Todos os modelos possuem borda-livre de 40mm, resultando em um comprimento total de 70mm.

Com o intuito de facilitar a montagem e o posicionamento dos cilindros nos vários arranjos, também foi impressa em 3D uma estrutura circular vazada com furos para passagem de parafusos que ligam a estrutura às colunas (Figura 27). Para a montagem do cilindro único, uma pinça do tipo mandril foi utilizada para fixar a haste.

Em relação às massas dos modelos (cilindro único e arranjos), foi decidido mantê-la igual para todos, desta forma, permitindo faixas de sincronização aproximadamente nas mesmas velocidades de escoamento incidentes.

Assim, a definição da massa estrutural se deu em função do arranjo com 4 colunas – o de maior massa estrutural envolvida. O mesmo foi montado, fixado ao suporte e posicionado na seção de testes para avaliar se havia algum defeito na impressão ou na camada estanque dos modelos. Como não ocorreu, o mesmo foi tirado da água, sua massa foi aferida em uma balança e os demais modelos receberam lastros de areia para atingirem a massa do arranjo de quatro colunas.

Para o cálculo da razão de massa, então foi utilizada a Equação (3), onde se considerou o número de colunas para o cálculo do deslocamento de cada arranjo. As massas de cada arranjo e do cilindro único são apresentadas na Tabela 3, junto com suas razões de massa.

Importante destacar que, embora menores em relação ao valor obtido para o cilindro único, as razões de massa dos arranjos estão próximas entre si, o que mantém a possibilidade de comparação direta e, portanto, a seleção do(s) arranjo(s) com as menores amplitudes de resposta.

Tabela 3 – Massas dos modelos e razão de massa calculada.

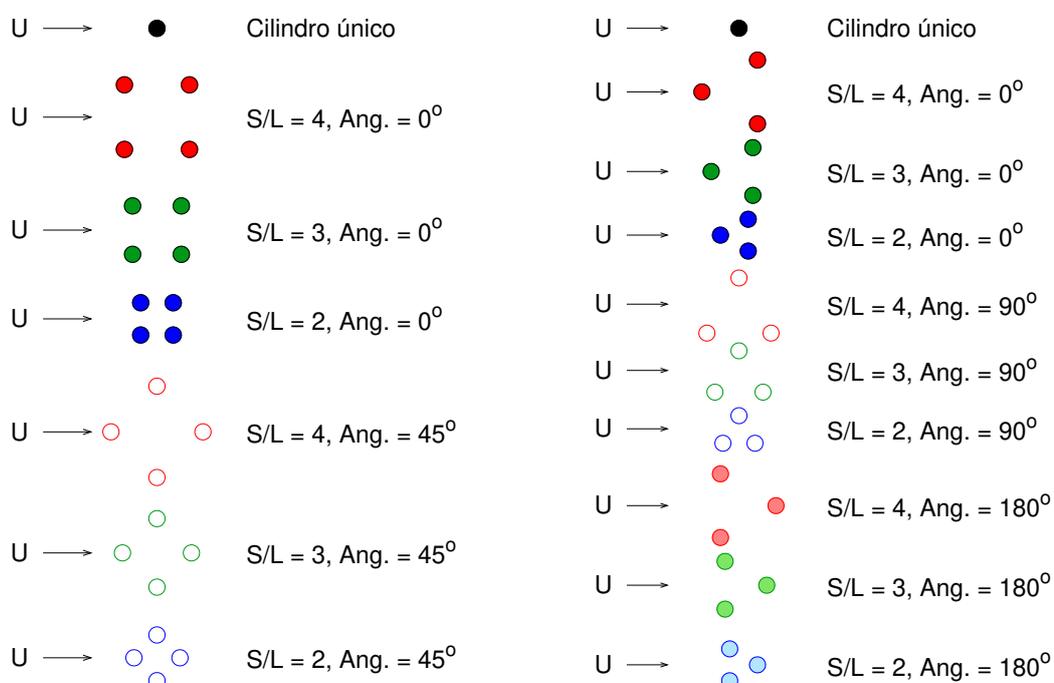
Arranjo	Massa (g)	m*
Cilindro único	89	7,11
3 colunas	89	2,37
4 colunas	90	1,80

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Como o foco deste trabalho são os arranjos de cilindros, então foram considerados conjuntos de 3 e 4 colunas equidistantes entre si, a razões  $S/D = 2, 3$  e  $4$ . Os arranjos de 4 colunas foram submetidos a 2 aproamentos distintos, de  $0^\circ$  e  $45^\circ$  para cada espaçamento. O mesmo ocorreu com os arranjos de 3 colunas, onde os mesmos espaçamentos foram aplicados, porém submetidos a 3 aproamentos, de  $0^\circ$   $90^\circ$  e  $180^\circ$ .

Na Figura 28 estão ilustrados os arranjos e aproamentos deste estudo. De antemão destaca-se que o código gráfico (cores e formas) foi adotado para facilitar a comparação e discussão dos resultados mais adiante apresentados. Assim, como o cilindro único é a referência de comparação, ele aparece em ambos os grupos de arranjos (com 3 e 4 colunas).

Figura 28 – Ilustração dos arranjos a serem ensaiados



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

### 3.3 SISTEMA DE RASTREAMENTO ÓPTICO

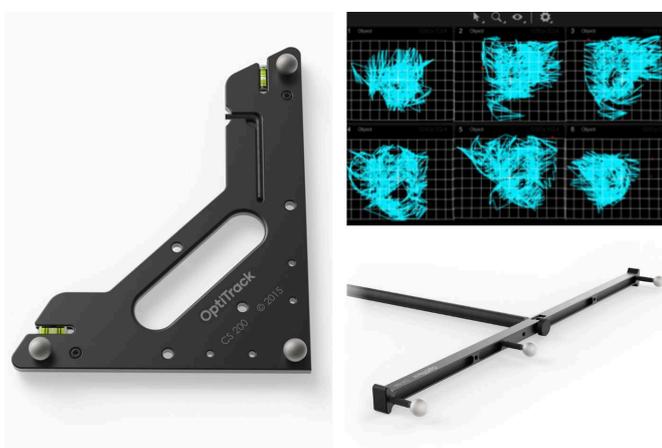
A aquisição de dados se deu por meio de um sistema de rastreamento óptico, o OptiTrack. Foram instaladas no CAC três câmeras a jusante do escoamento, sendo uma em cada um dos lados da seção de testes e a terceira ao centro (Figura 27). As câmeras capturam o deslocamento de alvos refletivos (Figura 27) em seis graus de liberdade dentro de um volume de captura. Este primeiro processamento de dados ocorre dentro de um programa específico do sistema, chamado Motive.

Este volume de captura é retornado a partir de um processo chamado de calibração. O primeiro passo é fazer o mapeamento (*wanding*) do local de ensaio (a seção de testes), utilizando a *calibration wand* (Figura 29). Em linhas gerais, tal procedimento consiste em posicionar os alvos da *calibration wand* no ângulo de visão das câmeras ao longo da seção de testes, focando principalmente no centro desta e logo acima da linha d'água. Durante este processo, as câmeras triangulam a posição de cada um dos alvos, a uma frequência de interesse, gerando nuvens de pontos.

A partir da solução desta nuvem de pontos, se tem o volume de captura e o erro tridimensional. Para os experimentos deste trabalho, o valor da incerteza de calibração foi de no máximo 0,05 mm. Em casos onde o procedimento de calibração excedeu essa incerteza máxima, o processo de *wanding* foi repetido até um valor admissível.

Após a etapa de mapeamento do volume rastreável, foi posicionado o referencial de rastreamento, ou *ground plane* (Figura 29). No caso deste trabalho, a origem do sistema coordenado de rastreamento foi posicionada no centro da seção de teste, com sua direção-X apontando na direção do escoamento, e a direção-Y transversal ao mesmo, o que resultou em uma direção-Z positiva para cima.

Figura 29 – Elementos do processo de calibração: o *ground plane* à esquerda; a *calibration wand* abaixo à direita; e as regiões mapeadas nos gráficos do alto também à direita.



Uma funcionalidade do programa Motive é a criação de corpos rígidos utilizando 3 alvos não-coplanares, o que permite o rastreamento de um corpo rígido virtual no baricentro formado por estes alvos. Assim, além das coordenadas X, Y e Z gravadas ao se fazer uma captura de imagem, também podem ser gravados os ângulos de rotação deste corpo rígido, conferindo seis graus de liberdade ao sistema. Ao final, o Motive permite que sejam exportados arquivos .csv com os registros temporais para posterior processamento.

Por oportuno vale ressaltar que estes experimentos possuem uma grande dificuldade de serem realizados, afirmação que é corroborada pela pouca – ou quase nenhuma – literatura encontrada sobre arranjos de cilindros testados mediante ação dos fenômenos de VIE em regimes de baixo Reynolds.

Acredita-se que a constatação anterior se apoie no seguinte aspecto intrínseco desta investigação em particular, onde o processo de aquisição de dados e processamento destes é a etapa mais fácil dentre todas as demais. Montar os modelos com as colunas que possuem 20mm de diâmetro, posicioná-los com precisão no CAC, calibrá-los a cada troca e, principalmente, dar-lhes condição de vibrar nas duas direções de interesse em tão baixas velocidades de escoamento, estas sim são etapas desafiadoras e que demandam muito tempo e capacidade da equipe de pesquisa.

### 3.4 MATRIZ DE ENSAIOS

De acordo com as diretrizes para ensaios de VIM propostas pela *International Towing Tank Conference* (ITTC, 2021), utilizada neste trabalho para nortear os ensaios, é necessário que ao menos 20 ciclos completos de VIM sejam registrados, a uma frequência de aquisição pelo menos 10 vezes maior do que a maior frequência de interesse.

Tabela 4 – Matriz de ensaios a ser conduzida.

Número de colunas	Aproamento (°)	S/D	$V_R$
1	-	2, 3 e 4	4,06 ; 5,09 ; 5,86 ; 6,58 ; 9,20
3	0	2, 3 e 4	5,04 ; 6,37 ; 7,33 ; 8,23 ; 11,50
3	90	2, 3 e 4	5,04 ; 6,37 ; 7,33 ; 8,23 ; 11,50
3	180	2, 3 e 4	5,04 ; 6,37 ; 7,33 ; 8,23 ; 11,50
4	0	2, 3 e 4	6,15 ; 7,77 ; 8,94 ; 10,05 ; 14,04
4	45	2, 3 e 4	6,15 ; 7,77 ; 8,94 ; 10,05 ; 14,04

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Na Tabela 4 consta a matriz de ensaios a ser realizada no âmbito deste estudo. Cada combinação de arranjo-aproamento-espacamento-velocidade será ensaiada tendo em vista 3 repetições de 5 minutos em cada aquisição, sendo este o tempo

suficiente para que pelo menos 60 ciclos do fenômeno sejam registrados. A matriz de ensaios completa totaliza, portanto, 240 ensaios de cinco minutos cada, excluindo desta contabilização os ensaios preliminares de decaimento para a caracterização das frequências naturais e respectivos coeficientes de amortecimento.

Os dados de saída do sistema Optitrack, e de entrada das análises, são registros temporais nos seis graus de liberdade (translações nas direções-X, Y, Z e as respectivas rotações no entorno dessas direções *roll*, *pitch* e *yaw*).

A frequência de aquisição utilizada foi de 100Hz, muito maior do que as frequências esperadas, que estão na ordem de 0,5Hz. Conforme mencionado, antes dos ensaios de VIE, foram feitos ensaios de decaimento em água e em ar de forma a obter-se as frequências naturais e amortecimentos do sistema. Os experimentos foram feitos tanto para cilindros únicos, quanto para os arranjos.

### 3.5 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Os registros temporais foram analisados lançando mão de rotinas computacionais em ambiente GNU-Octave, que é uma linguagem de programação *open-source* interpretada e de alto nível, voltada principalmente à computação científica e a computação numérica. Programas em Octave são rotinas cuja sintaxe é baseada em matrizes e possui uma grande quantidade de funções de operações matriciais que facilitam a rápida análise e redução de dados como os deste trabalho.

Assim, foram construídas rotinas computacionais que abrem o arquivo .csv coletado pelo programa Motive, e efetuam as análises de interesse.

Primeiramente, o código elaborado separa em um vetor coluna os dados de tempo, e em uma matriz de seis colunas os valores instantâneas nas direções-X, Y, Z e também das rotações ao redor de cada um dessas três direções. A rotinas avaliam o registro e então selecionam picos (valores máximos) e cavas (valores mínimos), calculam o valor absoluto desses máximos e mínimos, os ordena em ordem decrescente e faz a média dos 10% maiores valores.

As máximas amplitudes adimensionais de resposta ( $A_x/D$  e  $A_y/D$ ) são, portanto, consideradas como a média dos 10% de maiores valores adimensionais, tomando como referência o diâmetro do cilindro único, e considerando os três registros para cada arranjo. Nos gráficos e discussões do próximo capítulo, estes valores são denotados utilizando o sobre-índice (...) <sup>10%</sup>.

Em termos de frequência, a caracterização se dá por meio do emprego da Transformada Rápida de Fourier (ou FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*), sendo que a frequência característica do movimentos é definida como o pico de maior densidade espectral (PSD). Para se adequar à notação utilizada na literatura, os resultados serão apresentados em sua forma adimensional, dada pela razão entre a frequência do movimento na direção considerada (X ou Y) e a frequência natural transversal obtida

em água,  $f_{0y}$ .

### 3.6 SUBSÍDIOS QUANTO À ANÁLISE DE INCERTEZAS

Neste trabalho será empregada a análise de incertezas de forma a verificar a coerência dos resultados obtidos. Em função disso, são necessários os seguintes subsídios.

Araújo (2018) define a incerteza de medição como a dúvida que existe a respeito da validade do resultado de uma medição qualquer, além de indicar a qualidade deste valor. A análise destas incertezas é um processo que resulta em uma estimativa numérica da qualidade de uma medição, e para abordagens experimentais, é importante para que os resultados dos ensaios sejam interpretados.

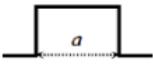
Medição é definido por Araújo (2018) como o ato de medir, e a partir de uma medição se tem uma medida, que é seu resultado. O mensurando é a grandeza física que é submetida a uma medição. De um modo geral, o resultado de uma medição nada mais é do que uma aproximação ou estimativa do valor real do mensurando, e que por isso, só é completo se acompanhado pela declaração da incerteza desta estimativa.

A incerteza é um parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão de valores que podem ser atribuídos ao mensurando (ARAÚJO, 2018). Existem dois tipos de incerteza: a do tipo A ( $u_A$ ), que é avaliada a partir de uma análise estatística de uma série de observações; e a do tipo B ( $u_B$ ), que é avaliada por quaisquer outros meios que não são a análise estatística.

A teoria da probabilidade é a base para que possam ser feitas inferências a partir dos dados coletados. No processo são utilizadas funções densidade de probabilidade que descrevem a probabilidade de uma variável aleatória assumir um dado valor dentro de um dado intervalo. Incertezas do tipo A, são descritas por funções de probabilidade do tipo gaussiana e são geralmente utilizadas quando se possui um conjunto de medidas repetidas e dispersas, como o caso deste trabalho. Para o tipo B, as funções densidade de probabilidade empregadas são a retangular quando se possui uma única medida digital e a triangular quando se possui uma única medida analógica.

Incerteza-padrão é a incerteza do resultado de uma medição expressa como um desvio-padrão. A escolha da função densidade de probabilidade implica na forma com que a incerteza-padrão  $u$  será calculada, assim, para a distribuição gaussiana,  $u$  é dado pelo desvio-padrão ( $\sigma$ ) dividido pela raiz quadrada das  $n$  medições repetidas. A Figura 30 elenca todas as incertezas-padrão das funções citadas anteriormente.

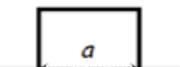
Figura 30 – Incerteza-padrão para as três funções densidade de probabilidade

Função de densidade de probabilidade		Incerteza-padrão $u$	Quando usar
retangular		$u = \frac{a}{2\sqrt{3}}$	Quando se conhece apenas os valores máximos e mínimos de variação. Exemplo: efeito causado pela resolução finita do equipamento
triangular		$u = \frac{a}{2\sqrt{6}}$	Quando se conhece os valores máximo e mínimo de variação e o valor mais provável. Exemplo: posicionamento de um instrumento em uma marca de escala.
gaussiana		$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	Desvio-padrão da média de um conjunto de $n$ medições repetidas.

Fonte: Araújo (2018).

Araújo (2018) menciona que é possível aumentar o nível de confiança de um resultado de medição por meio da incerteza expandida ( $U$ ). Esta incerteza expandida é obtida pela multiplicação de um fator  $k$  constante pela incerteza padrão ( $u$ ) e os valores típicos de  $k$  são dados na Figura 31.

Figura 31 – Valores de  $k$  para as três funções densidade de probabilidade

Função de densidade de probabilidade		Incerteza expandida e nível de confiança
retangular		$1 u = 58\%$
		$1,65 u = 95\%$
		$1,73 u = 100\%$
triangular		$1 u = 65\%$
		$1,81 u = 95\%$
		$2,45 u = 100\%$
gaussiana		$1 u = 68\%$
		$2 u = 95\%$
		$3 u = 99\%$

Fonte: Araújo (2018).

Para este trabalho, no tocante a análise de incertezas, foi considerada apenas a do tipo A com distribuição gaussiana, pois as demais (do tipo B, como a incerteza de calibração), são muito menores.

O cálculo das incertezas para os resultados de amplitude foram feitos levando como base os 10% de maiores picos de cada uma das três repetições. Estes valores são inseridos em um vetor coluna, onde é calculado o desvio-padrão antes da incerteza-padrão ser obtida utilizando a Equação (5).

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (5)$$

onde  $u$  é a incerteza-padrão,  $\sigma$  o desvio-padrão e  $n$  o número de valores considerado.

Para um intervalo de 95% de confiança, o fator de abrangência  $k$  a ser empregado para o cálculo da incerteza expandida de uma distribuição gaussiana é igual a 2. Logo, a incerteza expandida mais adiante declaradas são dadas por:

$$U_* = k \cdot u, \quad (6)$$

onde  $U_*$  é a incerteza expandida,  $k$  é o fator de abrangência para 95% de confiança segundo uma função densidade de probabilidade gaussiana, e  $u$  é a incerteza-padrão.

Neste trabalho, as incertezas expandidas serão calculadas apenas para as amplitudes de resposta, pois estas possuem um conjunto de dados com maior número de elementos, o que melhora os resultados estatísticos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para efeitos de comparação e discussão, os resultados desta investigação são compostos essencialmente por valores adimensionais de amplitude e frequência nas direções-X e Y (longitudinal e transversal ao escoamento), respectivamente apresentados com função das velocidades reduzidas referentes às velocidades dimensionais descritas na Tabela 2.

Os resultados nessas direções são apresentados na forma de gráficos separados, cada qual sintetizando os resultados dos ensaios para todos os arranjos em uma única figura. Conforme descrito no capítulo anterior, as amplitude de resposta são adimensionalizados pelo valor do diâmetro (D) do cilindro circular (coluna), e as frequências, de forma análoga, adimensionalizadas pela frequência natural na direção transversal ( $f_{0y}$ ).

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de decaimento feitos tanto para o ar, quanto para água. Os resultados de frequência natural transversal são diretamente úteis para a adimensionalização das frequências de vibração em cada condição de velocidade de escoamento. Note que as frequências naturais em água exibem uma diferença coerente e justificada pela acréscimo de massa adicional com o aumento do número de cilindros (1, 3 e 4).

Além disso, a Tabela 5 também apresenta os respectivos amortecimentos, tipicamente baixos, independente do modelo ensaiado. Particularmente os valores para o cilindro único podem ser comparados com aqueles presentes em Stappenbelt *et al.* (2007) e Blevins e Coughran (2009), permitindo enriquecer as discussões.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de decaimento.

		Número de colunas		
		1	3	4
<b>Ar</b>	$f_{0x}$ (Hz)	0,371	0,361	0,372
	$\zeta_x$	0,46%	0,54%	0,35%
	$f_{0y}$ (Hz)	0,357	0,375	0,380
	$\zeta_y$	0,43%	0,26%	0,33%
<b>Água</b>	$f_{0x}$ (Hz)	0,330	0,246	0,221
	$\zeta_x$	3,93%	5,82%	3,83%
	$f_{0y}$ (hz)	0,325	0,260	0,213
	$\zeta_y$	3,67%	8,55%	8,47%

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

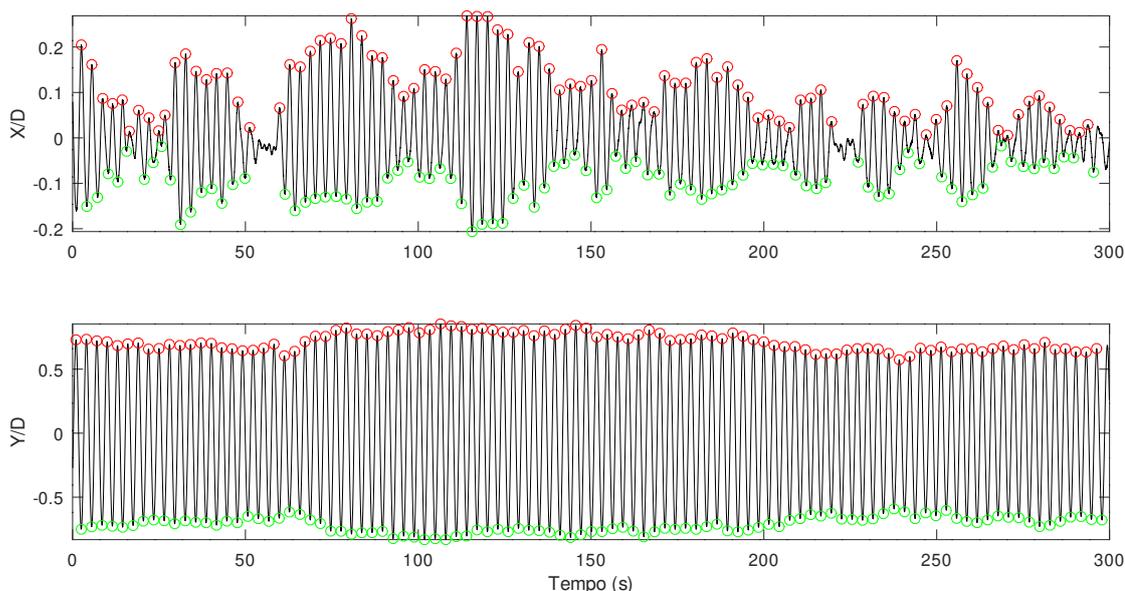
Como esperado, os amortecimentos em ar são muito menores do que em água para os arranjos e para o cilindro único também. Apesar dos arranjos possuírem dife-

rentes espaçamentos, os decaimentos registrados na Tabela 5 dizem respeito à maior distância entre colunas, uma vez que em ensaios preliminares verificou-se que não há diferença apreciável entre frequências naturais e amortecimentos mediante alteração do espaçamento. Estes valores de frequência serão utilizados para adimensionalizar os resultados apresentados adiante.

A Figura 32 mostra um exemplo de registros obtidos no ensaio de VIE referente ao cilindro único, na velocidade reduzida onde ocorre a maior amplitude de resposta. Os círculos em vermelho e em verde apontam os valores utilizados para o cálculo de 10% maiores valores. A diferenciação foi feita para verificar se o código era capaz de fazer as operações tanto na parte positiva, quanto na parte negativa. Importante reforçar que o código utiliza apenas valores absolutos, logo os 10% de maiores valores referem-se tanto a picos quanto a cavas.

É possível notar que para os deslocamentos na direção-X, longitudinal ao escoamento, alguns picos deixam de ser identificados devido sua pequena amplitude em relação aos demais. Esta não-identificação impacta pouco no método, pois o número de picos não identificados é muito menor do que os identificados. Em relação a números, o sinal apresentado na Figura 32 possui ao todo 198 picos e cavas identificados na direção-Y e 186 na direção-X. Lembrando que ao todo, tem-se três repetições para cada um dos ensaios, o que também contribui para que essa perda de valores de baixa amplitude não afete negativamente o resultado final.

Figura 32 – Registros temporais para o cilindro único,  $V_R = 6,58$ .



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

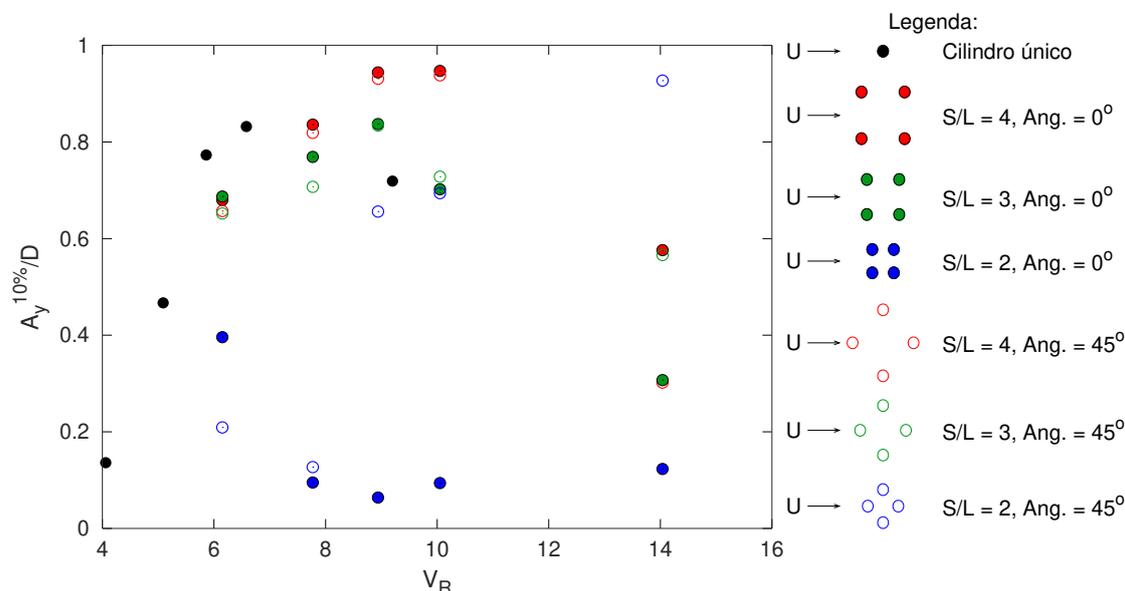
O comportamento ilustrado na Figura 32 é coerente com a literatura, visto que

revela uma dinâmica mais uniforme no que se refere aos deslocamentos do cilindro único na direção transversal ao escoamento, quando comparados com aqueles na direção longitudinal, visivelmente mais modulados.

#### 4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES PARA OS ARRANJOS COM 4 COLUNAS

A Figura 33 mostra graficamente as médias entre os 10% maiores valores de amplitude adimensional na direção transversal, na faixa de  $V_R$  ensaiada. Acerca do cilindro único, seu comportamento condiz com o que está presente na literatura, como descrito por Stappenbelt *et al.* (2007) e Blevins e Coughran (2009). A resposta do sistema inicia baixa, na ordem de 15% do diâmetro, aumenta com a elevação da velocidade reduzida, alcançando valores superiores a 80% do diâmetro para  $V_R = 6, 58$  e após, apresenta uma redução na amplitude. Este comportamento é bastante semelhante ao VIV usual de cilindros longos, pelo menos até as velocidades de escoamento ensaiadas.

Figura 33 – Médias entre os 10% maiores valores de amplitude adimensional na direção transversal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com os arranjos de 4 colunas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Geralmente, o fenômeno de VIV responde com amplitudes de um diâmetro, valor consolidado para números de Reynolds na ordem de  $10^5$ , como descrito por Blevins e Coughran (2009). Esta referência também demonstra que o número de Reynolds influencia na resposta do sistema, resultando em uma redução no pico de amplitude

quando este parâmetro é da ordem de  $10^3$ . Apesar do sistema no presente trabalho possuir características como amortecimento e razão de massa diferentes das apresentadas por Stappenbelt *et al.* (2007) e Blevins e Coughran (2009), qualitativamente, ambos os trabalhos podem ser comparados, uma vez que o baixo amortecimento de certa forma contrapõe o efeito da alta razão de massa. Ou seja, o pico de amplitude de resposta ser inferior a um é condizente com o que é apresentado na literatura, dado o baixo número de Reynolds, alta razão de massa e baixo amortecimento.

No que diz respeito aos arranjos, os que possuem espaçamento  $S/D = 3$  e  $S/D = 4$  apresentam amplitude de resposta superiores ao cilindro único para grande parte das velocidades ensaiadas, independente do aproamento. Isto pode ser justificado pelos menores valores de massa reduzida dos arranjos com 4 colunas, mas também deve ser o resultados da influência da esteira produzida pelos cilindros a montante. Assim como o cilindro único, os arranjos também atingem sua amplitude máxima, porém em velocidades reduzidas substancialmente mais elevadas,  $V_R > 8,5$ . Dentre todos os arranjos, as menores amplitudes transversais de VIE são observadas para o menor espaçamento entre colunas,  $S/D = 2$ , no aproamento de  $0^\circ$ .

O aproamento não influencia significativamente na resposta do sistema para as quatro primeiras velocidades de ensaio, para os conjuntos de maior espaçamento. O que não ocorre para o arranjo  $S/D = 2$ , onde é possível notar que para todas as velocidades ensaiadas, exceto  $V_R = 6, 15$ , a resposta do arranjo em  $45^\circ$  tende a ser superior.

Comparando qualitativamente os resultados do presente trabalho com os obtidos por Gonçalves *et al.* (2020b) (Figura 21, na página 53 desta dissertação), nota-se que os arranjos com maior espaçamento responderam com amplitudes maiores do que o cilindro único, bem como o cilindro com menor espaçamento entre colunas respondeu com amplitudes consideravelmente menores na amplitude transversal.

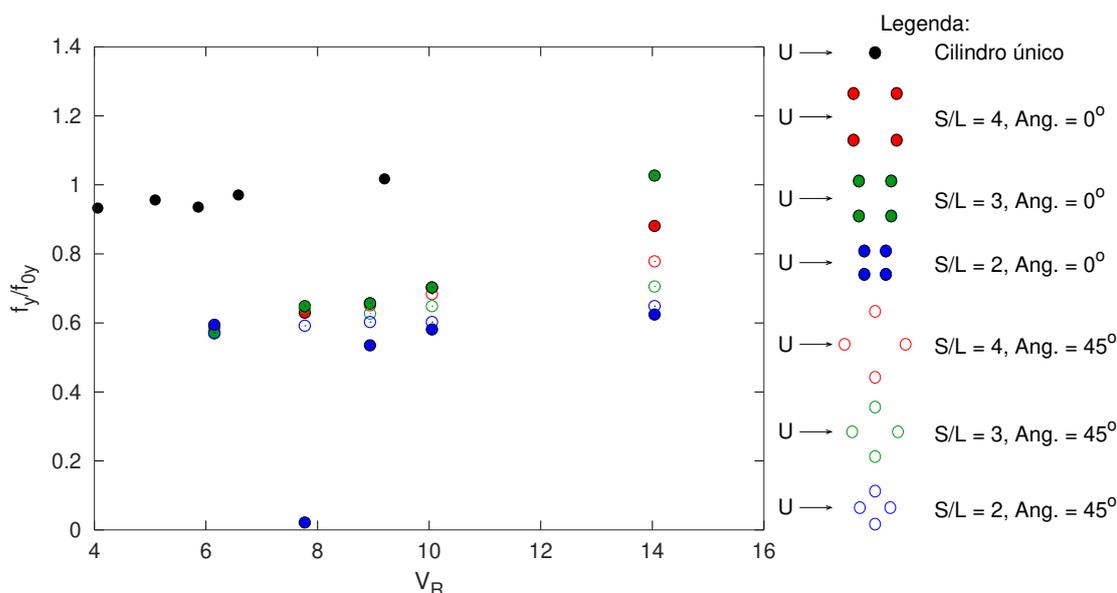
Discutindo os resultados em termos de frequência, onde os valores para os arranjos em função da velocidade reduzida  $V_R$  estão sintetizados na Figura 34, nota-se que para o cilindro único, a frequência possui razão próxima a 1, mais uma evidência da coerência dos resultados de referência, e comprovação clara da sincronização do sistema conforme fenomenologia do VIV.

Ainda de acordo com a Figura 34, as frequências adimensionais na direção transversal para os arranjos se distribuem no entorno da faixa entre 0,6 e 0,8, exceto para a última velocidade reduzida, onde percebe-se o espalhamento dos resultados em uma faixa maior de  $f_y/f_{0y}$ , entre 0,6 e 1,2.

De uma maneira geral, para os arranjos com 4 colunas, observa-se uma tendência de crescimento dessa razão entre frequências conforme ocorre o aumento de velocidade do escoamento. Uma forma interessante de se analisar estes resultados em trabalhos futuros, seria verificar as assíntotas de sincronização que Gonçalves *et al.*

(2020b) menciona em seu trabalho.

Figura 34 – Frequências adimensionais na direção transversal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 4 colunas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Analisando os resultados obtidos na direção-X, longitudinal ao escoamento, tem-se as médias entre os 10% maiores valores de amplitude adimensional sintetizadas na Figura 35.

Primeiramente, é necessário ressaltar que se tratam de respostas com amplitudes significativamente menores quando comparadas com aquelas da direção transversal. Os valores de  $A_x^{10\%}/D$ , deste modo, apresentam um espalhamento maior, particularmente quando se adota uma escala entre 0 e 0,2. A escolha por esta escala se dá essencialmente pela escolha de manter o gráfico em proporção ao dado de maior valor, além de que possa ser mais fácil de se observar e discutir o comportamento dos diferentes arranjos.

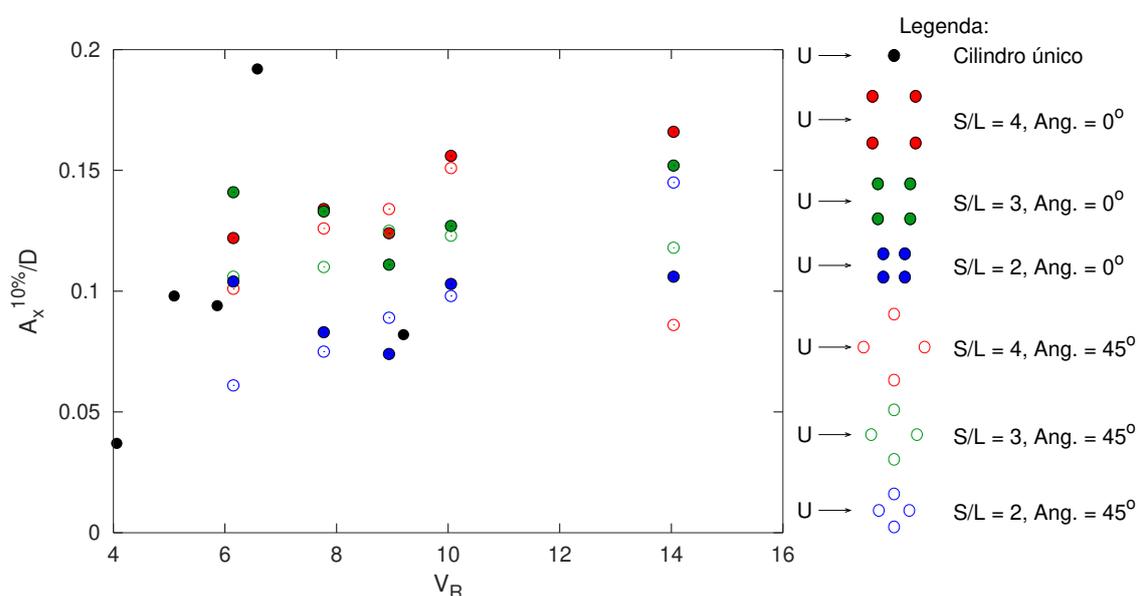
Em relação ao cilindro único, ocorre uma queda das amplitudes adimensionais longitudinais, o que é característico do fenômeno de VIV, antes do acoplamento com o movimento na direção transversal, para  $V_R = 6,58$ .

No tocante aos arranjos, no entanto, novamente o aproamento não se refletiu em diferença apreciável para as razões de distância  $S/D = 3$  e  $S/D = 4$ , e desta vez também para o arranjo de menor distância entre colunas.

As amplitudes adimensionais longitudinais, de um modo geral, se espalharam

em um intervalo entre 5% e pouco mais de 15% do diâmetro para os arranjos. Para a maior velocidade de escoamento, todos os arranjos responderam com amplitudes maiores do que o cilindro único, porém ainda se tratam de valores muito pequenos nesta escala. Outro ponto interessante é que existe uma influência maior do aproamento na última velocidade reduzida.

Figura 35 – Médias entre os 10% maiores valores de amplitude adimensional na direção longitudinal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 4 colunas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Pensando nos arranjos quadrados como uma possível aplicação, independente da dispersão evidenciada, nota-se que  $S/L = 2$  é a melhor escolha para efeitos de projeto. Esta se justifica pois o conjunto, levando em consideração a segurança do projeto e, apesar de ser afetado pelo aproamento em relação às suas respostas na direção-Y, este ainda possui menores amplitudes de resposta em quase todas as velocidades ensaiadas, ou nas velocidades plausíveis de operação de um unidade flutuante com essa geometria.

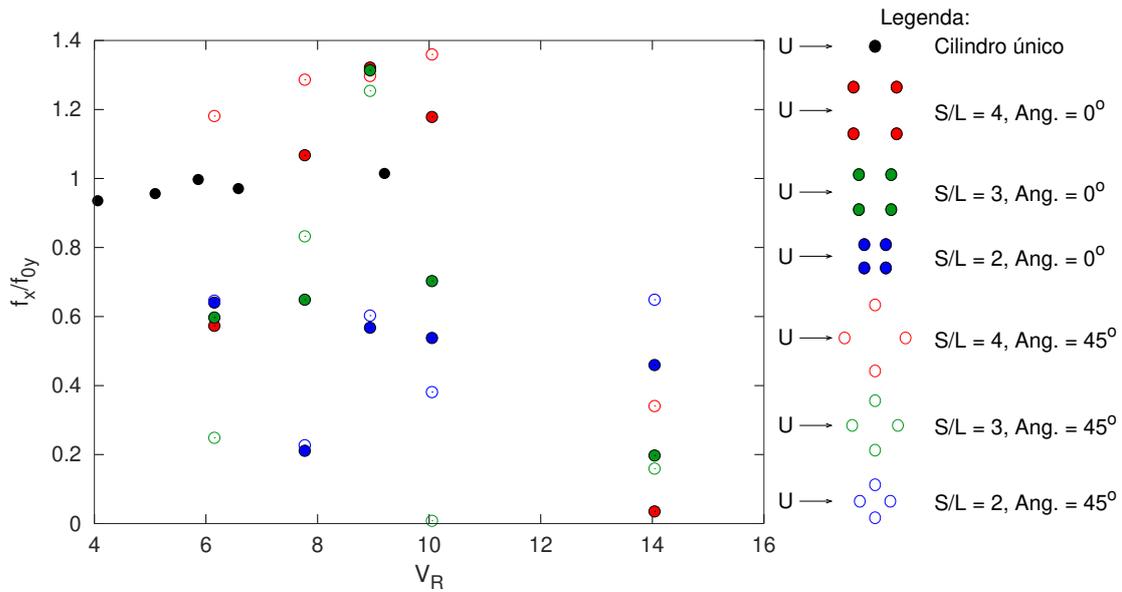
A Figura 36 apresenta as frequências adimensionais na direção longitudinal ao escoamento, direção-X.

Primeiramente, nota-se que o cilindro único possui frequências longitudinais de oscilação praticamente iguais às frequências naturais na direção transversal ao escoamento.

Por sua vez, os arranjos com maior espaçamento entre colunas responderam com maiores frequências para as primeiras quatro velocidades de escoamento. E, de

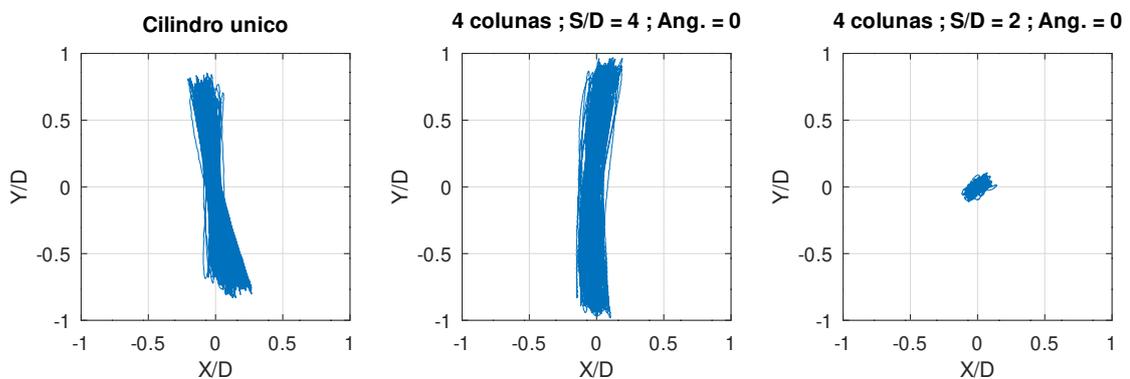
um modo geral, o aproamento nesta direção não demonstra influência considerável nos resultados.

Figura 36 – Frequências adimensionais na direção longitudinal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 4 colunas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 37 – Exemplos de trajetórias no plano-XY para o cilindro único em  $V_R = 6,58$  e para os arranjos de 4 colunas distantes  $S/D = 4$  e  $S/D = 2$  em aproamento de  $0^\circ$  e  $V_R = 10,05$ .



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Exemplos de trajetórias X-Y de alguns arranjos, na primeira das três repetições<sup>1</sup>

<sup>1</sup> A escolha se deu apenas para criar uma padronização de apresentação nesta seção. Desta forma,

são dadas na Figura 37. Para o cilindro único, o resultado gráfico refere-se à  $V_R = 6,58$ , enquanto para os dois arranjos com 4 colunas às distâncias  $S/D = 4$  e  $S/D = 2$ , em aproamento de  $0^\circ$ , a velocidade reduzida foi de  $V_R = 10,05$ .

Comentando a trajetória do cilindro único, gráfico à esquerda na Figura 37, a literatura clássica menciona que para este tipo de corpo, o VIV apresenta trajetórias em “forma de 8”. No presente trabalho, porém, como as frequências nas duas direções estão muito próximas, não ocorre o “fechamento” deste 8 no centro. Assim, as trajetórias para o modelo se assemelham muito mais a uma elipse achatada.

O gráfico ao centro, na Figura 37, mostra a trajetória para o arranjo de 4 colunas, com  $S/D = 4$  e ângulo de aproamento de  $0^\circ$ . A amplitude de movimento é próxima ao diâmetro do cilindro na direção transversal e cerca de 20% de diâmetro na direção do escoamento.

Com relação à trajetória do arranjo com espaçamento  $S/D = 2$ , também para o ângulo de aproamento de  $0^\circ$ , o gráfico à direita na Figura 37 mostra que esta acontece com amplitudes de até 15% do diâmetro em ambas as direções, o que justifica a escolha em termos de projeto que busca menores amplitudes.

Outro resultado interessante a ser comentado sobre os ensaios com os diferentes espaçamentos, é que a partir de  $S/D = 3$ , o espaçamento parece não influenciar de forma apreciável os resultados analisados neste trabalho. Gonçalves *et al.* (2020b) também conclui o mesmo, porém em números de Reynolds substancialmente maiores, o que corrobora a pertinência dos ensaios em baixos números de Reynolds como procedimento de triagem. No entanto, para fins de investigação, seria interessante que desdobramentos do presente trabalho buscassem descobrir qual seria o valor crítico de  $S/D$ , aparentemente entre 2 e 3, a partir do qual a distância entre colunas deixa de influenciar os resultados, o que permitiria até mesmo diminuir essa distância para aplicações diferentes de plataformas offshore.

Finalizadas as discussões acerca dos arranjos de quatro colunas, serão apresentados os resultados para os arranjos com três colunas. Uma vez que os ensaios com cilindros únicos já foram devidamente comentados, essa discussão focará apenas nestes arranjos e seu desempenho.

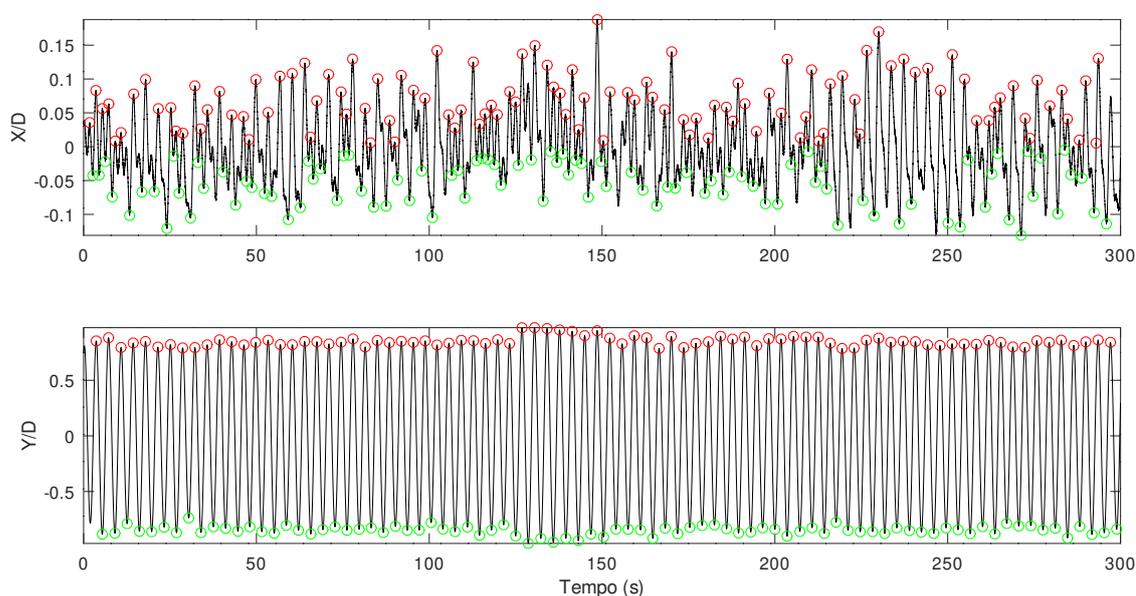
---

todas as trajetórias e registros presentes aqui são relativos à primeira repetição.

## 4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES PARA OS ARRANJOS COM 3 COLUNAS

Verificando um exemplo de registro de um arranjo com três colunas para  $S/D = 4$  e aproamento  $0^\circ$  (Figura 38), observa-se que para a direção longitudinal o comportamento  $X/D = X/D(t)$  novamente não é tão regular quanto aquele registrado para os deslocamentos da direção transversal ao escoamento,  $Y/D = Y/D(t)$ . Para este exemplo, a máxima amplitude de resposta é de 15% do diâmetro para a direção-X e cerca de 90% do diâmetro para a direção-Y.

Figura 38 – Registros temporais para o arranjo  $S/D=4$  e aproamento  $0^\circ$ ,  $V_R = 8, 23$ .



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

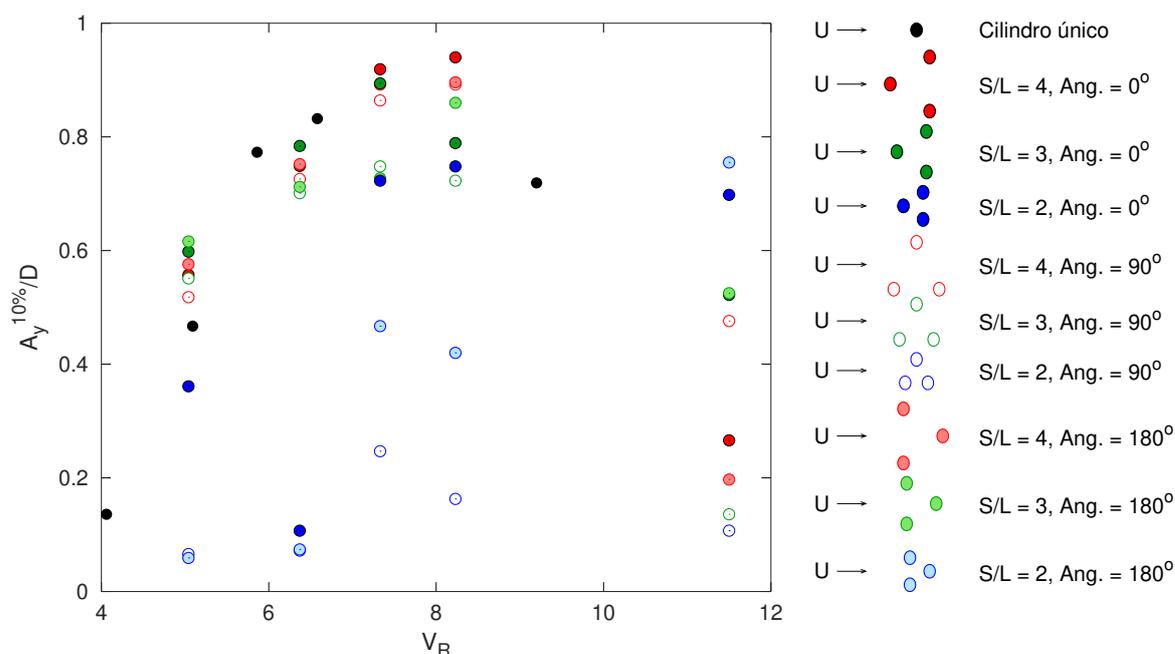
A partir da Figura 39, nota-se que novamente os arranjos  $S/D = 4$  e  $S/D = 3$ , para  $V_R > 7$ , apresentam amplitudes adimensionais de resposta transversal maiores do que aquelas do cilindro único.

Comparando os resultados obtidos com os de Gonçalves *et al.* (2020a) (Figura 19), os modelos  $S/D = 4$  e  $S/D = 3$  responderam com amplitudes semelhantes entre si e, mais uma vez, o fato de as amplitudes do presente trabalho serem menores pode ser justificada tanto pelos números de Reynolds menores, quanto pela razão de massa ser grande e o amortecimento baixo.

Comparando todos os arranjos, o de menor espaçamento  $S/D = 2$  respondeu com amplitudes menores para quase todas as velocidades, porém o aproamento influenciou a resposta do sistema. Os arranjos com ângulo de incidência  $0^\circ$  mostraram amplitudes até 50% maiores do que os demais. Ainda sobre o aproamento, para os arranjos de maior distância entre colunas, este não se mostrou significativo para as

respostas nas velocidade mais baixas de escoamento.

Figura 39 – Médias entre os 10% maiores valores de amplitude adimensional na direção transversal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 3 colunas.



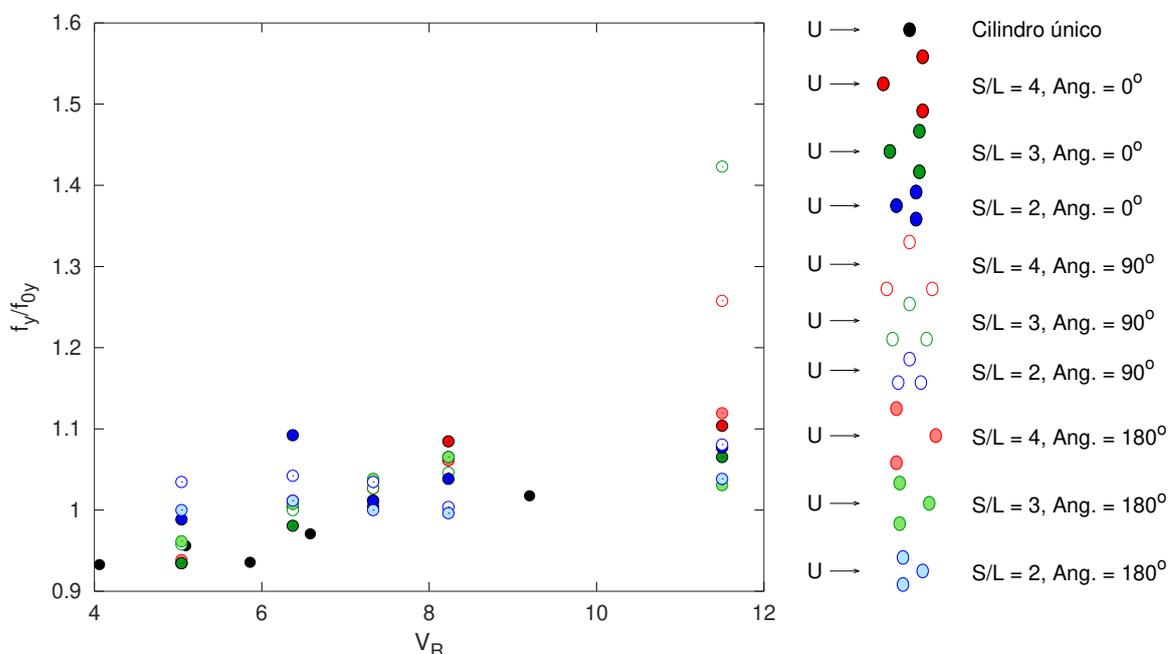
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Dentre todas as velocidades de escoamento, a mais elevada (equivalente a  $V_R = 11,50$  para os arranjos triangulares) mostrou novamente um espalhamento maior dos resultados. Especialmente, para os arranjos  $S/D = 3$  e  $S/D = 2$  e aprornamento  $90^\circ$ , aparentemente ocorre um pequeno deslocamento do intervalo onde ocorre o lock-in, os maiores valores de deslocamento ocorrem a menores valores de  $V_R$ .

No que diz respeito às frequências, cuja síntese dos resultados é apresentada na Figura 40, os arranjos possuem frequências entre 70% e 80% de sua frequência natural na direção transversal ao escoamento.

Um espalhamento maior dos dados ocorreu para a última faixa de velocidades, assim como já foi visto para o arranjo de quatro colunas, possivelmente associado à característica mais tridimensional esperada para as esteiras nessas velocidades.

Figura 40 – Frequências adimensionais na direção transversal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 3 colunas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

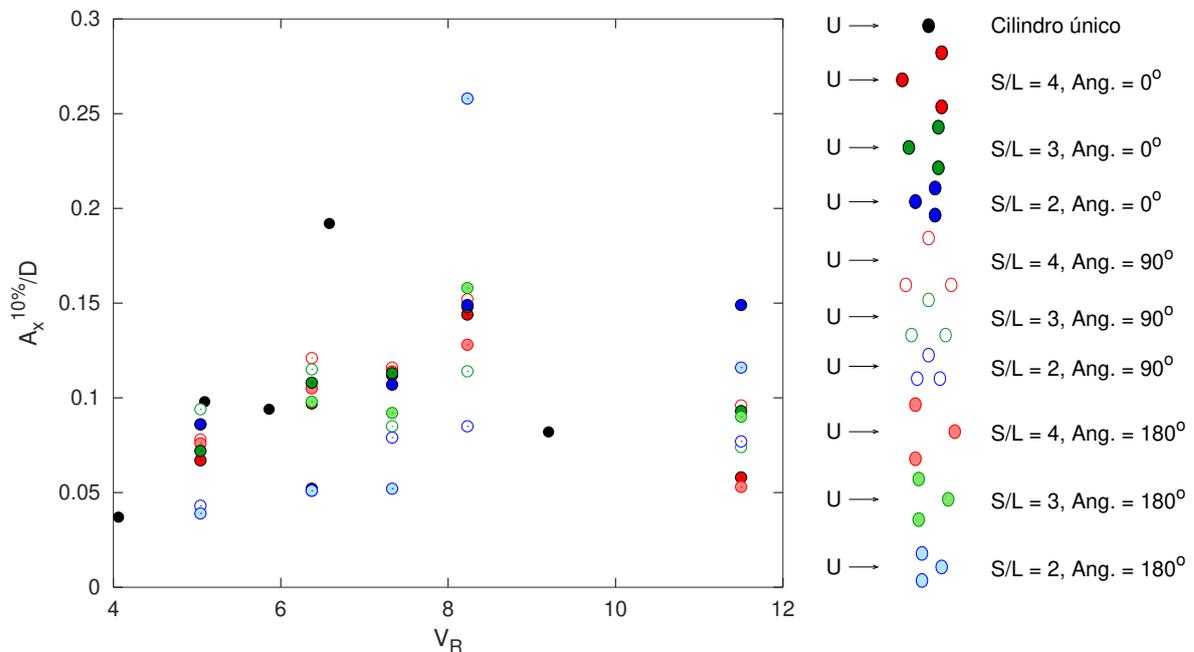
O arranjo  $S/D = 3$  e aproamento  $90^\circ$  apresentou maior razão de frequências na maior velocidade reduzida, próximas a 1,4. Nesta mesma velocidade reduzida, o arranjo com  $S/D = 2$ , foi o que apresentou resultados mais independentes do aproamento.

A respeito dos resultados de amplitude adimensional na direção longitudinal (Figura 41), os aproamentos não implicaram em grandes diferenças nas respostas dos arranjos triangulares nas diferentes distâncias entre colunas, apesar de ter sido registrado um aumento na resposta do arranjo de menor espaçamento no aproamento de  $180^\circ$ . Apesar disso, porém, novamente em função da escala adotada para a representação gráfica, estas diferenças aparentam ser grandes em números absolutos, mas são bastante diminutas se comparadas às amplitudes na direção transversal (Figura 39).

De um modo geral, os arranjos apresentaram resultados de amplitude longitudinal entre 4% e 16% do diâmetro, sendo que apenas um dos ensaios suscitou valor acima de 25% do diâmetro de uma coluna, aquele com  $S/D = 2$  e  $180^\circ$  de aproamento.

Pensando em uma solução de projeto que minimize os efeitos de VIE, novamente o arranjo de menor espaçamento entre colunas é o mais indicado, segundo uma decisão a favor da segurança.

Figura 41 – Médias entre os 10% maiores valores de amplitude adimensional na direção longitudinal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 3 colunas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

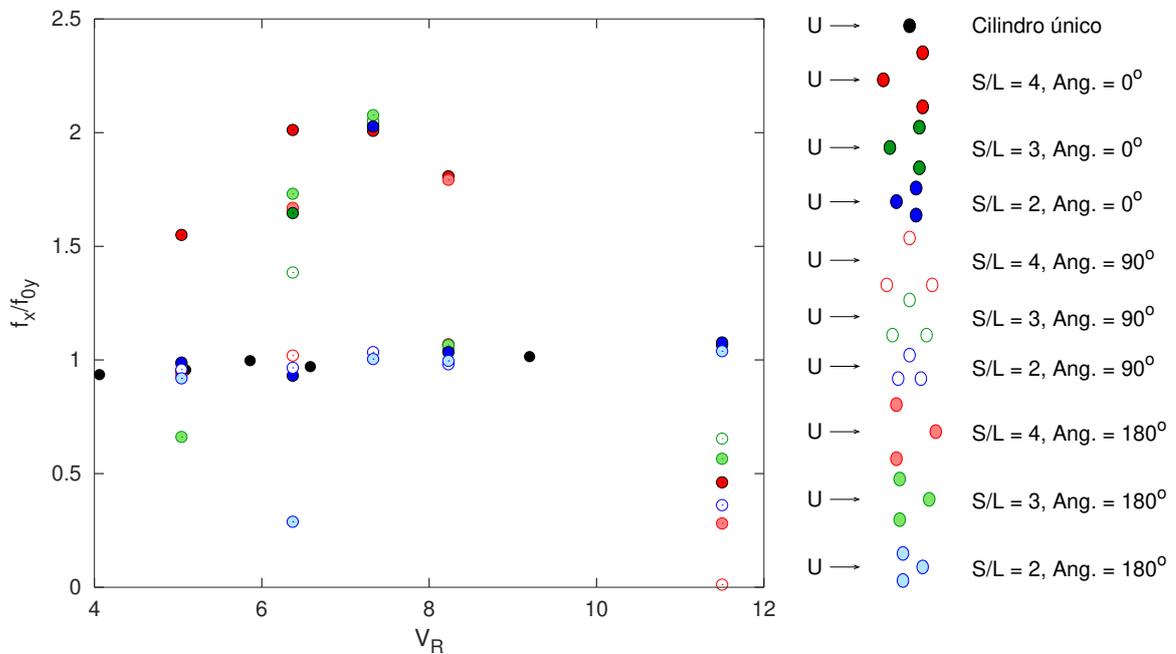
Os últimos resultados discutidos são os de frequências adimensional na direção longitudinal ao escoamento (Figura 42).

Como ocorreu para o arranjo de 4 colunas, alguns arranjos de 3 colunas responderam com frequências adimensionais longitudinais superiores àquelas do cilindro único, o que deve ter relação com a característica da esteira, muito mais suscetível à presença oscilações em frequências mais altas.

Para a última velocidade reduzida ensaiada com os arranjos de 3 colunas,  $V_R = 11,05$ , todos os ensaios obtiveram razões de frequências inferiores às do cilindro único. Na faixa de velocidades de escoamento testada, a maioria dos arranjos apresentou razões de frequência superiores ao valor unitário.

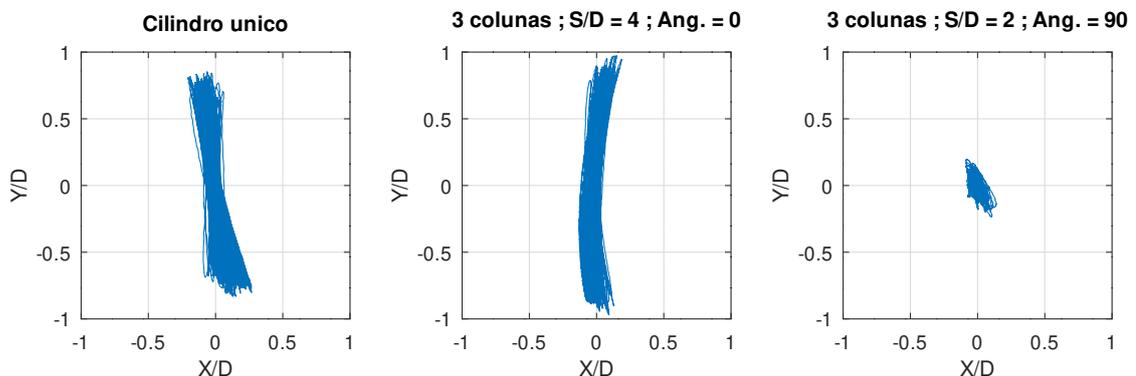
A título de completude, a Figura 43 apresenta as trajetórias no plano-XY de dois arranjos triangulares em  $V_R = 8,23$ , sendo o central correspondente a  $S/D = 4$  no aproamento de  $0^\circ$ , e à direita referente a  $S/D = 2$  e aproamento de  $90^\circ$ . No que diz respeito a estas trajetórias, nota-se certa semelhança qualitativa ao menos, quando comparadas com aquelas apresentadas pelos arranjos com 4 colunas.

Figura 42 – Frequências adimensionais na direção longitudinal ao escoamento. Resultados do cilindro único comparados com aqueles dos arranjos de 3 colunas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 43 – Exemplos de trajetórias no plano-XY para o cilindro único em  $V_R = 6,58$  e para os arranjos de 4 colunas distantes  $S/D = 4$  e  $S/D = 2$  em aprornamento de  $0^\circ$  e  $V_R = 8,23$ .



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O arranjo que possui maior espaçamento responde com amplitudes próximas a um diâmetro na direção transversal, ainda superior ao cilindro único. Também nota-se que a trajetória é mais fechada do que a apresentada no centro da Figura 37, se

assemelhando a um “C”. Por sua vez, o arranjo de  $S/D = 2$  responde sempre com baixas amplitudes, e sua trajetória se assemelha a uma elipse achatada.

Para os arranjos de três colunas, a distância entre estas passa a não influenciar de forma significativa a resposta para valores  $S/D > 3$ . Os aproamentos não influenciam os resultados para a grande maioria de valores de velocidade reduzida.

As colunas a jusante geralmente experimentam forças flutuantes mais altas dependendo do espaçamento, como efeito da esteira. É razoável conjecturar que duas colunas a jusante em um arranjo de quatro colunas, por exemplo, com aproamento  $0^\circ$  da estrutura estão sujeitas a forças flutuantes maiores do que apenas uma coluna a jusante na proa de corrente de  $45^\circ$ . Além disso, quando a estrutura de quatro colunas é submetida à corrente de  $0^\circ$ , o espaçamento entre as colunas é diferente daquele a  $45^\circ$ . Isso significa que, para a estrutura multicoluna, a resposta transversal também está associada às localizações relativas das multicolunas, que fornecem diferentes interferências entre esteiras. Porém, esta diferença aparenta ser mais visível para os arranjos  $S/D = 3$  e  $S/D = 2$ , porém ainda a baixas proporções que podem ser melhor investigadas utilizando técnicas de visualização do escoamento.

Comparando os resultados em relação ao número de colunas, de um modo geral o arranjo de quatro colunas e  $S/D = 2$  respondeu com amplitudes mais baixas do que o arranjo de 3 colunas. Existem mais aspectos de um projeto de unidades flutuantes além da mitigação da VIE, ou do VIM, como o arranjo dos topsides e decks, projeto estrutural, viabilidade econômica e alojamentos, por exemplo. Porém pensando apenas na fenomenologia, dentre todos os seis arranjos ensaiados no âmbito deste trabalho, o de quatro colunas, com  $S/D = 2$  é o mais indicado.

Ainda comentando sobre este arranjo em específico, Gonçalves *et al.* (2020b) comenta que a dinâmica deste se assemelha a um cilindro único. Uma forma de investigar este aspecto na sequência deste trabalho seria conduzir uma campanha de ensaios extra, construindo um modelo de cilindro único, com diâmetro e características equivalentes aos arranjos de menor  $S/D$  e verificar sua resposta comparada com aquelas aqui obtidas.

A Tabela 7 e a Tabela 8 elencam os resultados que já estão sintetizados e discutidos nas Figuras 33, 35, 39 e 41. Estas constam aqui de forma a facilitar as discussões sobre análise de incertezas, uma vez que a incerteza sempre acompanha a média das medidas realizadas.

As tabelas possuem os algarismos de 1 a 5 em seu cabeçalho para a correspondência de  $V_R$  para cada um dos arranjos. A leitura deve ser feita seguindo a Tabela 6, por exemplo, na Tabela 7, na coluna  $V_R$  2, para um arranjo de cilindro único, o valor de  $V_R$  real é 6,58, para o de 3 colunas é 8,23 e de quatro colunas, 10,05.

Tabela 6 – Correspondência dos algoritmos com as velocidades reduzidas.

Tabelas de incertezas	$V_R$ para os conjuntos		
	1 col	3 col	4 col
1	9,2	11,5	14,04
2	6,58	8,23	10,05
3	5,86	7,33	8,94
4	5,09	6,37	7,77
5	4,06	5,04	6,15

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 7 – Médias dos 10% maiores picos na direção X,  $A_x/D$ .

Colunas	S/D	$\theta$	$V_R$				
			1	2	3	4	5
			$A_x/D$				
1	-	-	0,037	0,098	0,094	0,192	0,082
4	4	0	0,122	0,134	0,124	0,156	0,166
4	4	45	0,101	0,126	0,134	0,151	0,086
4	3	0	0,141	0,133	0,111	0,127	0,152
4	3	45	0,106	0,110	0,125	0,123	0,118
4	2	0	0,104	0,083	0,074	0,103	0,106
4	2	45	0,061	0,075	0,089	0,098	0,145
3	4	0	0,067	0,097	0,112	0,144	0,058
3	4	90	0,078	0,121	0,116	0,152	0,096
3	4	180	0,076	0,105	0,114	0,128	0,053
3	3	0	0,072	0,108	0,113	0,148	0,093
3	3	90	0,094	0,115	0,085	0,114	0,074
3	3	180	0,086	0,098	0,092	0,158	0,090
3	2	0	0,086	0,052	0,107	0,149	0,149
3	2	90	0,043	0,051	0,079	0,085	0,077
3	2	180	0,039	0,051	0,052	0,258	0,116

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 8 – Médias dos 10% maiores picos na direção Y,  $A_y/D$ .

Colunas	S/D	$\theta$	$V_R$				
			1	2	3	4	5
			$A_y/D$				
1	-	-	0,136	0,467	0,773	0,832	0,719
4	4	0	0,680	0,836	0,944	0,947	0,576
4	4	45	0,657	0,819	0,931	0,938	0,302
4	3	0	0,687	0,769	0,837	0,702	0,307
4	3	45	0,652	0,707	0,834	0,728	0,566
4	2	0	0,396	0,095	0,064	0,094	0,123
4	2	45	0,209	0,127	0,656	0,694	0,927
3	4	0	0,557	0,749	0,919	0,940	0,266
3	4	90	0,518	0,726	0,864	0,892	0,476
3	4	180	0,576	0,752	0,892	0,896	0,197
3	3	0	0,598	0,784	0,894	0,789	0,522
3	3	90	0,551	0,701	0,748	0,723	0,136
3	3	180	0,616	0,712	0,727	0,860	0,525
3	2	0	0,361	0,107	0,723	0,748	0,698
3	2	90	0,066	0,072	0,247	0,163	0,107
3	2	180	0,059	0,074	0,467	0,420	0,755

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Como este trabalho é baseado na abordagem experimental, uma análise de incertezas foi conduzida de forma a verificar se os resultados obtidos se mostram confiáveis. Uma vez que os resultados numéricos são apresentados como uma razão do diâmetro de uma coluna, as incertezas também foram calculadas utilizando esta razão, assim os valores permanecem na mesma escala de grandeza, porém sem dimensão.

A Tabela 9 elenca as incertezas expandidas para os dados de  $A_x/D$ , que serão denotadas por  $U_{*x}$ . Os valores estão na ordem de grandeza  $10^{-3}$ , escolhida para padronizá-los em uma mesma escala.

Tabela 9 – Incertezas expandidas para  $A_x/D$ .

Colunas	S/D	$\theta$	$V_R$				
			1	2	3	4	5
			$U_x(10^{-3})$				
1	-	-	0,08	1,41	3,30	14,53	1,69
4	4	0	2,82	5,94	4,34	7,55	4,01
4	4	45	3,63	8,52	10,30	8,76	2,05
4	3	0	1,52	4,33	3,05	2,72	2,16
4	3	45	3,72	3,58	6,59	9,31	2,79
4	2	0	2,31	1,25	1,31	3,13	2,21
4	2	45	0,69	1,46	1,89	2,55	5,66
3	4	0	1,72	5,15	2,59	7,01	0,68
3	4	90	1,86	3,98	6,13	3,32	4,99
3	4	180	1,72	6,42	6,87	8,22	1,17
3	3	0	2,47	5,23	2,99	6,88	2,35
3	3	90	2,02	3,92	2,67	3,72	2,40
3	3	180	2,28	2,08	4,28	8,85	4,40
3	2	0	1,46	3,73	4,13	7,58	9,38
3	2	90	0,56	1,52	0,94	2,92	1,37
3	2	180	0,22	0,37	0,20	0,90	4,22

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

De um modo geral, o maior valor de  $U_x$  foi de  $14,53 \times 10^{-3}$ , para a máxima resposta na faixa de sincronização do cilindro único. O valor em um primeiro momento pode parecer grande, mas representa que a incerteza está na segunda casa decimal de um valor que já é pequeno quando comparada às amplitudes em Y. Portanto, de um modo geral, os resultados se apresentaram dentro de intervalos coerentes, com incertezas da ordem de  $10^{-3}$ .

A Tabela 10 elenca os resultados da incerteza expandida para a direção transversal. Da mesma forma, os resultados são confiáveis, uma vez que em sua maioria, a diferença aparece na terceira casa decimal, e raros casos, na segunda. Quando este ocorre, a diferença é de no máximo  $11,5 \times 10^{-3}$  em módulo.

Tabela 10 – Incertezas expandidas para  $A_y/D$ .

Colunas	S/D	$\theta$	$V_R$				
			1	2	3	4	5
			$U_y(10^{-3})$				
1	-	-	4,43	8,82	5,23	3,92	6,86
4	4	0	1,89	3,60	2,64	5,19	4,10
4	4	45	2,00	9,67	1,10	1,92	1,10
4	3	0	1,27	1,93	3,95	1,40	1,20
4	3	45	5,63	5,12	3,78	8,00	7,22
4	2	0	4,18	2,13	1,33	2,33	6,57
4	2	45	6,89	4,54	8,71	3,38	3,58
3	4	0	3,33	2,68	2,34	9,31	8,20
3	4	90	4,18	1,92	2,16	2,69	8,90
3	4	180	3,29	2,57	5,15	4,25	5,53
3	3	0	3,77	7,93	1,77	8,40	1,10
3	3	90	1,23	4,53	2,66	8,79	2,99
3	3	180	1,21	2,18	1,40	1,40	3,77
3	2	0	8,32	4,11	5,65	3,15	11,50
3	2	90	4,69	2,26	1,60	6,63	2,60
3	2	180	1,60	1,73	1,69	4,19	4,00

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Por fim, pode-se dizer que o estudo logrou êxito em seus propósitos. Tanto o cilindro único, quanto os arranjos exibiram comportamentos aderentes com a literatura, avaliando apenas qualitativamente, uma vez que não se dispõe de resultados quantitativos de arranjos com as mesmas características para que seja possível fazer comparação direta em termos de valores.

A partir da análise de incertezas é possível afirmar também que os resultados obtidos neste estudo são aderentes dentro de um mesmo conjunto de repetições, uma vez que a incerteza experimental calculada é relativamente pequena. As incertezas na terceira casa decimal são resultantes tanto da robustez do fenômeno investigado, quanto da qualidade do instrumento utilizado para a captura dos movimentos.

Apesar de trazer resultados que podem ser considerados inéditos no âmbito da fenomenologia em regime de baixo Reynolds, ainda é necessário investigar muitos outros aspectos relativos ao comportamento do fenômeno nos regimes de escoamento subcrítico. Estas investigações podem seguir tanto a linha experimental, quanto numérica e são trabalhos que estão localizados logo antes da fronteira do conhecimento acerca do fenômeno de Vibração Induzida pelo Escoamento.

## 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

### 5.1 SÍNTESE DAS CONCLUSÕES DESTE TRABALHO

O principal objetivo deste trabalho foi investigar a Vibração Induzida pelo escoamento em arranjos de colunas circulares em regime de baixo Reynolds ( $524 < Re < 1196$ ).

Para tanto, foi utilizada uma abordagem eminentemente experimental, onde modelos reduzidos de plataformas e/ou unidades flutuantes de Floating Offshore Wind Turbines foram ensaiados em um Canal de Água Circulante localizado na Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.

Uma vez que ensaiar protótipos em escala real é inviável devido às dimensões e os custos gigantescos dos sistemas mencionados, e ensaios com modelos de médio porte ainda são caros e de difícil manipulação experimental, foram construídos modelos em escala ainda mais reduzida, com  $D = 20\text{mm}$  de diâmetro, a partir de impressão 3D em PLA, com razão de aspecto  $A_R = 2$ , ou seja, com sua porção submersa corresponde a dois diâmetros. Foram variadas as distâncias relativas entre colunas, com valor  $S/D = 2, 3$  e  $4$ . Além da variação na distância entre colunas, também variou-se o aproamento, ou ângulo de incidência do escoamento, sendo este de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $180^\circ$  para os arranjos de três colunas e de  $0^\circ$  e  $45^\circ$  para os arranjos de quatro colunas. Cinco velocidades de ensaio foram testadas, compreendendo uma faixa de  $V_R$  variando entre 4 e 14. Vale chamar a atenção para o aspecto de que os arranjos são compostos por colunas solidárias entre si, suportados por uma haste longa que lhes permite liberdade para oscilar na superfície livre, nos dois graus de liberdade de interesse, longitudinal e transversal ao escoamento, respectivamente as direções X e Y.

Os resultados foram comparados entre si e também com aqueles resultados advindos da literatura sobre o assunto. Os registros temporais obtidos por meio do equipamento comercial Optitrack foram importados para GNU-Octave, onde rotinas de análise especificamente construídas para a obtenção das médias entre os 10% maiores valores de amplitude adimensionais de oscilação, das trajetórias e das razões de frequência, além de incertezas expandidas de forma a verificar a confiabilidade dos resultados obtidos.

É necessário ressaltar que após uma verificação do “estado da arte” acerca da fenomenologia de VIE, não foi encontrada nenhuma publicação que possuísse aspectos similares aos deste trabalho. Com base nesta busca, entende-se que o baixo número de Reynolds em arranjo de três e quatro colunas é parâmetro-chave que agiliza e viabiliza em custos mais acessíveis a triagem de geometrias mais promissoras quando submetidas aos fenômenos de VIE. Embora distintas, as publicações encontradas serviram de subsídio para as discussões, contribuindo de forma decisiva para a

certificação de coerência dos resultados aqui obtidos.

Discorrendo especificamente sobre amplitudes de resposta na direção transversal ao escoamento,  $A_y/D$ , o cilindro único obteve resultados aderentes com a literatura, como os apresentados por Blevins e Coughran (2009). Apesar de ser esperado que o sistema em questão respondesse com valores de amplitude transversal de um diâmetro, o mesmo apresentou uma diminuição nos valores de pico, ainda que a faixa de sincronização seja compatível com a conhecida, localizada em velocidades reduzidas entre 5,5 e 7. Aventa-se que essa diminuição na amplitude de resposta deve-se justamente ao regime de baixo Reynolds, onde espera-se que os valores de amplitude na faixa de sincronização sejam menores, como o próprio trabalho de Blevins e Coughran (2009) aponta. Adicionalmente, outros dois aspectos levantados pelos autores também podem justificar esta diminuição, sendo eles a razão de massa e a própria rugosidade superficial dos modelos. Lembrar que, por se tratarem de um modelos muito pequenos, qualquer diferença na rugosidade pode ter um impacto maior na resposta de VIE do sistema.

No tocante aos arranjos de quatro colunas, aqueles que possuem maior espaçamento,  $S/D = 3$  e  $4$ , apresentaram amplitudes adimensionais de resposta transversal superiores àquelas do cilindro único em suas faixas de sincronização próprias, localizadas em valores de velocidade reduzida superiores,  $8 < V_R < 10$ , o que é justificado pelas frequências naturais menores. Este aumento na resposta pode ser justificado pelos efeitos da esteira produzida pelos cilindros a montante.

As menores amplitudes adimensionais transversais foram do arranjo  $S/D = 2$ , para o aproamento de  $0^\circ$ . O aproamento não tem influência significativa nas respostas dos sistemas para as quatro primeiras velocidades de ensaio.

Estes resultados corroboram as assertivas do trabalho de Gonçalves *et al.* (2020b), porém garantindo-as para a faixa de números de Reynolds substancialmente menores.

Tratando de frequências, tanto na direção do escoamento, quanto na transversal, os valores foram próximos a um para o cilindro único, o que justifica sua trajetória possuir um formato de elipse achatada ao invés do formato em 8, discutida na literatura. É possível notar que existe um comportamento quase assintótico no que diz respeito às frequências de resposta na direção transversal e longitudinal dos arranjos, com as mesmas crescendo com o aumento de  $V_R$ .

De um modo geral, independente do número de colunas, os arranjos que possuem maior espaçamento entre si respondem com amplitudes de resposta transversal superiores àquelas do cilindro único. Porém, esta distância relativa não se mostra decisiva a partir de  $S/D = 3$ . Em outras palavras, os arranjos com distâncias de três e quatro diâmetros obtiveram resultados próximos entre si. Tais observações também se fazem presentes nas publicações de Gonçalves *et al.* (2020a,b), onde os autores che-

garam às mesmas conclusões com arranjos de três e de quatro colunas em números de Reynolds mais altos, alertando para o fato que deve existir outro parâmetro, que não o espaçamento entre colunas, determinante para o comportamento do sistema.

Comparando todos os resultados obtidos, pode-se notar que o comportamento dos sistemas com três colunas são similares aos comportamentos de quatro colunas. Ambos, apesar de possuírem configurações diferentes, responderam de forma semelhante. Ou seja, para ambos os casos, nota-se que a partir de  $S/D = 3$ , a distância entre colunas não possui impacto significativo nas amplitudes de resposta VIE. Além disso, os arranjos com maior espaçamento respondem com amplitudes transversais superiores ao cilindro único em sua faixa de sincronização que está localizada em  $V_R > 7,5$ . Os arranjos de  $S/D = 2$  responderam com amplitudes de resposta substancialmente menores em ambas as direções.

Comparando os arranjos de três colunas ensaiado por Gonçalves *et al.* (2020a) e os apresentados neste trabalho, nota-se que existe uma aderência em termos qualitativos. Mais uma vez, os arranjos apresentam amplitudes de resposta superiores ao cilindro único quando possuem colunas mais espaçadas. Aventa-se aqui também, que esta seja, de fato, resultado da influência da esteira dos cilindros a montante.

Comparando os arranjos entre si tendo como base o número de colunas, os que possuem quatro colunas tendem a responder com amplitudes quase iguais, mas ligeiramente maiores do que os arranjos com três colunas. Os arranjos que responderam com menores amplitudes, e que podem ser indicados para fins de projeto, são os que possuem  $S/D = 2$ , independente do número de colunas. Suas respostas são de no máximo 40% do diâmetro, ainda que se comportem de forma diferente conforme o aproamento em que são submetidos.

Em relação aos aproamentos, para os arranjos de maior espaçamento, independente do número de colunas, estes não aparentam influenciar na resposta do sistema. Gonçalves *et al.* (2020a) também chegaram à mesma conclusão em seus ensaios com altos números de Reynolds.

De uma maneira geral, afirma-se que, apesar das diferenças quando aos números de Reynolds e às razões de massa e aspecto, o resultados aqui obtidos são aderentes aos publicados em Gonçalves *et al.* (2020a,b). Sendo que as amplitudes de resposta menores obtidas aqui podem ter origem nos aspectos relativos ao baixo número de Reynolds, conforme discutido tanto por Stappenbelt *et al.* (2007) e Blevins e Coughran (2009) para cilindros únicos.

A originalidade deste trabalho, portanto, está principalmente em investigar o fenômeno de VIE em baixo número de Reynolds, para arranjos de cilindros livres para oscilar em dois graus de liberdade. A partir da revisão da literatura feita, os resultados aqui apresentados trazem aparente ineditismo no que diz respeito a sua temática. Além disso, partir destes resultados, não só é possível triar de maneira mais rápida e barata

os melhores arranjos dentro de um elenco grande de possibilidades, como também se obteve um conjunto de valores e discussões robustas o suficiente para serem utilizados como validação para as abordagens numéricas via fluidodinâmica computacional. Até onde se pode apurar, antes do presente trabalho os resultados numéricos com arranjos de colunas em baixos números Reynolds não possuíam outra forma de validação, a não ser mediante comparações indiretas com resultados experimentais de cilindros únicos.

## 5.2 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar de sua aparente originalidade, ainda existe uma grande possibilidade de desdobramentos. Algumas sugestões para trabalhos futuros são feitas a seguir, de forma a reposicionar a fronteira do conhecimento acerca dos fenômenos de VIE.

A primeira sugestão seria utilizar uma abordagem numérica para replicar em meio computacional estes mesmos ensaios e verificar se as respostas são aderentes entre si, e em caso de existir esta aderência, ser possível focar nos arranjos com  $S/D = 2$  para verificar a influência de outros parâmetros do sistema. Além disso, poderia se verificar qual a razão de distância  $S/D$  crítica, a partir da qual a distância entre colunas passa a não importar para a resposta do sistema.

No que diz respeito a abordagens experimentais, que são o principal instrumento de investigação dos fenômenos estudados, sugere-se variar a geometria seção transversal do cilindro, tal como feito por Gonçalves *et al.* (2020a,b) em seus trabalhos, inclusive utilizando a mesma razão de aspecto para uma comparação de modelos com maior semelhança entre si. Uma vez que se possui pouco conhecimento acerca da influência de razão de aspecto, talvez seria interessante replicar estes mesmos ensaios com submersões distintas.

Adicionar rugosidade à superfície dos arranjos, principalmente os que possuem maior amplitude de resposta, poderia ser uma forma de verificar o quanto este parâmetro afeta a dinâmica do sistema, e assim, pensar na possibilidade de utilizar a rugosidade como instrumento de mitigação do fenômeno.

Ainda em relação aos arranjos, seria de grande valia ensaiar um modelo de geometria equivalente ao arranjo  $S/D = 2$  para verificar se este se comporta como um cilindro único devido à proximidade das colunas.

Para finalizar esse exercício de sugestões para trabalhos futuros, pode-se estudar a utilização de arranjos compostos de cilindros flexíveis, cuja montagem e concepção tende a ser mais complexa. Ainda na linha de flexíveis, pode-se trabalhar com colunas que não sejam solidárias entre si, ou seja, cada coluna suportada por seu próprio sistema rígido, e livre para oscilar em múltiplos graus de liberdade.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Luís Eduardo E. de. **Introdução à Avaliação e Expressão de Incertezas em Medições**. 2. ed. [S.l.]: Instituto de Física “Gleb Wataghin” Universidade Estadual de Campinas, 2018.
- ARIOLI, Gianni; GAZZOLA, Filippo. Torsional instability in suspension bridges: The Tacoma Narrows Bridge case. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, v. 42, p. 342–357, 2017. ISSN 1007-5704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2016.05.028>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1007570416301812>.
- BATCHELOR, G. K. **An Introduction to Fluid Dynamics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. (Cambridge Mathematical Library).
- BEARMAN, P W. Vortex Shedding from Oscillating Bluff Bodies. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 16, n. 1, p. 195–222, 1984.
- BLEVINS, Robert. **Flow-induced vibration**. [S.l.]: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- BLEVINS, Robert; COUGHRAN, Charles. Experimental Investigation of Vortex-Induced Vibration in One and Two Dimensions With Variable Mass, Damping, and Reynolds Number. **Journal of Fluids Engineering**, ASME International, v. 131, n. 10, set. 2009. DOI: 10.1115/1.3222904.
- BLEVINS, Robert D; PLUNKETT, R. **Formulas for natural frequency and mode shape**. [S.l.: s.n.], 1980. v. 47, p. 461.
- ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M.. **Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications**. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2010.
- CHANDRASEKARAN, Srinivasan. **Offshore Semi-Submersible Platform Engineering**. [S.l.]: CRC Press, dez. 2020. DOI: 10.1201/9781003130925. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781003130925>.
- CHEN, Chia Rong; CHEN, Hamn Ching. Simulation of vortex-induced motions of a deep draft semi-submersible in current. **Ocean Engineering**, Elsevier BV, v. 118, p. 107–116, mai. 2016.

DEFENSOR FILHO, Wagner Antonio. **Investigação experimental de vibrações induzidas por escoamento em cilindros flexíveis com rigidez ortotrópica**. 2018. F. 233. Mestrado em Engenharia Engenharia Naval e Oceânica – Universidade de São Paulo, São Paulo.

FENG, C.C. **The measurement of vortex induced effects in flow past stationary and oscillating circular and D-section cylinders**. 1968. Tese (Doutorado) – University of British Columbia. DOI: <http://dx.doi.org/10.14288/1.0104049>. Disponível em: <https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/831/items/1.0104049>.

FUJARRA, André L. C.; ROSETTI, Guilherme F.; WILDE, Jaap de; GONÇALVES, Rodolfo T. State-of-Art on Vortex-Induced Motion: A Comprehensive Survey After More Than One Decade of Experimental Investigation. *In*: PROCEEDINGS of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rio de Janeiro: American Society of Mechanical Engineers, jul. 2012.

GAO, Yangyang; YANG, Kang; ZHANG, Baofeng; CHENG, Kaiyu; CHEN, Xinping. Numerical investigation on vortex-induced vibrations of four circular cylinders in a square configuration. **Ocean Engineering**, v. 175, p. 223–240, 2019. ISSN 0029-8018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.02.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801819300484>.

GERRARD, J. H. The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge University Press, v. 25, n. 2, p. 401–413, 1966. DOI: 10.1017/S0022112066001721.

GÓMEZ, H.A.; NARVÁEZ, G.F.; SCHETTINI, E.B. Vortex induced vibration of four cylinders configurations at critical spacing in 0° and 45° flow incidence angle. **Ocean Engineering**, v. 252, p. 111134, 2022.

GONÇALVES, Rodolfo; CHAME, Maria Eduarda Felipe; HANNES, Nicole Hepp; PAULA LOPES, Pedro Paludetto Silva de; HIRABAYASHI, Shinichiro; SUZUKI, Hideyuki. FIM – Flow-Induced Motion of Three-Column Platforms. **International Journal of Offshore and Polar Engineering**, International Society of Offshore e Polar Engineers, v. 30, n. 2, p. 177–185, jun. 2020a.

GONÇALVES, Rodolfo; HANNES, Nicole H.; CHAME, Maria E.F.; LOPES, Pedro P.S.P.; HIRABAYASHI, Shinichiro; SUZUKI, Hideyuki. FIM - flow-induced motions of four-column platforms. **Applied Ocean Research**, Elsevier BV, v. 95, fev. 2020b.

GONÇALVES, Rodolfo; ROSETTI, Guilherme F.; FUJARRA, Andre L. C.; NISHIMOTO, Kazuo; OLIVEIRA, Allan C. Experimental Study on Vortex-Induced Motions (VIM) of a Large-Volume Semi-Submersible Platform. *In*: VOLUME 7: CFD and VIV Offshore Geotechnics. [S.l.]: ASMEDC, jan. 2011.

HAN, Zhaolong; ZHOU, Dai; HE, Tao; TU, Jiahuang; LI, Chunxiang; KWOK, Kenny C.S.; FANG, Congqi. Flow-induced vibrations of four circular cylinders with square arrangement at low Reynolds numbers. **Ocean Engineering**, v. 96, p. 21–33, 2015. ISSN 0029-8018. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.12.002>. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002980181400451X>.

HANNES, Nicole Hepp. **Aperfeiçoamento de um modelo analítico para a predição da fadiga devido ao fenômeno de vibração induzida por vórtices em linhas oceânicas**. 2015. F. 71. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.

INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE. **7.5-02 -07-03.13**: Guideline for VIM Testing. Zurich, jun. 2021. P. 10.

KANEKO, Shigehiko; NAKAMURA, Tomomichi; INADA, Fumio; KATO, Minoru. **Flow induced vibrations**. London: Elsevier Science, 2008.

KUBO, Yoshinobu; NAKAHARA, Tomonari; KATO, Kusuo. Aerodynamic behavior of multiple elastic circular cylinders with vicinity arrangement. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 54-55, p. 227–237, 1995. Third Asian-Pacific Symposium on Wind Engineering.

LIANG, Yibo; TAO, Longbin; XIAO, Longfei; LIU, Mingyue. Experimental and numerical study on vortex-induced motions of a deep-draft semi-submersible. **Applied Ocean Research**, v. 67, p. 169–187, 2017. ISSN 0141-1187. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.07.008>. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014111871630445X>.

LIU, Mingyue; XIAO, Longfei; LU, Haining; SHI, Junqi. Experimental investigation into the influences of pontoon and column configuration on vortex-induced motions of deep-draft semi-submersibles. **Ocean Engineering**, Elsevier BV, v. 123, p. 262–277, set. 2016. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.07.007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.007>.

LIU, Mingyue; XIAO, Longfei; LU, Haining; XIAO, Xiaolong. Experimental study on vortex-induced motions of a semi-submersible with square columns and pontoons at different draft conditions and current incidences. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, Elsevier BV, v. 9, n. 3, p. 326–338, mai. 2017. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2016.11.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016%2Fj.ijnaoe.2016.11.003>.

MAXIMIANO, António; KOOP, Arjen; WILDE, Jaap de; GONÇALVES, Rodolfo T. Experimental Study on the Vortex-Induced Motions (VIM) of a Semi-Submersible Floater in Waves. *In*: VOLUME 7B: Ocean Engineering. [S.l.]: American Society of Mechanical Engineers, jun. 2017.

MODEC. **Floating Production Systems**. 2022. Disponível em: <https://www.modec.com/business/floater/>. Acesso em: 27 mar. 2022.

MUNSON, Bruce Roy; OKIISHI, Theodore Hisao; HUEBSCH, Wade W; ROTHMAYER, Alric P. **Fluid mechanics**. [S.l.]: Wiley Singapore, 2013.

NAKAMURA, Tomomichi; KANEKO, Shigehiko; INADA, Fumio; KATO, Minoru; ISHIHARA, Kunihiro; NISHIHARA, Takashi; MUREITHI, Njuki W; LANGTHJEM, Mikael A. **Flow-induced vibrations**: classifications and lessons from practical experiences. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2013.

EL-REEDY, Mohamed A. Introduction to Offshore Structures. *In*: OFFSHORE Structures. [S.l.]: Elsevier, 2012. P. 1–21.

RODDIER, Dominique; FINNIGAN, Tim; LIAPIS, Stergios. Influence of the Reynolds Number on Spar Vortex Induced Motions (VIM): Multiple Scale Model Test Comparisons. *In*: VOLUME 5: Polar and Arctic Sciences and Technology CFD and VIV. [S.l.]: ASMEDC, jan. 2009. DOI: 10.1115/omae2009-79991.

SANTOS, Érico Almeida. **Vibração induzida por vórtices em cilindros com alta razão de aspecto**: simulações numéricas e comparações com resultados

experimentais. 2010. F. 202. Doutorado em Engenharia Mecânica de Energia e Fluidos – Universidade de São Paulo, São Paulo.

SPEIGHT, James G. Offshore Platforms. *In: SUBSEA and Deepwater Oil and Gas Science and Technology*. [S.l.]: Elsevier, 2015. P. 71–106. DOI: 10.1016/b978-1-85617-558-6.00003-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-558-6.00003-9>.

STAPPENBELT, Brad; LALJI, F.; TAN, G. Low mass ratio vortex-induced motion. **Proceedings of the 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, 16AFMC**, p. 13, jan. 2007.

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

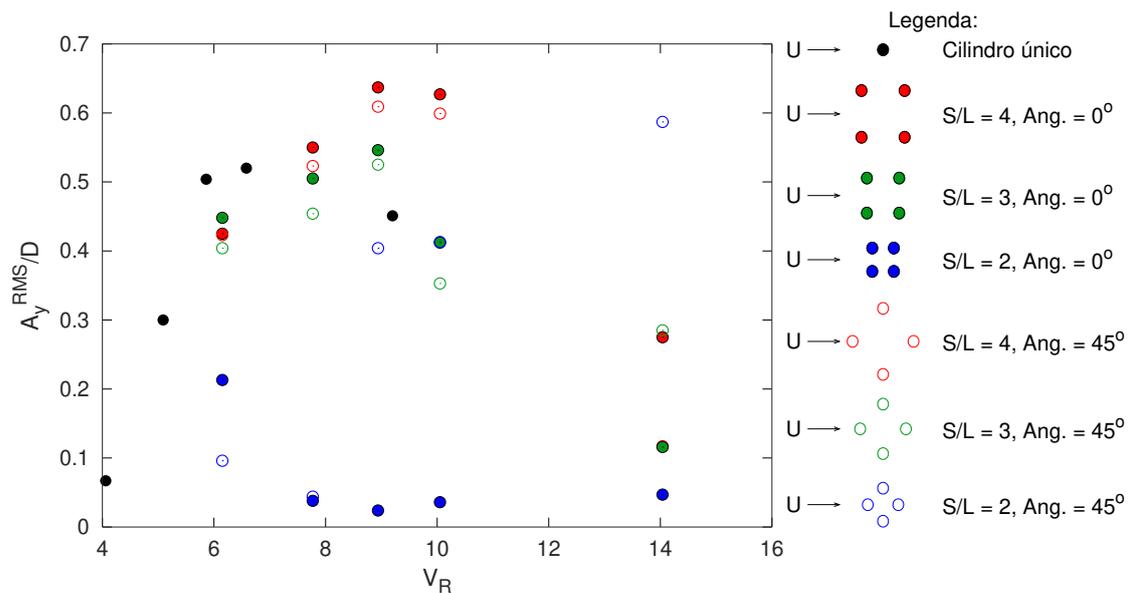
ZHANG, Xinshu; HU, Xiaofeng; SONG, Xingyu; YOU, Yunxiang. Numerical studies on vortex-induced motions of a multi-column deep-draft oil and gas exploration platform. **Ocean Engineering**, Elsevier BV, v. 145, p. 77–94, nov. 2017. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.08.046. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.08.046>.

# **Apêndices**

## APÊNDICE A – AMPLITUDES ADIMENSIONAIS RMS

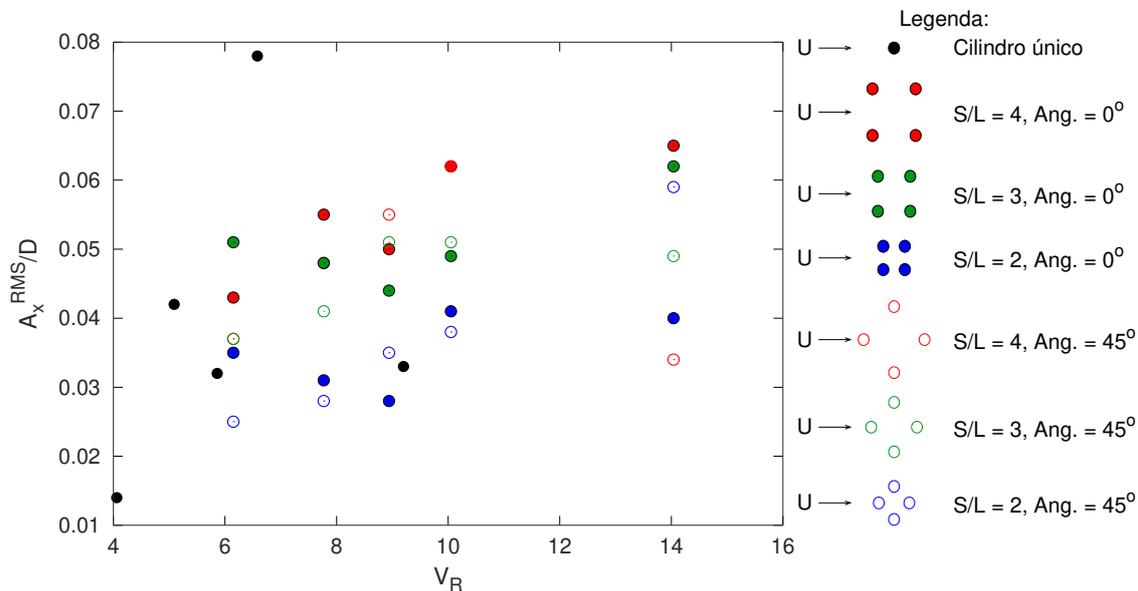
Este apêndice elenca os gráficos sintetizados de amplitudes RMS dos registros obtidos no âmbito deste trabalho.

Figura 44 – Valores RMS das amplitudes adimensionais na direção transversal ao escoamento para os arranjos de 4 colunas.



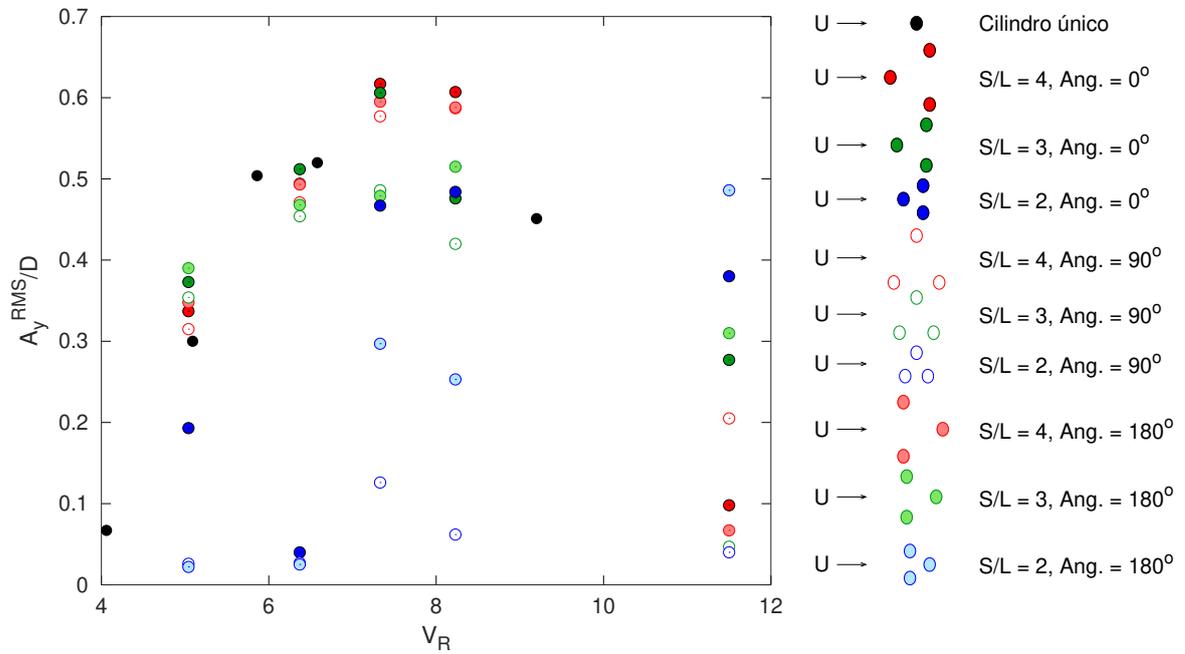
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 45 – Valores RMS das amplitudes adimensionais na direção longitudinal ao escoamento para os arranjos de 4 colunas.



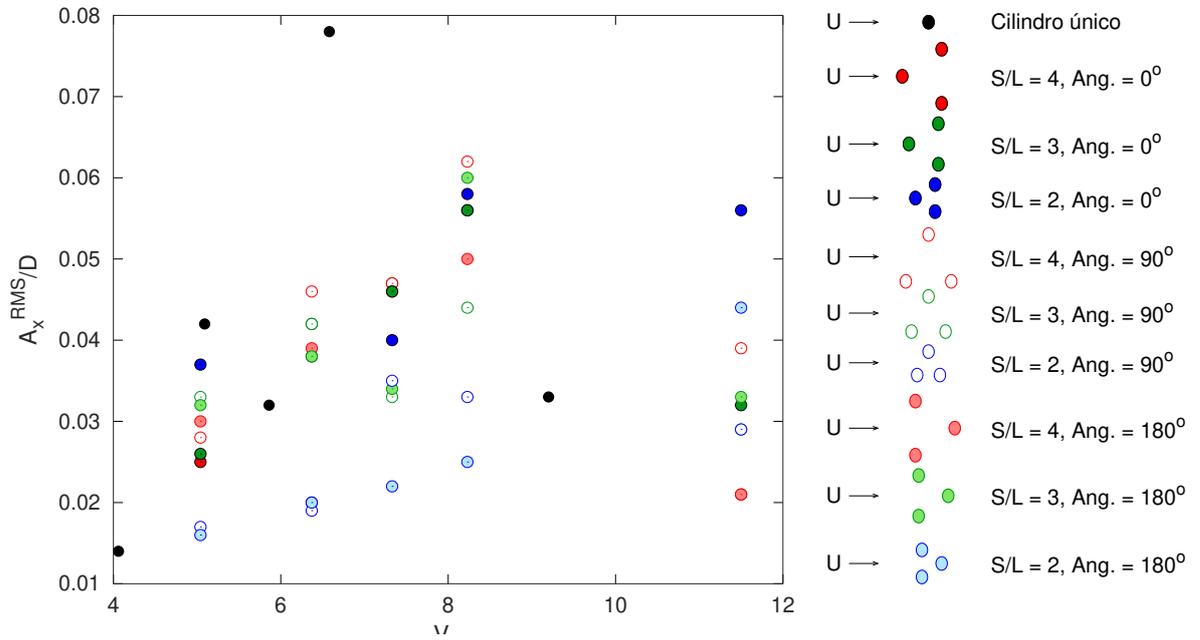
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 46 – Valores RMS das amplitudes adimensionais na direção transversal ao escoamento para os arranjos de 3 colunas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 47 – Valores RMS das amplitudes adimensionais na direção longitudinal ao escoamento para os arranjos de 3 colunas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).