

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

ALINE PERES LEAL

FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA AO ESTUDO DE FORÇAS E
MOVIMENTOS INDUZIDOS POR VÓRTICES EM DIFERENTES FORMATOS DE
SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS COLUNAS DE PLATAFORMAS
SEMISSUBMERSÍVEIS

Joinville
2019

ALINE PERES LEAL

FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA AO ESTUDO DE FORÇAS E
MOVIMENTOS INDUZIDOS POR VÓRTICES EM DIFERENTES FORMATOS DE
SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS COLUNAS DE PLATAFORMAS
SEMISSUBMERSÍVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Naval, no curso Engenharia Naval da
Universidade Federal de Santa Catarina,
Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Dr. André Luís Condino Fugarra

Joinville
2019

ALINE PERES LEAL

FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA AO ESTUDO DE FORÇAS E
MOVIMENTOS INDUZIDOS POR VÓRTICES EM DIFERENTES FORMATOS DE
SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS COLUNAS DE PLATAFORMAS
SEMISSUBMERSÍVEIS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 20 de novembro de 2019.

Banca Examinadora:

André Luís Condino Fugarra, Dr. Eng.
Orientador e Presidente da Banca

Diogo Nardelli Siebert, Dr. Eng.
Membro da Banca
Universidade Federal de Santa Catarina

Rodolfo Trentin Gonçalves, Dr. Eng.
Membro da Banca
Universidade de Tóquio

O sucesso é a soma de
pequenos esforços repetidos
dia após dia.

Robert Collier

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, que está comigo em todos os momentos e me ajudou a superar todas as etapas do curso de engenharia. Aos meus pais, Anésio e Zulciani, por todos os conselhos e ensinamentos que me fizeram chegar até aqui. Ao meu namorado, Thiago, quem sempre esteve ao meu lado, me apoiou e me compreendeu, nos momentos difíceis e também nas comemorações. Ao meu professor e orientador André Luís Condino Fugarra pelos conhecimentos a mim passados e por ter me aceitado como orientanda nessa etapa. À Universidade Federal de Santa Catarina e a todos os professores que contribuíram para a minha formação acadêmica. Ao Laboratório de Computação Científica (LCC), em nome do professor Diogo Nardelli Siebert, pelo acesso ao cluster para a realização das simulações. Ao Laboratório de Acústica e Vibrações (LAV), pelo espaço concedido e pelas amizades geradas durante a realização deste trabalho. Às colegas da engenharia naval Kamila, Monique e Rayza, e aos colegas Fredi e Paulo, pela colaboração nos estudos em CFD. Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica Institucional concedida durante o biênio 2017-2019, no Programa Institucional de Iniciação Científica e Tecnológica (PIICT) da PROPESQ-UFSC.

RESUMO

Neste trabalho, realizou-se a análise fluidodinâmica computacional de diferentes formatos de seção transversal das colunas de plataformas offshore, particularmente, plataformas semissubmersíveis. A estrutura destas plataformas apresenta um ou mais conveses apoiados em colunas, e essas, em flutuadores submersos. Essas unidades flutuantes sofrem movimentos devido à ação das ondas, correntezas e ventos. O uso da Fluidodinâmica Computacional, ou *Computational Fluid Dynamics* (CFD), portanto, abordou a simulação numérica do escoamento ao redor das colunas de plataformas. Foram avaliadas seções nos formatos circular, quadrada e diamante de uma coluna fixa e com dois graus de liberdade (GDL). Além de arranjos de 3 colunas com diferentes distâncias relativas (S) e ângulos de incidência de escoamento (α), na condição fixa. As simulações foram conduzidas com escoamento bidimensional no regime laminar, com número de Reynolds (Re) igual a 100. Esse valor do Re , apesar de baixo, auxilia satisfatoriamente na caracterização e estudo do Movimento Induzido por Vórtices, do inglês *Vortex Induced Motion* (VIM), nas colunas. As simulações numéricas com grau de liberdade, foram feitas em um corpo com razão de massa 10, sem consideração de amortecimento. A ferramenta utilizada foi o programa gratuito e de código aberto OpenFOAM, o qual faz uso do método dos volumes finitos. Dos resultados obtidos, concluiu-se que a situação com 2 GDL leva ao aumento do coeficiente médio de arrasto ($\overline{C_D}$) e à diminuição do valor quadrático médio do coeficiente de sustentação ($C_{L,rms}$), com relação ao caso fixo. Para as colunas isoladas, a coluna de seção diamante com 2 GDL apresentou o maior valor de $\overline{C_D}$, o maior valor de $C_{L,rms}$ ocorreu para essa mesma seção, porém, para a condição fixa; o menor valor de $\overline{C_D}$ foi encontrado para a coluna circular fixa e o menor valor de $C_{L,rms}$ ocorreu para a coluna de seção quadrada com 2 GDL. Referente aos agrupamentos de três colunas, o arranjo de seção quadrada na distância de $S/L = 2$ e no ângulo de incidência de escoamento de $\alpha = 180^\circ$ apresentou os maiores valores dos coeficientes de forças totais; os menores valores ocorreram no arranjo de seção diamante em $S/L = 2$ e $\alpha = 180^\circ$.

Palavras-chave: Fluidodinâmica computacional. CFD. Plataformas offshore. Seções. VIM. Grau de liberdade.

ABSTRACT

In this work, it was performed the computational fluid dynamics analysis of different cross-sectional shapes of offshore platform columns, particularly semi-submersible platforms. The structure of these platforms has one or more decks supported by columns, which are supported on submerged floaters. These floating units suffer movements due to the action of waves, currents and winds. Computational Fluid Dynamics (CFD) deal with the numerical simulation of the flow around the platform columns. Circular, square and diamond sections of a fixed column and with two degrees of freedom (DOF) were evaluated. As well as 3-column arrays with different relative spacings (S) and flow incidence angles (α), in the fixed condition. The simulations were conducted in a two-dimensional laminar flow, with Reynolds number (Re) equal to 100. This Re value, although low, satisfactorily assists in the characterization and study of Vortex Induced Motion (VIM) in columns. The numerical simulations with degree of freedom were made in a body with mass ratio 10, with no damping consideration. The tool used was the free and open source program OpenFOAM, which makes use of the finite volume method. From the obtained results, it was concluded that the 2 DOF situation leads to the increase of the average drag coefficient ($\overline{C_D}$) and the decrease of the root medium square value of the lift coefficient ($C_{L,rms}$), with respect to the fixed case. For single columns, the 2 DOF diamond section column had the largest value of $\overline{C_D}$, the largest value of $C_{L,rms}$ occurred for the same section, but for the fixed condition; the smallest value of $\overline{C_D}$ was found for the fixed circular column and the smallest value of $C_{L,rms}$ occurred for the 2 DOF square section column. Referring to the 3-column array, the square section arrangement at the distance of $S/L = 2$ and the flow angle of $\alpha = 180^\circ$ had the highest values of the total force coefficients; the smallest values occurred in the diamond section arrangement at $S/L = 2$ and $\alpha = 180^\circ$.

Keywords: Computational Fluid Dynamics. CFD. Offshore platforms. Sections. VIM. Degree of freedom.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Regiões de escoamento perturbado. | 23 |
| Figura 2 – Desprendimento e atração dos vórtices. | 24 |
| Figura 3 – Regimes de desprendimento de vórtices para um cilindro liso em função do número de Reynolds. | 25 |
| Figura 4 – Amplitude transversal de um cilindro em função da velocidade reduzida, para 4 razões de massa. | 27 |
| Figura 5 – Exemplo de malha multiblocos com domínio bidimensional. | 30 |
| Figura 6 – Diagrama esquemático de um sistema com massa-mola-amortecedor com 2GDL. | 32 |
| Figura 7 – Erros dos métodos de solução de problemas. | 34 |
| Figura 8 – Fluxograma das simulações. | 35 |
| Figura 9 – Modelos de estudo: a) seção circular; b) seção quadrada e c) seção diamante. | 36 |
| Figura 10 – Modelos dos arranjos de 3 colunas. | 37 |
| Figura 11 – Exemplo de estrutura com 3 colunas. | 38 |
| Figura 12 – Fluxograma do algoritmo PISO. | 40 |
| Figura 13 – Malha próxima ao cilindro. | 42 |
| Figura 14 – Domínio para os arranjos. | 42 |
| Figura 15 – Domínio computacional e condições de contorno. | 43 |
| Figura 16 – Informações do cluster utilizado. | 44 |
| Figura 17 – Histórico de tempo de C_D e C_L para o caso circular. | 50 |
| Figura 18 – Espectro de frequência para o caso circular. | 51 |
| Figura 19 – Vorticidade para o caso circular, tempo adimensional 148. | 51 |
| Figura 20 – Análise de convergência para o coeficiente médio de arrasto. | 52 |
| Figura 21 – Análise de convergência para o coeficiente de sustentação rms. | 52 |
| Figura 22 – Resultados numérico e experimentais para o coeficiente de arrasto médio. | 54 |
| Figura 23 – Resultados numérico e experimentais para o coeficiente de sustentação rms. | 54 |
| Figura 24 – Histórico de tempo de C_D e C_L para a seção quadrada. | 55 |
| Figura 25 – Espectro de frequência para a seção quadrada. | 56 |
| Figura 26 – Vorticidade para a seção quadrada, tempo adimensional 168. | 56 |
| Figura 27 – Histórico de tempo de C_D e C_L para a seção diamante. | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 28 – Espectro de frequência para a seção diamante. | 57 |
| Figura 29 – Vorticidade para a seção diamante, tempos adimensionais (a) 104 e (b) 108. | 58 |
| Figura 30 – Amplitude significativa transversal ao escoamento. | 60 |
| Figura 31 – Amplitude significativa na direção do escoamento. | 60 |
| Figura 32 – Coeficiente de sustentação rms. | 61 |
| Figura 33 – Coeficiente de arrasto rms. | 61 |
| Figura 34 – (a) Histórico de tempo de deslocamento da coluna de seção circular e (b) seu movimento acoplado. | 63 |
| Figura 35 – Vorticidade para o caso circular com 2GDL em três instantes subsequentes. | 64 |
| Figura 36 – A_y para diferentes V_r | 65 |
| Figura 37 – $C_{L,rms}$ para diferentes V_r | 65 |
| Figura 38 – Vorticidade para as velocidades reduzidas (a) 5, (b) 6 (c) 7 e (d) 8, tempo adimensional 160. | 66 |
| Figura 39 – Movimento acoplado da coluna com seção quadrada. | 67 |
| Figura 40 – Histórico de tempo para C_D e C_L para $\alpha = 0^\circ$ | 67 |
| Figura 41 – Movimento acoplado, $\alpha = 45^\circ$ | 68 |
| Figura 42 – Histórico de tempo para C_D e C_L para $\alpha = 45^\circ$ | 68 |
| Figura 43 – Valores de $\overline{C_D}$ para as colunas isoladas. | 69 |
| Figura 44 – Valores de $C_{L,rms}$ para as colunas isoladas. | 70 |
| Figura 45 – Três cilindros com $\alpha = 0^\circ$ | 71 |
| Figura 46 – $\overline{C_D}$ para os cilindros (a)1, (b) 2 e (c) 3 quando $\alpha = 0^\circ$ | 72 |
| Figura 47 – $C_{D,rms}$ para os cilindros (a)1, (b) 2 e (c) 3 quando $\alpha = 0^\circ$ | 73 |
| Figura 48 – $C_{L,rms}$ para os cilindros (a)1, (b) 2 e (c) 3 quando $\alpha = 0^\circ$ | 74 |
| Figura 49 – $\overline{C_L}$ para os cilindros (a)1, (b) 2 e (c) 3 quando $\alpha = 0^\circ$ | 75 |
| Figura 50 – Histórico para C_D e C_L para $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$ | 76 |
| Figura 51 – Histórico para C_D e C_L para $S/L = 3$ e $\alpha = 0^\circ$ | 76 |
| Figura 52 – Histórico para C_D e C_L para $S/L = 4$ e $\alpha = 0^\circ$ | 77 |
| Figura 53 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$ para os tempos adimensionais (a) 436, (b) 440, (c) 448 e (d) 448. | 77 |
| Figura 54 – Linhas de corrente para $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$ | 78 |
| Figura 55 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 0^\circ$ | 78 |
| Figura 56 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 0^\circ$ | 78 |
| Figura 57 – Linhas de corrente para $S/L = 3$ e $\alpha = 0^\circ$ | 79 |
| Figura 58 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 436 e (b) 440. | 79 |
| Figura 59 – Linhas de corrente para $S/L = 3$ e $\alpha = 180^\circ$ | 80 |

| | |
|---|----|
| Figura 60 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 436 e (b) 440. | 80 |
| Figura 61 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 436 e (b) 440. | 81 |
| Figura 62 – Linhas de corrente para $S/L = 3$ e $\alpha = 90^\circ$ | 81 |
| Figura 63 – (a) Histórico para C_D e C_L e (b) espectro de frequência para $S/L = 2$ e $\alpha = 90^\circ$ | 82 |
| Figura 64 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 176 e (b) 180. | 83 |
| Figura 65 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 436 e (b) 440. | 83 |
| Figura 66 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 436 e (b) 440. | 84 |
| Figura 67 – Variação de $\overline{C_D}$ com S/L e com α | 84 |
| Figura 68 – Variação de $C_{L,rms}$ com S/L e com α | 85 |
| Figura 69 – Variação de St com S/L e com α | 85 |
| Figura 70 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$, tempos adimensionais (a) 600 e (b) 604. | 86 |
| Figura 71 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 0^\circ$, tempos adimensionais (a) 600, (b) 604, (c) 608 e (d) 612. | 87 |
| Figura 72 – (a) Histórico de tempo e (b) densidade espectral de frequência para para $S/L = 3$ e $\alpha = 0^\circ$ | 87 |
| Figura 73 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 0^\circ$, tempos adimensionais (a) 436 e (b) 440. | 88 |
| Figura 74 – (a) Histórico de tempo e (b) espectro de frequência para para $S/L = 4$ e $\alpha = 0^\circ$ | 88 |
| Figura 75 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 160 e (b) 164. | 89 |
| Figura 76 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 160 e (b) 164. | 89 |
| Figura 77 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 336 e (b) 340. | 90 |
| Figura 78 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 336,(b) 340, (c) 344 e (d) 348. | 90 |
| Figura 79 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 336 e (b) 340. | 91 |
| Figura 80 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais(a) 200 e (b) 204. | 91 |
| Figura 81 – Variação de $\overline{C_D}$ com S/L e α | 92 |

| | |
|---|-----|
| Figura 82 – Variação de $C_{L,rms}$ com S/L e α | 92 |
| Figura 83 – Variação de St com S/L e α | 93 |
| Figura 84 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$, tempos adimensionais (a) 570 e (b) 574. | 94 |
| Figura 85 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 0^\circ$, tempos adimensionais (a) 260, (b) 264 (c) 268 e (d) 272. | 94 |
| Figura 86 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 0^\circ$, tempos adimensionais (a) 260 e (b) 264. | 95 |
| Figura 87 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 260 e (b) 264. | 95 |
| Figura 88 – (a) Histórico de tempo e (b) espectro de frequência para $S/L = 2$ e $\alpha = 180^\circ$ | 96 |
| Figura 89 – (a) Histórico de tempo e (b) espectro de frequência para $S/L = 3$ e $\alpha = 180^\circ$ | 97 |
| Figura 90 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 400, (b) 404, (c) 408 e (d) 412. | 97 |
| Figura 91 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 260, (b)264, (c)268 e (d) 272. | 98 |
| Figura 92 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 260 e (b) 264. | 99 |
| Figura 93 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 260, (b) 264, (c) 268 e (d)272. | 99 |
| Figura 94 – (a) Histórico de tempo e (b) espectro de frequência para $S/L = 4$ e $\alpha = 90^\circ$ | 100 |
| Figura 95 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 104 e (b) 108. | 101 |
| Figura 96 – Variação de $\overline{C_D}$ com S/L e α | 101 |
| Figura 97 – Variação de $C_{L,rms}$ com S/L e α | 102 |
| Figura 98 – Variação de St com S/L e α | 102 |
| Figura 99 – Variação de $\overline{C_D}$ para formato da seção e S/L , com $\alpha = 0^\circ$ | 103 |
| Figura 100–Variação de $\overline{C_D}$ para formato da seção e S/L , com $\alpha = 180^\circ$ | 104 |
| Figura 101–Variação de $\overline{C_D}$ para formato da seção e S/L , com $\alpha = 90^\circ$ | 104 |
| Figura 102–Variação de $C_{L,rms}$ para formato da seção e S/L , com $\alpha = 0^\circ$ | 105 |
| Figura 103–Variação de $C_{L,rms}$ para formato da seção e S/L , com $\alpha = 180^\circ$ | 105 |
| Figura 104–Variação de $C_{L,rms}$ para formato da seção e S/L , com $\alpha = 90^\circ$ | 106 |
| Figura 105–Histórico de tempo de C_D e C_L para o caso quadrado com 0° | 116 |
| Figura 106–Frequência para o caso quadrado com 0° | 117 |
| Figura 107–Histórico de tempo de C_D e C_L para o caso com 15° | 117 |
| Figura 108–Frequência para o caso com 15° | 118 |

| | |
|--|-----|
| Figura 109–Histórico de tempo de C_D e C_L para o caso com 30° | 118 |
| Figura 110–Frequência para o caso com 30° | 119 |
| Figura 111–Histórico de tempo de C_D e C_L para o caso com 45° | 119 |
| Figura 112–Frequência para o caso com 45° | 120 |
| Figura 113–Variação de $\overline{C_D}$, $C_{L,rms}$ e St com α | 121 |
| Figura 114–Histórico de tempo para C_D e C_L para $\alpha = 0^\circ$ e seu movimento acoplado. | 123 |
| Figura 115–Histórico de tempo para deslocamento da coluna e seu movimento acoplado. | 124 |
| Figura 116–Histórico de tempo para C_D e C_L para $\alpha = 15^\circ$ | 124 |
| Figura 117–Histórico de tempo para deslocamento da coluna e seu movimento acoplado, $\alpha = 30^\circ$ | 125 |
| Figura 118–Histórico de tempo para C_D e C_L para $\alpha = 30^\circ$ | 125 |
| Figura 119–Histórico de tempo para o deslocamento da coluna e seu movimento acoplado, $\alpha = 45^\circ$ | 126 |
| Figura 120–Histórico de tempo para C_D e C_L para $\alpha = 45^\circ$ | 126 |
| Figura 121–Variação de $\overline{C_D}$, $C_{L,rms}$ e St com α | 127 |
| Figura 122–Variação de A_x e A_y com α | 127 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Malha para o caso de uma coluna circular. | 48 |
| Tabela 2 – Malha para o caso de arranjo circular. | 48 |
| Tabela 3 – Incremento de tempo. | 48 |
| Tabela 4 – Matriz das simulações realizadas. | 49 |
| Tabela 5 – Resultados para seção quadrada e diamante. | 59 |
| Tabela 6 – Resultados para seção quadrada. | 122 |
| Tabela 7 – Resultados obtidos das diferentes malhas. | 128 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------|--|
| Re | Número de Reynolds |
| U | Velocidade do escoamento livre |
| D | Comprimento característico do corpo |
| ν | Viscosidade cinemática do fluido |
| f_n | Frequência natural da estrutura, em Hz |
| f_s | Frequência de emissão de vórtices, em Hz |
| f_y | Frequência do movimento transversal, em Hz |
| F_D | Força de arrasto |
| F_L | Força de sustentação |
| C_D | Coefficiente de arrasto |
| C_L | Coefficiente de sustentação |
| ρ | Densidade do fluido |
| A | Área projetada |
| St | Número de Strouhal |
| m^* | Razão de massa |
| m_{est} | Massa da estrutura |
| m_f | Massa de fluido deslocada |
| V_r | Velocidade reduzida |
| A_y | Amplitude característica transversal |
| A_x | Amplitude característica na direção do escoamento |
| y^+ | Parâmetro que classifica em qual camada a célula se encontra |
| u_τ | Velocidade de fricção |

| | |
|------------------|------------------------------------|
| τ_w | Tensão de cisalhamento na parede |
| C | Courant number |
| c | Velocidade através da célula |
| Δt | Incremento de tempo |
| Δx | Tamanho da célula |
| P | Pressão |
| ζ | Fator de amortecimento |
| ω_n | Frequência natural, em rad/s |
| k | Rigidez |
| M | Massa equivalente do sistema |
| α | Ângulo de incidência do escoamento |
| S | Distância relativa entre colunas |
| S/L | Razão de espaçamento |
| L | Largura da coluna |
| P | Pressão cinemática |
| $\vec{\omega}$ | Rotacional do campo de velocidade |
| $U(\phi)$ | Incerteza numérica |
| $U_{val}(\phi)$ | Incerteza de validação |
| ϵ_ϕ | Erro de discretização |
| E | Erro de validação |
| β | Ordem de convergência |
| S_i | Previsão numérica |
| D_i | Valor experimental |
| $U_{data}(\phi)$ | Incerteza experimental |
| τ | Discretização de tempo |
| h | Discretização de espaço |

| | |
|------------------|---|
| $\overline{C_D}$ | Valor médio do coeficiente de arrasto |
| $C_{L,rms}$ | Valor rms do coeficiente de sustentação |
| $C_{D,rms}$ | Valor rms do coeficiente de arrasto |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | OBJETIVO GERAL | 20 |
| 1.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 20 |
| 1.3 | ESTRUTURA DO TEXTO | 20 |
| 1.4 | JUSTIFICATIVA | 20 |
| 2 | REVISÃO TEÓRICA | 22 |
| 2.1 | PLATAFORMAS SEMISSUBMERSÍVEIS | 22 |
| 2.2 | ESCOAMENTO AO REDOR DE COLUNAS | 23 |
| 2.3 | EMIÇÃO DE VÓRTICES | 24 |
| 2.4 | MOVIMENTO INDUZIDO POR VÓRTICES | 26 |
| 2.5 | COEFICIENTES DE ARRASTO E SUSTENTAÇÃO | 27 |
| 2.6 | VARIÁVEIS ADIMENSIONAIS IMPORTANTES | 28 |
| 2.7 | DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL | 28 |
| 2.7.1 | Malha e Incremento de Tempo | 29 |
| 2.7.2 | Condições de Contorno | 31 |
| 2.8 | EQUAÇÕES GOVERNANTES | 32 |
| 2.8.1 | Equações do Movimento | 32 |
| 2.8.2 | Equações de Vibração da Coluna com 2 GDL | 32 |
| 2.9 | VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO (V&V) | 33 |
| 3 | METODOLOGIA | 35 |
| 3.1 | DEFINIÇÃO DO PROBLEMA | 35 |
| 3.1.1 | Coluna Fixa | 36 |
| 3.1.2 | Coluna com 2 GDL | 36 |
| 3.1.3 | Arranjo Fixo | 37 |
| 3.2 | MÉTODOS NUMÉRICOS NO OPENFOAM | 38 |
| 3.2.1 | Piso | 39 |
| 3.2.2 | Pimple | 40 |
| 3.2.3 | Esquemas de discretização | 41 |
| 3.3 | GERAÇÃO DA MALHA | 41 |
| 3.4 | CONDIÇÕES DE CONTORNO | 43 |
| 3.5 | ASPECTOS DAS SIMULAÇÕES NO CLUSTER | 43 |
| 3.6 | MÉTODOS DE ANÁLISE DOS RESULTADOS | 44 |
| 3.7 | MÉTODO DE VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO | 46 |
| 3.7.1 | Verificação | 46 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.7.2 | Discretização e Estudos de Incerteza | 47 |
| 3.7.3 | Validação | 48 |
| 3.8 | SÍNTESE DAS ANÁLISES CONTEMPLADAS POR ESTE TEXTO | 49 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 50 |
| 4.1 | COLUNA FIXA COM SEÇÃO CIRCULAR | 50 |
| 4.1.1 | Verificação e Validação | 51 |
| 4.2 | COLUNA FIXA COM SEÇÃO QUADRADA | 55 |
| 4.3 | COLUNA FIXA COM SEÇÃO DIAMANTE | 56 |
| 4.4 | VIV COM 2 GDL PARA SEÇÃO CIRCULAR | 59 |
| 4.4.1 | Verificação e Validação | 62 |
| 4.4.2 | Variação da Velocidade Reduzida | 64 |
| 4.5 | VIV COM 2 GDL PARA SEÇÃO QUADRADA | 66 |
| 4.6 | VIV COM 2 GDL PARA SEÇÃO DIAMANTE | 68 |
| 4.7 | COMPARAÇÃO ENTRE COLUNAS FIXAS E EM VIV | 69 |
| 4.8 | ARRANJOS FIXOS COM 3 COLUNAS DE SEÇÃO CIRCULAR | 70 |
| 4.9 | ARRANJOS FIXOS COM 3 COLUNAS DE SEÇÃO QUADRADA | 86 |
| 4.10 | ARRANJOS FIXOS COM 3 COLUNAS DE SEÇÃO DIAMANTE | 93 |
| 4.11 | FORÇAS TOTAIS DOS DIFERENTES ARRANJOS | 103 |
| 5 | CONCLUSÕES | 107 |
| | REFERÊNCIAS | 111 |
| | APÊNDICE A - COLUNA FIXA COM SEÇÃO QUADRADA | 116 |
| | APÊNDICE B - VIV COM 2 GDL PARA SEÇÃO QUADRADA | 123 |
| | APÊNDICE C - TRANSFORMAÇÃO DA MALHA DO FLUENT PARA O OPENFOAM | 128 |

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico, novas estruturas marítimas foram criadas, como as plataformas offshore. A descoberta de grandes reservas de petróleo nas águas profundas, como é o caso do pré-sal brasileiro, desafia a tecnologia na construção e na operação de imensas estruturas no meio do mar. As plataformas podem ser definidas como construções navais utilizadas em alto mar para abrigar trabalhadores e máquinas utilizadas tanto para exploração como para produção de petróleo e/ou gás natural, podendo ser fixas no leito marinho ou flutuantes.

A história desses equipamentos remonta a 1947, quando as primeiras plataformas foram instaladas no Golfo do México. Hoje, estima-se que aproximadamente 7 850 plataformas de produção de petróleo e gás operem offshore em mais de 53 países ao redor do mundo (ÉPOCA NEGÓCIOS, 2014).

Além da aplicação no setor petrolífero, a busca mundial por fontes de energias renováveis, e o desenvolvimento da energia eólica, levou a recente instalação de usinas eólicas offshore. O aumento dessa energia offshore pode ser atribuído a uma série de fatores - incluindo a abundância de espaço e recursos eólicos maiores e consistentes em alto mar. Logo, intensificou-se as pesquisas na área offshore.

De acordo com Qiao et al. (2010) a instabilidade estrutural das plataformas aumenta em águas profundas e, neste contexto, surgiram as plataformas flutuantes, que são estruturas instaladas através de um sistema de ancoragem. Dentro do grupo de plataformas flutuantes estão as plataformas do tipo semissubmersíveis, as quais são compostas de uma estrutura de um ou mais conveses, apoiadas em flutuadores submersos (ISI ENGENHARIA, 2011). Semissubmersíveis operam em mar agitado, sofrem movimentações devido à ação das ondas, correntezas e ventos, com possibilidade de danificar equipamentos, como os de perfuração, por exemplo. Portanto, seu projeto requer conhecimentos de mecânica estrutural e hidrodinâmica para que ela fique posicionada na superfície do mar, dentro de um raio de tolerância ditado pelos equipamentos de subsuperfície.

A resposta dinâmica de uma plataforma semissubmersível sob condições de mar é uma das questões mais importantes na indústria offshore. Segundo Rosetti et al. (2016), observações de campo, testes de modelo e cálculos neste tipo de plataformas demonstraram que a complexa interação fluido-estrutura pode resultar em movimentos apreciáveis e aumento da fadiga da amarração e dos tirantes.

Estruturas imersas em fluidos estão sujeitas a movimentos induzidos pelo

próprio escoamento. Um desses casos é o fenômeno de desprendimento de vórtices que causa movimentação da estrutura, conhecido como *Vortex Induced Motion* (VIM), Movimento Induzido por Vórtices, sendo uma das causas de desgaste e fadiga. Quando a frequência de liberação de vórtices está próxima a frequência natural do sistema em águas calmas, o armazenamento da energia vibracional aumenta rapidamente, produzindo grandes amplitudes de oscilação (ZHAO et al., 2018).

Essas oscilações geram diversas situações de risco de acidentes em plataformas, devido às tensões nos componentes do sistema de ancoragem. À vista disso, um dos principais desafios é manter a estabilidade das plataformas independente da condição de mar (ESCOLA POLITÉCNICA, 2010), ou seja, diminuir ao máximo seus movimentos.

Testes com modelos tem sido utilizados por anos para o estudo e previsão de VIM de plataformas offshore, porém, são custosos e não conseguem reproduzir todas as semelhanças possíveis. O desenvolvimento computacional possibilitou a utilização de ferramentas numéricas para essa aplicação, proporcionando uma nova abordagem para a análise dos movimentos dessas estruturas.

De forma simplificada, pode-se analisar as colunas das plataformas offshore como um corpo isolado em um escoamento bidimensional. Desse modo, Lopes (2015) realizou o estudo numérico de VIM em um cilindro com 1 grau de liberdade (GDL) utilizando o OpenFOAM, Conceição (2016), Prasanth e Mittal (2008) e Zhou, So e Lam (1999) realizaram a simulação numérica com 2 GDL. Avaliando uma coluna com seção quadrada, os trabalhos de He, Zhou e Bao (2012) e Cui et al. (2015) estudaram diferentes direções de escoamento na condição fixa.

Considerando um conjunto de colunas, Zheng, Zhang e Lv (2016) e Bao, Zhou e Huang (2010) analisaram colunas circulares fixas com diferentes distâncias relativas. Zheng, Zhang e Lv (2016) simulou o escoamento em torno de três cilindros, de igual diâmetro, dispostos em um forma triangular para dois ângulos de incidência, $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$, com razões de espaçamento (S/L) variando de 1,5 a 7 para $Re = 100$ e 200. Bao, Zhou e Huang (2010) realizou as simulações para seis espaçamentos de 0,5 a 4,0, e para três ângulos de incidência. Recentemente, Rahman et al. (2019) realizou simulações numéricas em $Re = 150$ para o arranjo de colunas quadrada com os ângulos de incidência $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$.

Sob outra perspectiva, Rosetti et al. (2016), Zhao et al. (2018), Kim, Magee e Guan (2011), realizaram simulações de estruturas multicolunas tridimensionais, comparando seus resultados com dados experimentais.

Nesse cenário, este trabalho está inserido em um projeto de Iniciação Científica, com pesquisas colaborativas entre Brasil e Japão, no qual o propósito é o estudo de diferentes configurações de plataformas, a fim de identificar as características de escoamento que minimizam o VIM.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho possui como objetivo geral a análise do escoamento em torno das colunas de plataformas semissubmersíveis, avaliando seções circulares, quadradas e diamantes com diferentes direções de incidência do escoamento e distâncias relativas entre colunas.

1.2 Objetivos Específicos

No desenvolvimento deste objetivo, propõem-se como objetivos específicos:

- a. Compreender os fenômenos relacionados às forças e movimentos induzidos por vórtices em escoamentos laminares;
- b. Modelar as malhas com os diferentes formatos de seção a serem abordados;
- c. Investigar a convergência dos resultados realizando testes com diferentes incrementos de tempo e tamanhos de malha;
- d. Utilizar o programa de código aberto OpenFOAM para a resolução do sistema de equações através do método dos volumes finitos;
- e. Analisar os resultados obtidos buscando avaliar os coeficientes de arrasto e de sustentação e o deslocamento do corpo.

1.3 Estrutura do texto

O texto a seguir será estruturado da seguinte maneira: primeiramente será apresentada uma revisão bibliográfica do tema, expondo a teoria relacionada ao movimento induzido por vórtices, a descrição de variáveis importantes para a análise dos resultados, além da aplicação da dinâmica dos fluidos computacional e as equações que regem o movimento do sistema.

Após essa revisão bibliográfica, será apresentada a metodologia utilizada para a realização deste trabalho, contendo as ferramentas empregadas e as condições consideradas. Logo após, serão expostos os resultados obtidos juntamente com alguns resultados encontrados na literatura, os quais permitirão comparação e, em paralelo, serão apresentadas as discussões. Por fim, serão apontadas as conclusões.

1.4 Justificativa

Justifica-se este trabalho pela disponibilidade de um grande volume de pesquisas experimentais realizadas na área de plataformas offshore, principalmente para verificar desenhos e caracterizar a ocorrência de VIM.

Ademais, investigações utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional, têm se mostrado uma abordagem mais ajustável, permitindo uma melhor compreensão

da física em estudo, possibilitando investigar os efeitos de diferentes parâmetros sobre os movimentos de plataformas flutuantes. Dessa maneira, devido às diversas possibilidades de uso do CFD, pesquisas na utilização dessa ferramenta em comparação com dados experimentais precisam ser realizadas.

Ainda, as plataformas possuem valores de Re altíssimos, os quais não são viáveis para pesquisas iniciais de simulações numéricas, sendo primordial realizar estudos em números de Reynolds menores. Além disso, simulações bidimensionais em Re baixos representam bem as grandes escalas de vorticidade e possibilitam a investigação do Movimento Induzido por Vórtices. Nada obstante, para um arranjo mais promissor, é necessária a simulação em Re elevados e em escoamentos tridimensionais.

2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica, onde serão descritas as teorias, métodos e ferramentas que oferecem fundamentação e suporte para o presente trabalho. Primeiramente, pretende-se apresentar as plataformas do tipo semissubmersíveis e explicar o fenômeno do movimento induzido por vórtices. Em seguida serão expostos coeficientes e variáveis adimensionais importantes na caracterização do movimento. Na sequência, apresenta-se a teoria e aplicação do *Computer Fluid Dynamics* e suas equações governantes, além da teoria de verificação e validação aplicada à simulações computacionais.

2.1 PLATAFORMAS SEMISSUBMERSÍVEIS

Para viabilizar a extração e produção de petróleo e gás em águas profundas, foi necessário adaptar as tecnologias e os sistemas de produção já em uso, de até 400 metros de profundidade, para lâminas d'água mais altas. As unidades flutuantes foram a principal solução adotada para viabilizar tal tarefa.

Com o passar dos anos foram idealizados vários tipos de plataformas flutuantes, como as semissubmersíveis, as *Tension Leg Platform* (TLP), as do tipo “*Spar*” (*Classic, Truss, Cell*), os *Floating, Production, Storage and Offloading* (FPSOs) e as monocolunas. Tais plataformas permanecem conectadas ao fundo do mar através de estruturas esbeltas denominadas linhas de ancoragem. De acordo com Lacerda (2011), essas estruturas apresentam grandes deslocamentos quando submetidas às forças ambientais, o que passa a expor essas unidades ao fenômeno de VIM.

Devido a boa estabilidade hidrodinâmica em águas profundas e mais agitadas, as semissubmersíveis abriram um novo campo de operações, produção e desenvolvimento offshore. As plataformas do tipo semissubmersível são constituídas por conveses sustentados por colunas, que se apoiam em flutuadores submersos (*pontoons*) (MORAIS, 2013). Elas mantêm-se na localização através de linhas de ancoragem ou por posicionamento dinâmico.

O sistema de ancoragem é constituído de âncoras e cabos, atuando como molas que produzem esforços capazes de restaurar a posição do flutuante quando essa é modificada pela ação das ondas, ventos e correntezas (ISI ENGENHARIA, 2011). Esse sistema caracteriza-se por possuir baixa rigidez no sentido vertical, o que torna as plataformas mais sensíveis aos movimentos de afundamento (*heave*) (LACERDA,

2011).

Segundo (MORAIS, 2013, p. 100)

Para uma dada condição meteo-oceanográfica, em combinação com os adotados tipos de amarração e de ancoragem para uma particular plataforma, resulta o raio de ancoragem e a área de liberdade passeio horizontal (na superfície).

O VIM da unidade flutuante é caracterizado pelo desprendimento de vórtices que ocorre em cada coluna (GONÇALVES et al., 2011). Conforme Fujarra et al. (2012, p.12, tradução nossa), nas plataformas semisubmersíveis, "pode-se esperar um comportamento dinâmico consideravelmente mais complexo como resultado das interações entre as ondas vindas das múltiplas colunas".

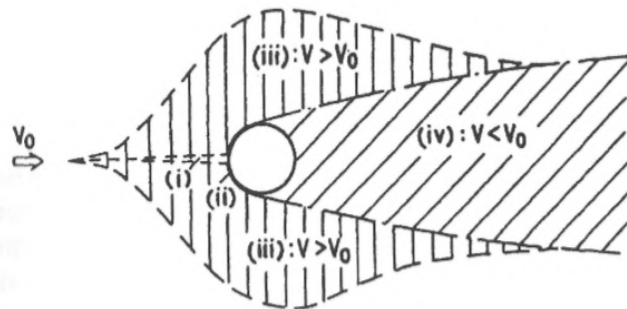
2.2 ESCOAMENTO AO REDOR DE COLUNAS

O escoamento ao redor de corpos é caracterizado por uma região de escoamento perturbado atrás do corpo, chamada de esteira. Nessa região, várias formas de instabilidade podem existir. A instabilidade mais conhecida é a que leva ao desenvolvimento periódico de vórtices chamada de esteira de von Kármán (CONCEIÇÃO, 2016), na qual ocorre um padrão regular de vórtices que movem-se alternadamente em sentido horário e anti-horário.

Nas regiões perturbadas ocorre a variação da magnitude, direção e tempo da velocidade. A Figura 1 ilustra as diferentes regiões perturbadas do escoamento, sendo elas:

- (i) região estreita de fluxo retardado;
- (ii) camada limite ligada à superfície do cilindro;
- (iii) regiões laterais de escoamento deslocado e acelerado;
- (iv) ampla região a jusante do escoamento separado, esteira.

Figura 1 – Regiões de escoamento perturbado.



Fonte: ZDRAVKOVICH, 1997 apud (CONCEIÇÃO, 2016, p.6).

O número de Reynolds (Re) tem grande influência na maneira como o escoamento se comporta nas proximidades do corpo imerso, sendo definido em termos da velocidade do escoamento incidente, U , do comprimento característico do corpo, D , e da viscosidade cinemática do fluido, ν , conforme a Equação 1.

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

O número de Reynolds pode ser interpretado como uma razão entre as forças inerciais e as forças viscosas (friccionais) do fluido.

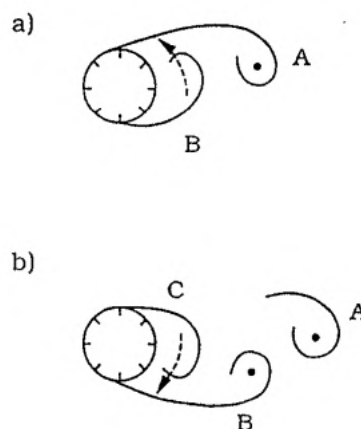
2.3 EMISSÃO DE VÓRTICES

A passagem de um fluido por um corpo forma uma camada limite junto ao mesmo. Considera-se que dentro desta camada existe atrito entre o fluido e a parede, e as partículas de fluido nesta região estão sob a influência de um campo de pressões externo (LOPES, 2015).

Ao longo da camada limite há uma perda de energia cinética devido ao atrito. Logo, a partícula fluida não tem energia suficiente para suportar o acréscimo de pressão, surgindo assim um movimento contrário à passagem do fluido, que causa o descolamento da camada limite e o desprendimento de vórtices.

Segundo Gerrard (1966), o fluido é atraído pela esteira através da ação do vórtice crescente do outro lado. Surge então um cisalhamento que interrompe a formação do vórtice. Pode-se observar na Figura 2 que em a) o vórtice B é atraído através da esteira cortando o vórtice A e em b) após o desprendimento do vórtice B, o vórtice C é igualmente atraído.

Figura 2 – Desprendimento e atração dos vórtices.

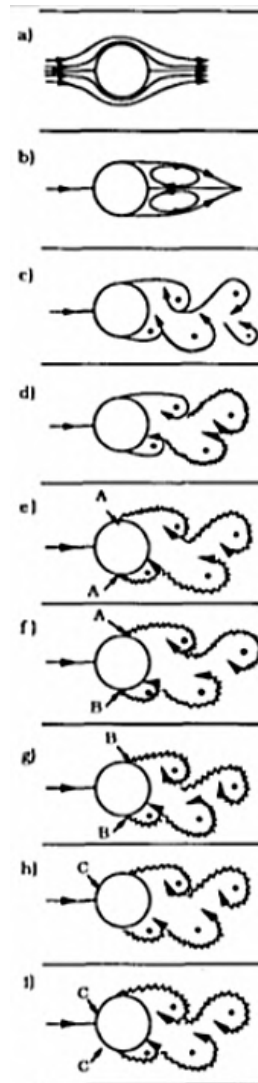


Fonte: FREDSOE; SUMER, 1997 apud (RIBEIRO, 2002, p.8).

O escoamento experimenta mudanças com a variação do número de Reynolds,

assim, mudam-se os padrões do desprendimento de vórtices na esteira. A Figura 3, de Sumer et al. (2006), resume os principais regimes de desprendimento de vórtices para um cilindro liso em função do número de Reynolds.

Figura 3 – Regimes de desprendimento de vórtices para um cilindro liso em função do número de Reynolds.



Fonte: (SUMER et al., 2006).

De acordo com a figura, tem-se:

- a. $Re < 5$: Nesta faixa de Re não há separação e o escoamento é laminar;
- b. $5 < Re < 40$: Um par de vórtices simétricos se forma;
- c. $40 < Re < 200$: Nesta faixa ocorre a Emissão de Vórtices (*Vortex Shedding*), a esteira se torna transiente e os vórtices são emitidos em uma determinada frequência. A emissão de vórtices na esteira é laminar;
- d. $200 < Re < 300$: A esteira começa a passar do regime laminar para o turbulento;
- e. $300 < Re < 3 \times 10^5$: Nesta região a esteira é completamente turbulenta, a camada limite sobre o cilindro ainda é laminar;

- f. $3 \times 10^5 < Re < 3,5 \times 10^5$: Com o aumento do Re a transição da turbulência começa a ocorrer no ponto de separação da camada limite. Nesta faixa de Re , um ponto de separação da camada limite é laminar e o outro ponto é turbulento;
- g. $3,5 \times 10^5 < Re < 1,5 \times 10^6$: Os dois pontos de separação são turbulentos, mas a transição para o regime turbulento na camada limite está entre o ponto de estagnação e o ponto de separação;
- h. $1,5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$: Nesta região a camada limite é totalmente turbulenta em um lado do cilindro enquanto o outro lado permanece parte laminar e parte turbulento;
- i. $Re > 4 \times 10^6$: A camada limite dos dois lados do cilindro são completamente turbulentas.

2.4 MOVIMENTO INDUZIDO POR VÓRTICES

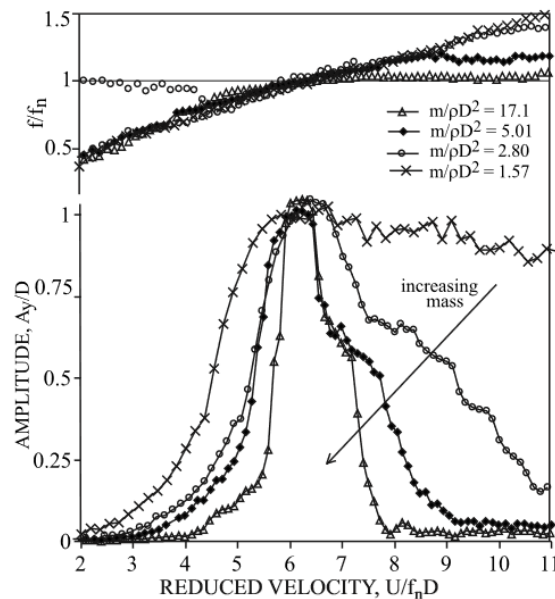
O fenômeno de desprendimento de vórtices promove forças no corpo imerso. Se o corpo estiver livre para oscilar, essas forças causam vibração. "No caso das grandes estruturas, como as plataformas, que podem ter até 100 m de diâmetro, este fenômeno é conhecido como *Vortex Induced Motions* (VIM) - Movimento Induzido por Vórtices" (FUJARRA et al., 2012). O VIM é um fenômeno que pode ocorrer em plataformas flutuantes quando expostas a uma correnteza. Ele é similar ao *Vortex Induced Vibrations* (VIV) – Vibrações Induzidas por Vórtices, observado em estruturas esbeltas (dutos, *risers* e linhas de ancoragem) que vem sendo amplamente estudados pela indústria offshore (LACERDA, 2011).

As principais diferenças entre VIV e VIM está na escala do problema e nas condições de fixação das estruturas (FUJARRA et al., 2012). Grandes estruturas, de grande massa e menor comprimento, são ancoradas, facilitando a indução de movimento lateral devido às forças geradas pelos vórtices. Como essas possuem um diâmetro hidrodinâmico e uma massa muito grande, os períodos de vibração são maiores. Portanto, neste texto, ao serem mencionados VIV ou VIM, ambos se referem ao mesmo fenômeno de movimentação induzida por vórtices.

Nesse contexto, como efeito do equilíbrio entre a energia fornecida pelo escoamento e a energia dissipada por amortecimento atuando sobre o sistema, uma oscilação autolimitada de amplitude próxima à dimensão da seção transversal é desencadeada pela frequência de desprendimento de vórtices (FUJARRA et al., 2012).

Quando a frequência de desprendimento de vórtices está próxima da frequência natural da estrutura, ocorre um fenômeno denominado *lock-in*. Nessa situação, os deslocamentos são amplificados. A Figura 4 mostra o fenômeno de *lock-in* para um cilindro ensaiado por Blevins e Coughran (2009) com 4 razões de massa ($m/\rho D^2$).

Figura 4 – Amplitude transversal de um cilindro em função da velocidade reduzida, para 4 razões de massa.



Fonte: Blevins e Coughran (2009).

É possível observar que a amplitude transversal (A_y/D) começa a aumentar na velocidade reduzida ($U/f_n D$) de aproximadamente 4, como consequência da sincronização, $f_y(ou f) \approx f_n \approx f_s$, onde f_y , f_n e f_s são as frequências de movimento transversal, natural da estrutura e da emissão de vórtices, respectivamente.

2.5 COEFICIENTES DE ARRASTO E SUSTENTAÇÃO

Qualquer corpo imerso em um escoamento está sujeito à ação de forças e momentos vindo do fluido (WHITE, 2011). Forças de pressão normais à superfície do corpo e forças tangenciais de cisalhamento (devido à condição de não-escorregamento) são exercidas pelo fluido (CENGEL; CIMBALA, 2015). Desse modo, a força de arrasto (F_D) é formada pelas componentes de pressão e de cisalhamento na parede, na direção do escoamento. As componentes na direção normal constituem a força de sustentação (F_L).

Para os escoamentos bidimensionais essas são as duas forças que atuam no corpo (CENGEL; CIMBALA, 2015). Usualmente, os dados necessários para análise são as forças resultantes sobre o corpo. Elas dependem da densidade do fluido, ρ , da velocidade a montante, U , do tamanho e orientação do corpo. Essas características são tratadas através do coeficiente de arrasto (C_D), Equação 2, e do coeficiente de sustentação (C_L), Equação 3.

$$C_D = \frac{F_D}{0,5\rho U^2 A} \quad (2)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0,5\rho U^2 A} \quad (3)$$

onde A é a área projetada do corpo e o termo $0,5\rho U^2$ é a pressão dinâmica.

2.6 VARIÁVEIS ADIMENSIONAIS IMPORTANTES

As variáveis adimensionais possuem significado físico que caracteriza determinadas propriedades do sistema, as quais auxiliam nas análises do escoamento e dos resultados do movimento do corpo.

O número de Strouhal (St) relaciona o tempo característico com o período de oscilação. Ele é definido conforme (CENGEL; CIMBALA, 2015),

$$St = \frac{f_s D}{U} \quad (4)$$

onde D é o comprimento característico do corpo, U é a velocidade livre do escoamento e f_s é a frequência de emissão de vórtices de von Kármán.

Outro parâmetro importante é a razão de massa (m^*), a qual é a razão entre a massa da estrutura (m_{est}) e a massa de fluido deslocada pelo corpo (m_f), como pode ser visto na Equação 5.

$$m^* = \frac{m_{est}}{m_f} \quad (5)$$

A velocidade reduzida (V_r) é definida como razão entre a velocidade do escoamento pelo produto entre a frequência natural do sistema e a dimensão característica do corpo, Equação 6.

$$V_r = \frac{U}{f_n D} \quad (6)$$

A amplitude característica é a máxima amplitude de deslocamento transversal do corpo (Y_{max}) sobre seu comprimento característico, Equação 7.

$$A_y = \frac{Y_{max}}{D} \quad (7)$$

Para o deslocamento do corpo na direção do escoamento, utiliza-se o valor quadrático médio (X_{rms}) sobre seu comprimento característico, Equação 8.

$$A_x = \frac{X_{rms}}{D} \quad (8)$$

2.7 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), a Dinâmica dos Fluidos Computacional, do inglês *Computer Fluid Dynamics* (CFD), pode ser descrita como

a análise de sistemas que envolvem escoamento de fluido, transferência de calor e fenômenos associados, por meio de simulação computacional.

Basicamente, obtém-se as distribuições de velocidades, pressões e temperaturas na região do escoamento (FORTUNA, 2000), cabendo ao engenheiro analisar esses dados para aprimorar o projeto.

Segundo Cengel e Cimbala (2015) no estado atual da dinâmica dos fluidos computacional, CFD pode lidar com escoamentos laminares com facilidade, mas é impossível solucionar os escoamentos turbulentos sem recorrer aos modelos de turbulência. Dessa maneira, técnicas computacionais, métodos experimentais e análises teóricas se complementam durante o projeto para comparação e validação de resultados.

Os códigos CFD contêm três elementos principais (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007):

- Pré-processamento: no qual ocorre a entrada de dados do problema. Esses dados envolvem a definição do domínio computacional, a geração da malha, a seleção dos fenômenos que precisam ser modelados, as propriedades do fluido, e a especificação de condições de contorno;
- Solver: solução computacional das equações que regem o problema;
- Pós-processamento: exame dos resultados, visualização dos dados, geração de gráficos e demais recursos que dependem do programa utilizado;

CFD trata da obtenção de soluções numéricas para sistemas de Equações Diferenciais Parciais (EDPs). Assim, a solução de um sistema de EDPs implica na obtenção de valores de uma variável em cada ponto do domínio computacional. Existem diferentes métodos de discretização das EDPs, entre eles o Método das Diferenças Finitas, o Método dos Elementos Finitos e o Método dos Volumes Finitos.

A dinâmica dos fluidos computacional no domínio tridimensional (3D) requer grande poder computacional. Portanto, antes de realizar essas simulações, as simulações bidimensionais (2D) são importantes para investigar características numéricas e a confiabilidade do código.

2.7.1 Malha e Incremento de Tempo

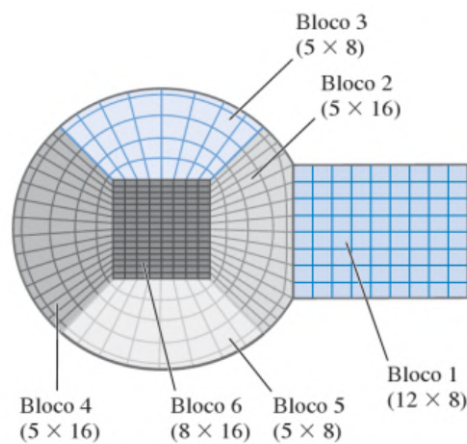
O esquema de solução CFD exige a geração de uma malha, a qual é a divisão do domínio computacional em volumes de controle discretos. "A distribuição adequada dos pontos no domínio é fundamental para se obter uma solução numérica representativa do escoamento"(FORTUNA, 2000, p.36).

De acordo com Cengel e Cimbala (2015) a malha pode ser estruturada ou não. Em uma malha estruturada, a numeração de um volume é consecutivo ao seu vizinho e sua localização é facilmente encontrada quando seus vizinhos são conhecidos.

Sendo assim, os nós da malha podem ser mapeados em uma matriz. Já na malha não estruturada, os volumes de controle podem ter qualquer formato e não há restrições quanto ao número de células adjacentes. Pode ainda haver a utilização de células estruturadas e não-estruturadas no mesmo domínio, caracterizando uma malha híbrida.

Ao se utilizar malhas estruturadas em geometrias complexas são necessárias malhas multiblocos, Figura 5, que consistem na divisão do domínio em blocos com diferentes números de células e refinamentos, sendo que o tamanho da célula não pode variar bruscamente em nenhuma direção.

Figura 5 – Exemplo de malha multiblocos com domínio bidimensional.



Fonte: Cengel e Cimbala (2015).

Outro aspecto importante na geração da malha é o refino próximo a região de parede. A parede é uma região de gradientes elevados, pois devido a sua condição de não escorregamento provoca a transição da velocidade zero, na sua superfície, até a velocidade do escoamento livre. Esta região pode ser dividida em três camadas. A camada mais interna, viscosa, a camada mais externa, turbulenta, e a camada intermediária onde os dois comportamentos ocorrem. O parâmetro y^+ , Equação 9, classifica em qual das camadas a célula se encontra (CENGEL; CIMBALA, 2015).

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \quad (9)$$

onde y é a altura do centro da célula em relação à parede, μ é a viscosidade e u_τ é a velocidade de fricção, definida por:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (10)$$

sendo τ_w a tensão de cisalhamento na parede.

O valor y^+ deve ser menor que 1 na região da parede, indicando que o escoamento próximo a parede é laminar e para que funções de parede (uma

aproximação do escoamento utilizando modelos totalmente turbulentos) não precisem ser utilizadas (PAS, 2016).

Para regimes transientes, no qual as propriedades variam com o tempo, é necessário utilizar uma variável de tempo, conhecida como incremento de tempo Δt , em inglês *time step*. Esse valor é o intervalo de tempo entre cada iteração numérica.

Assim, tendo as definições de incremento de tempo e discretização da malha, Anderson e Wendt (1995) relacionam estas variáveis no chamado número de Courant dado pela Equação 11.

$$C = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (11)$$

onde c é a magnitude de velocidade através de uma célula, Δt é o incremento de tempo e Δx é o tamanho da menor célula. C próximo de 1 indica melhor estabilidade numérica. $C > 1$ indica que o fluido percorre mais de uma célula por iteração. Portanto, C deve ser mantido menor do que a unidade.

2.7.2 Condições de Contorno

O tipo de escoamento modelado dependerá das condições de contorno utilizadas na modelagem do problema.

A condição de contorno de parede impõe que o fluido não pode atravessar a parede, sendo que a componente normal da velocidade é nula nessa região. Com a condição de não escorregamento, a componente tangencial também é nula (CENGEL; CIMBALA, 2015).

A condição de contorno de escoamento de entrada e de saída, pode ser especificada por velocidade ou por pressão. Porém, pressão e velocidade não podem ser estabelecidas juntas, pois levam a um excesso de especificações matemáticas. Numa condição de saída de escoamento, os gradientes de velocidade e pressão são nulos na direção normal à aresta (no caso 2D) de saída.

Existem outras condições de contorno, como a periódica, que produz propriedades idênticas em geometrias repetitivas, e a condição de contorno de simetria, na qual os gradientes das variáveis são nulos na aresta de simetria.

Quando um modelo de turbulência é usado e/ou a equação de energia está sendo resolvida, outros parâmetros devem também ser especificados nas condições de contorno (CENGEL; CIMBALA, 2015), o que foge ao escopo desse trabalho.

2.8 EQUAÇÕES GOVERNANTES

2.8.1 Equações do Movimento

Para um escoamento incompressível, laminar em regime permanente, sem efeitos de superfície livre e newtoniano, as equações de movimento são a Equação da Continuidade, Equação 12, e a de Navier-Stokes, Equação 13 (CENGEL; CIMBALA, 2015).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad (12)$$

$$(\vec{U} \cdot \vec{\nabla}) \vec{U} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P + \nu \nabla^2 \vec{U} \quad (13)$$

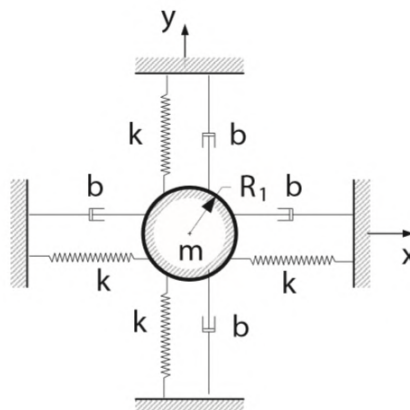
onde \vec{U} é a velocidade do fluido, ρ é a densidade, P é a pressão e ν é a viscosidade cinemática.

Quando resolvido, o conjunto de equações diferenciais fornece detalhes de velocidade, pressão, massa específica, entre outras propriedades, em cada ponto de todo o domínio do escoamento.

2.8.2 Equações de Vibração da Coluna com 2 GDL

Assumindo o movimento restrito ao plano xy de uma coluna imersa no fluido, com translações nas direções x e y, a coluna pode ser modelada como um sistema massa-mola-amortecedor, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Diagrama esquemático de um sistema com massa-mola-amortecedor com 2GDL.



Fonte: Adaptado de (DOROGI; BARANYI, 2018).

Para o sistema com dois graus de liberdade (GDL), as equações adimensionais que determinam os deslocamentos do corpo nas direções dos eixos x e y são (KHALAK;

WILLIAMSON, 1999):

$$A_x/D = \frac{C_D \text{sen}(\theta_x)}{4\pi^3(m^* + C_A)\zeta} \left(\frac{V_r}{2f_x^*}\right)^2 2f_x^* \quad (14)$$

$$A_y/D = \frac{C_L \text{sen}(\theta_y)}{4\pi^3(m^* + C_A)\zeta} \left(\frac{V_r}{2f_y^*}\right)^2 2f_y^* \quad (15)$$

onde $f_x^* = f_x/f_n$; $f_y^* = f_y/f_n$; C_A é o coeficiente de massa adicional; m^* é a razão de massa; V_r a velocidade reduzida; $\zeta = \frac{b}{2\sqrt{k(m+m_A)}}$ é o fator de amortecimento da estrutura e; C_D e C_L são os coeficientes de arrasto e sustentação, respectivamente.

2.9 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO (V&V)

Problemas podem ser resolvidos de maneira experimental, analítica e numérica. Os erros envolvidos nestes métodos, são erros experimentais, erros de modelagem numérica e erros numéricos, Figura 7.

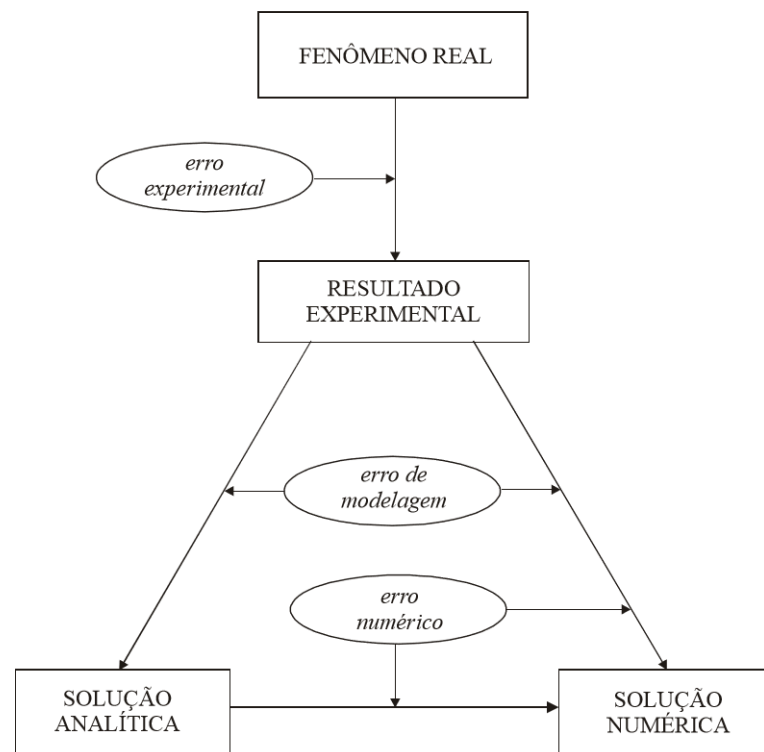
O erro experimental é a diferença entre o valor esperado de uma variável de interesse e o seu resultado experimental, o qual advém de dificuldades na definição de parâmetros, equipamentos, entre outros. O erro de modelagem é a diferença entre o valor esperado e a sua solução analítica ou solução numérica (sem erros), esse erro é causado principalmente por simplificações de modelagem. O erro numérico é a diferença entre o valor numérico de uma variável de interesse e a sua solução numérica, causado principalmente por erros de truncamento, de iteração e de programação (MARCHI et al., 2001).

A credibilidade das simulações deve ser estabelecida com verificação e validação (V&V), que são atividades distintas.

A verificação é um exercício puramente matemático que consiste em duas partes: (1) verificação do código, a qual pretende demonstrar pela avaliação do erro a exatidão do código que contém o algoritmo para resolver um dado modelo matemático e (2), a verificação de solução, tentando estimar o erro/incerteza de uma dada solução numérica, para a qual, em geral, a solução é desconhecida. "Indiscutivelmente, a mais importante atividade de verificação de solução é a realização de um estudo de convergência de malha e tempo"(THACKER et al., 2004, p.18, tradução nossa).

A validação é uma atividade de ciência e engenharia destinada a mostrar que o modelo selecionado é uma boa representação da "realidade", comparando os resultados numéricos com dados experimentais. Isso significa que a verificação lida com erros numéricos (e codificação), enquanto a validação está relacionada a erros de modelagem (ROSETTI; VAZ; FUJARRA, 2012).

Figura 7 – Erros dos métodos de solução de problemas.



Fonte:(MARCHI et al., 2001)

3 METODOLOGIA

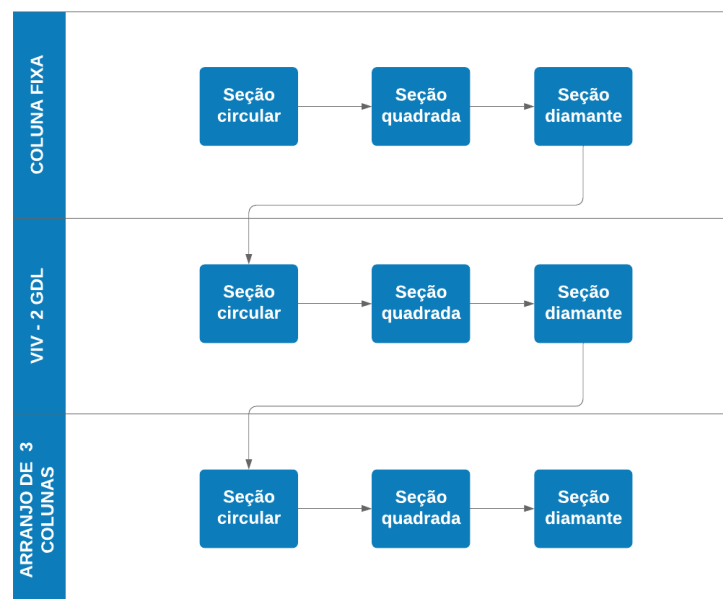
A metodologia de um trabalho consiste no procedimento para a realização de um objetivo, explicando cada etapa. Este estudo aborda uma metodologia numérico-experimental, onde serão conduzidas simulações CFD e seus resultados serão comparados com dados experimentais e numéricos de outros autores.

Neste capítulo, serão primeiramente apresentados os casos a serem abordados. A seguir, serão brevemente descritos a ferramenta utilizada para as simulações, o procedimento seguido para a construção da malha computacional e as condições de contorno assumidas. Finalmente, é descrito como serão analisados os resultados e o método para verificação e validação utilizado.

3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Nesta seção serão descritos os casos a serem analisados pelo estudo, os quais seguirão a ordem do fluxograma apresentado abaixo.

Figura 8 – Fluxograma das simulações.



Fonte: Autora (2019).

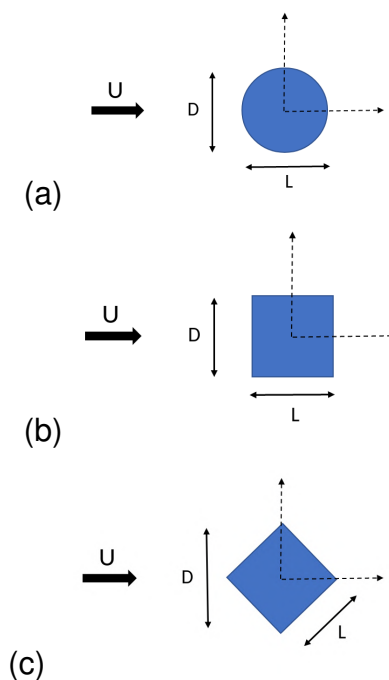
3.1.1 Coluna Fixa

Primeiramente será realizada a simulação numérica de um cilindro fixo, para o qual já se tem resultados tanto numéricos, experimentais como teóricos bem descritos na literatura, o que possibilita a etapa de validação do modelo numérico.

Será feito também o estudo de convergência de malha e incremento de tempo, para que seja possível o processo de verificação.

Após, será simulada uma coluna com seção quadrada com direção de incidência do escoamento de 0° e 45° , sendo esse último também conhecido como seção diamante. A Figura 9 mostra um esquema dos modelos a serem analisados, onde o comprimento característico, D , é a dimensão vista pelo escoamento com velocidade U e L é a largura da coluna.

Figura 9 – Modelos de estudo: a) seção circular; b) seção quadrada e c) seção diamante.



Fonte: Autora (2019).

3.1.2 Coluna com 2 GDL

Tendo concluído os estudos da coluna fixa, serão utilizadas as mesmas seções transversais para a realização da simulação do sistema com 2 graus de liberdade.

Para comparar os presentes resultados com aqueles de Prasanth e Mittal (2008), o número de Reynolds, a razão de massa e o fator de amortecimento usados nas simulações são $Re = 100$, $m^* = 10$, e $\zeta = 0$, respectivamente. A velocidade reduzida é escolhida de modo que $Re/St = 16,6$ a qual, segundo Prasanth e Mittal (2008), leva a razão entre frequência natural e frequência de emissão de vórtices ao valor de 1

$(f_n/f_s = 1)$.

A coluna é montada em suportes elásticos e é livre para sofrer vibrações transversais e longitudinais ao escoamento. As molas nas direções transversal e longitudinal são consideradas idênticas e com um comportamento linear. A rigidez das molas é calculada com base na frequência natural de vibração do corpo:

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (16)$$

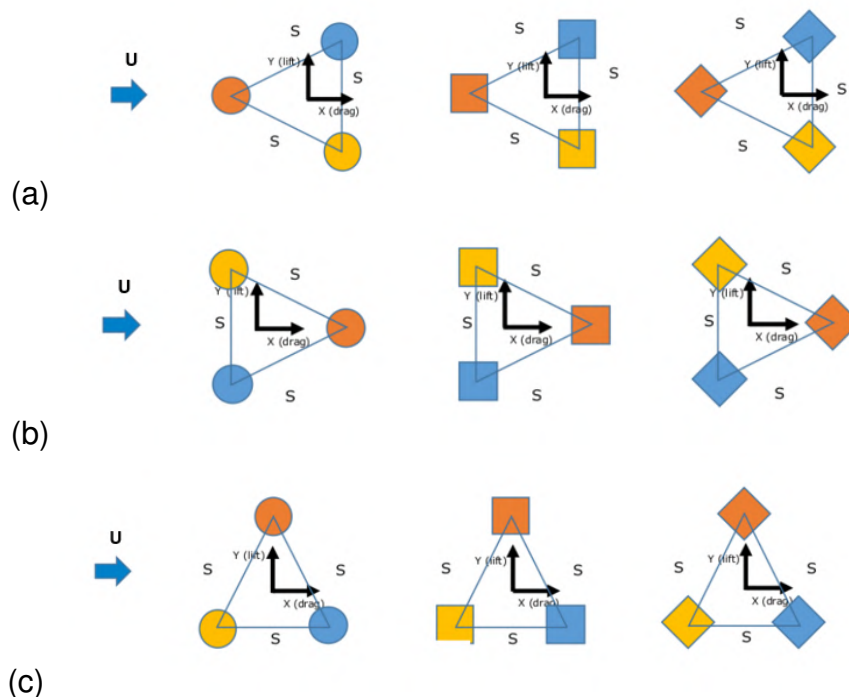
onde f_n é a frequência natural do sistema, k é a rigidez da mola e M é a massa equivalente do sistema, calculada pela massa da estrutura mais a massa adicional.

As molas são fixadas no centro do sistema de coordenadas e é imposta uma deformação inicial nas mesmas. O fator de amortecimento estrutural é desconsiderado e o amortecimento fluido é ponderado dentro das forças de arrasto e de sustentação.

3.1.3 Arranjo Fixo

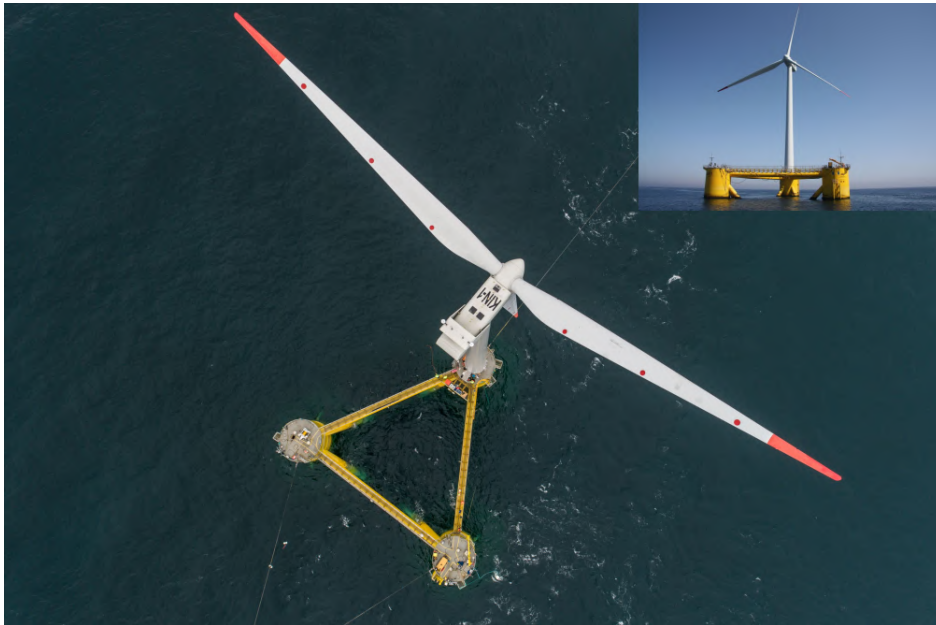
Após o fechamento das simulações de uma coluna isolada, foram conduzidas as simulações para arranjos com 3 colunas, Figura 10, com os ângulos de incidência de escoamento de (a) $\alpha = 0^\circ$, (b) $\alpha = 180^\circ$ e (c) $\alpha = 90^\circ$. Para cada configuração serão utilizados três distâncias relativas entre colunas (S), sendo $S/L = 2, 3$ e 4 , onde L é a largura da coluna. A Figura 11 exemplifica uma aplicação desse tipo de arranjo em uma instalação de turbina eólica offshore.

Figura 10 – Modelos dos arranjos de 3 colunas.



Fonte: Autora (2019).

Figura 11 – Exemplo de estrutura com 3 colunas.



Fonte: (WINDCRETE, 2019).

3.2 MÉTODOS NUMÉRICOS NO OPENFOAM

O programa utilizado para realizar as simulações do presente trabalho é o OpenFOAM, o qual faz uso do Método dos Volumes Finitos (MVF). Esse método realiza a integração das equações governantes sobre todos os volumes de controle do domínio. Em seguida, de acordo com (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007, p.3, tradução nossa), "é feita a discretização - conversão das equações integrais resultantes em um sistema de equações algébricas e, então, é realizada a solução do equações algébricas por um método iterativo". A integração do volume de controle distingue o MVF de todas as outras técnicas de CFD pois as declarações resultantes expressam a conservação de propriedades relevantes para cada célula.

O OpenFOAM apresenta uma arquitetura composta basicamente por três pastas: *0*, *constant* e *system*. A pasta *0* contém os arquivos com as informações das condições de entrada e de contorno. A pasta *constant* possui as informações de malha e características do fluido utilizado. A pasta *system* engloba os arquivos que controlam o tempo de simulação, os esquemas numéricos e algoritmos de resolução.

Para o escoamento laminar em regime transiente com coluna fixa será utilizado o algoritmo *pisoFoam* e para 2 GDL o algoritmo *pimpleDyMFoam*. Estes algoritmos são implementados no OpenFOAM v5.0.

Neste trabalho, o valor de Re é 100, portanto, encontra-se na faixa de emissão de vórtices em esteira laminar, e não será necessário a adoção de modelos de turbulência.

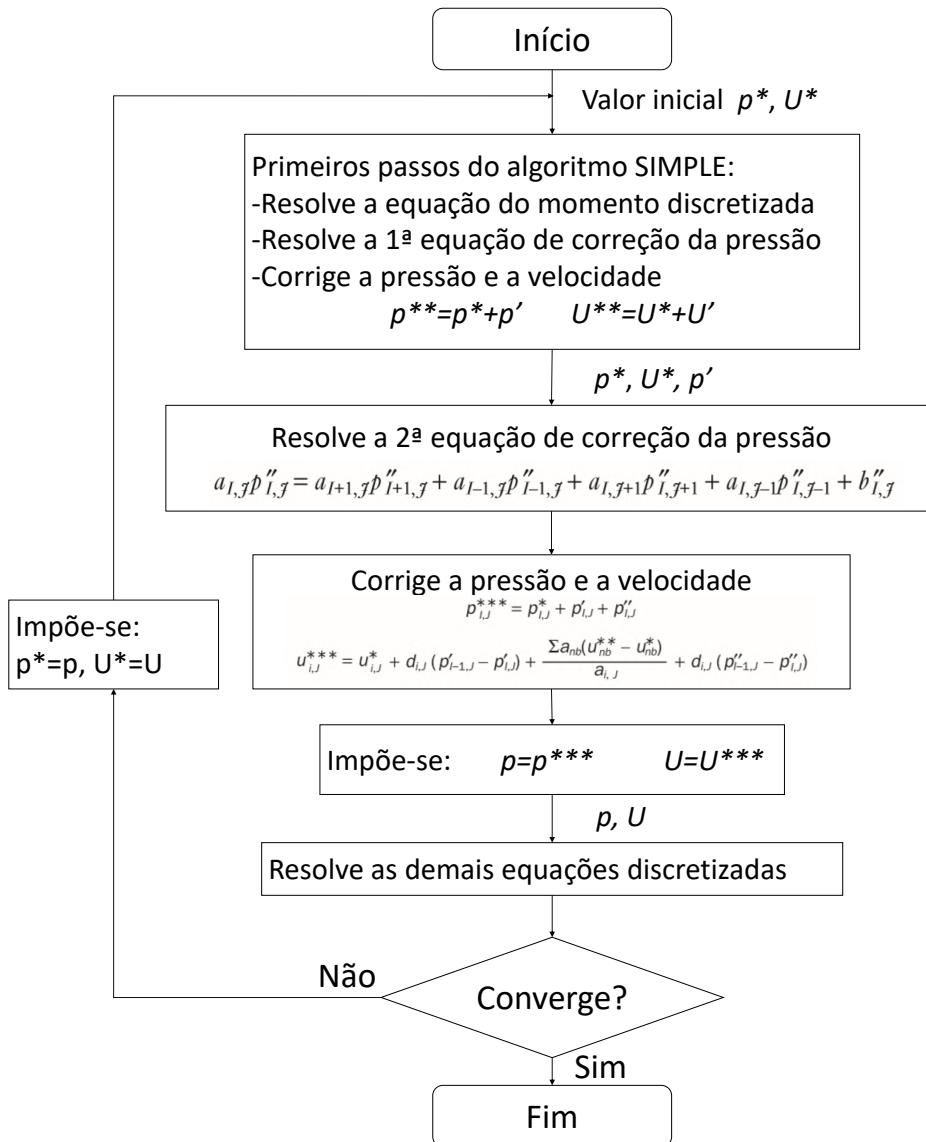
3.2.1 Piso

O *pisoFoam* é a implementação do algoritmo PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operator* - Pressão Implícita com Divisão do Operador), o qual é um procedimento de cálculo de pressão-velocidade para as equações de Navier-Stokes desenvolvido originalmente para computação não iterativa de escoamento não transiente e não compressível, mas foi adaptado com sucesso para problemas transientes (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). O PISO envolve um passo de valor inicial e dois, ou mais, passos corretores.

Ele é indicado para problemas de escoamento incompressível e transiente. Diversos modelos de turbulência podem ser escolhidos, isto é, RAS (*Reynolds-averaged simulation*, Simulação das Médias de Reynolds) ou LES (*Large Eddy Simulation*, Simulação de Grandes Escalas), ou laminar (que não usa modelos de turbulência) podem ser selecionados.

Os dados de entrada exigidos são a pressão cinemática p , em m^2/s^2 , e a velocidade do escoamento U , em m/s . O fluxograma a seguir mostra as etapas de solução utilizando o algoritmo PISO.

Figura 12 – Fluxograma do algoritmo PISO.



Fonte: Adaptado de (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

3.2.2 Pimple

O *pimpleDyMFoam* é uma implementação do algoritmo PIMPLE que permite malhas dinâmicas. Com o PIMPLE, o solver é transiente, permitindo incrementos de tempo relativamente grandes devido ao algoritmo híbrido PISO-SIMPLE, o qual é fusão dos solvers PISO e SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations - Método Semi-Implicito para Equações de Pressão*).

O PIMPLE é, simplificada, um algoritmo SIMPLE para cada incremento de tempo, onde os corretores externos são as iterações e, uma vez que houver a convergência, passa-se para o próximo incremento de tempo até que a solução seja concluída. O critério para a convergência no incremento de tempo é definido como

a tolerância absoluta do solver, sendo nesse caso 1×10^{-7} . O número de iterações também é escolhido, sendo 15 correções (se o número de correções fosse 1 o algoritmo agiria de maneira igual ao PISO).

Como foi dito anteriormente, o *pimpleDyMFoam* é utilizado para malhas móveis, úteis em casos com grau de liberdade, e nessa situação é necessário definir também outros parâmetros: a massa do corpo, seu momento de inércia, a rigidez e o comprimento das molas e o fator de amortecimento, os quais são impostos ao diretório *dynamicMeshDict*. O tipo de movimento utilizado é o *dynamicMotionSolveFvMesh*, o qual é baseado no movimento de malha resolvido para o movimento de corpo rígido. Esse solucionador transforma a malha em torno de um conjunto especificado de limites. O movimento da malha é calculado com base nas pressões nesses limites. Por sua vez, o *dynamicMotionSolverFvMesh* altera as condições de contorno de velocidade nos limites para especificar a velocidade local do corpo definido.

3.2.3 Esquemas de discretização

Os termos da primeira derivada temporal ($\frac{\partial}{\partial t}$) são especificados no subdiretório *ddtSchemes*. O esquema de discretização utilizado nesse caso é o *Backward*, sendo que esse soluciona equações implícitas de segunda ordem com escoamento em regime transiente e potencialmente ilimitado.

O subdiretório *gradSchemes* contém termos de gradiente. O esquema de discretização usado é o padrão: *Gauss linear*, ou seja, interpolação linear.

O subdiretório *divSchemes* contém termos divergentes, ou seja, termos da forma ∇ , excluindo termos laplacianos. Aqui também é utilizado o *Gauss linear*.

3.3 GERAÇÃO DA MALHA

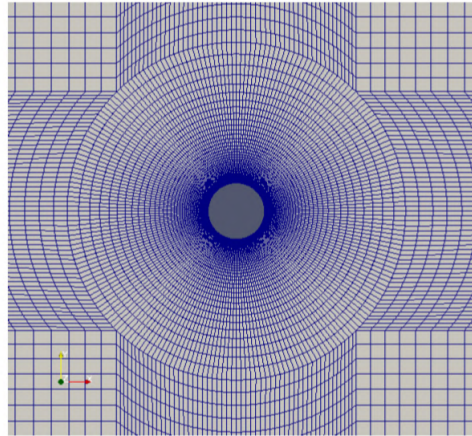
Para as simulações de uma coluna isolada, a malha é feita usando a função *blockmesh*, disponível no OpenFOAM, no qual a malha estruturada é construída através de um conjunto de blocos hexaédricos.

Primeiramente, o domínio computacional deve ser determinado. Nesse caso, os limites do domínio devem ser colocados longe da região de interesse para que os limites não afetem o escoamento sobre o cilindro. Ao mesmo tempo, é interessante manter o domínio computacional o menor possível, pois o custo computacional aumenta com o tamanho da malha.

Assim, para uma coluna isolada, o domínio computacional possui um comprimento de $30L$ (sendo L o comprimento característico do corpo) e uma altura de $20L$. O corpo é posicionado a $10L$ da entrada do escoamento, no meio das fronteiras superior e inferior. A largura frontal do modelo sobre a largura do domínio computacional (transversal ao escoamento) é chamada de blocagem (B), neste caso $B = 0,05$ ou 5%.

As arestas de cada bloco são inseridas como coordenadas cartesianas, em cada bloco define-se um número de células e uma taxa de refinamento (relação entre o comprimento da primeira e da última célula) em cada direção. A Figura 13 mostra a malha próximo ao corpo.

Figura 13 – Malha próxima ao cilindro.

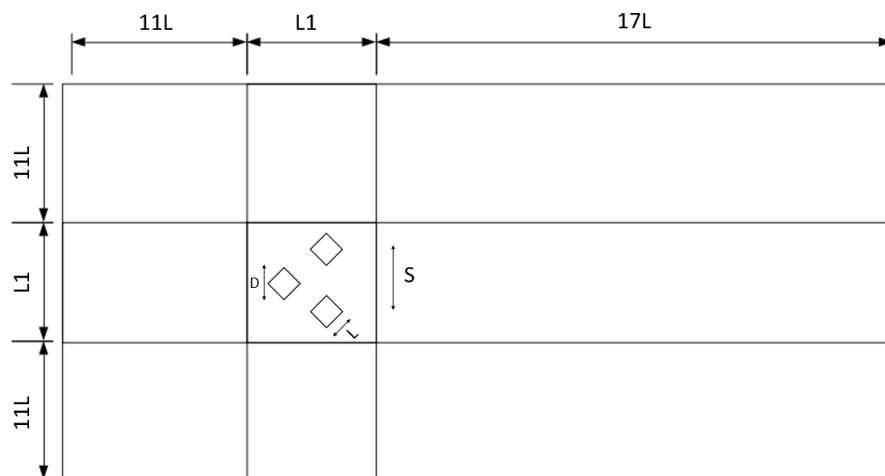


Fonte: Autora (2019).

Já para os casos de conjunto de colunas, a geração da malha no *blockmesh* é complexa. Desse modo, o programa Ansys foi utilizado para a confecção das mesmas.

O domínio computacional é desenhado de maneira a conter um quadrado interno que abrange o arranjo, com largura de $L_1 = 2L + S$, onde L é a largura da coluna, desse modo, a largura externa do domínio é $22L + L_1$ e comprimento $28L + L_1$, onde S é o espaçamento entre os centros das colunas, conforme pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Domínio para os arranjos.



Fonte: Autora (2019).

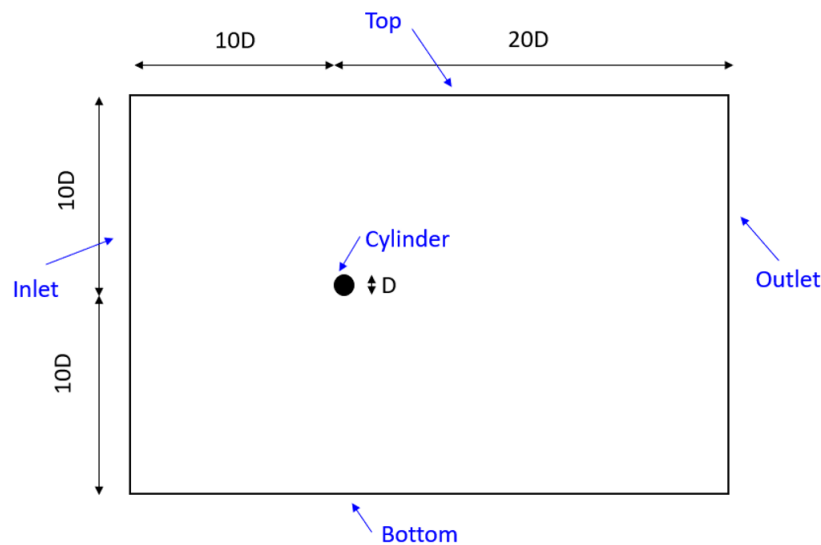
Assim, a malha é gerada no Ansys como uma malha CFD Fluent utilizando

o método *Multizone*, definindo o número de divisões para cada bloco e seu grau de refinamento, de maneira a formar uma malha híbrida. O arquivo é exportado para o OpenFOAM através da função *fluentMeshToFoam*.

3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno devem ser especificadas para cada uma das fronteiras mostradas na Figura 15.

Figura 15 – Domínio computacional e condições de contorno.



Fonte: Autora (2019).

As fronteiras e as condições de contorno utilizadas são as seguintes:

- *Inlet*: Descreve a entrada do escoamento, velocidade é fixa na aresta de entrada;
- *Outlet*: Descreve a saída do escoamento. A velocidade de saída possui gradiente zero e a pressão possui valor nulo;
- *Cylinder*: É utilizada a condição de não escorregamento na parede do cilindro. Nesta condição, a velocidade é nula e a pressão possui gradiente zero;
- *TopAndBottom*: Cada uma dessas arestas é considerada com condição de parede;
- *FrontAndBack*: Este plano é considerado como vazio pelo fato de ser um escoamento bidimensional.

As condições de contorno são as mesmas para todas as simulações conduzidas neste trabalho.

3.5 ASPECTOS DAS SIMULAÇÕES NO CLUSTER

As simulações foram realizadas em um cluster com as características apresentadas na Figura 16.

Figura 16 – Informações do cluster utilizado.

| | hal (head node) | node001 and node002 | node002 to node020 | node021 | node022 |
|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Processors each node | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Processor model | Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v2 | Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2640 v4 | Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2640 v4 | Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2660 v4 | Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2660 v2 |
| Frequency | 2.10GHz | 2.40GHz | 2.40GHz | 2.00GHz | 2.20GHz |
| Number of cores per processor | 6 | 10 | 10 | 14 | 10 |
| Number of cores per node | 12 | 20 | 20 | 28 | 20 |
| RAM | 48 GB | 64 GB | 128 GB | 256 GB | 128 GB |
| GPUs | | | | Tesla K40m | Tesla K40m |
| Number of GPUs | | | | 4 | 4 |
| Number of CUDA cores per GPU | | | | 2880 | 2880 |
| Memory per GPU | | | | 12 GB | 12 GB |

Fonte: Autora(2019).

O tempo de simulação é de aproximadamente 1 dia para a coluna fixa e 7 dias para 2 graus de liberdade. Para os arranjos fixos, o tempo é cerca de 3 dias (tempos considerando as malhas e incrementos de tempo mais refinados e a utilização de um nó por simulação).

Os valores de y^+ foram mantidos menores do que 0,4 para todas as simulações e o número de Courant menor do que 1,2.

3.6 MÉTODOS DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados serão analisados empregando-se o programa Octave 4.2.2. para que, a partir dos dados obtidos pelo OpenFOAM, sejam retirados o valor médio, Equação 17, e valor quadrático médio (rms), Equação 18, para os coeficientes de arrasto e de sustentação.

$$x_{m\u00e9dio} = \frac{\sum x_i}{N} \quad (17)$$

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (18)$$

onde x é a variável de interesse e N é o número de valores do vetor.

Também será utilizada a Transformada Rápida de Fourier aplicada ao registro do coeficiente de sustentação para encontrar a frequência de liberação de vórtices e as frequências de vibração da coluna.

A série de Fourier expressa uma quantidade periódica $x(t)$ em termos das componentes individuais de frequência (BENDAT; PIERSOL, 2011). Se $x(t)$ é periódica no período T , onde $x(t) = x(t + T)$, então:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{r=1}^{\infty} a_r \cos(\omega_r t) + b_r \sin(\omega_r t) \quad (19)$$

onde $a_0/2$ é o valor médio, as frequências harmônicas, ω_r , são múltiplas da frequência fundamental ($2\pi/T$) e os coeficientes são dados por:

$$a_r = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(\omega_r t) dt \quad (20)$$

$$b_r = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(\omega_r t) dt \quad (21)$$

sendo $r = 0, 1, 2, \dots$

Como os registros são obtidos de maneira discreta, existe uma frequência de amostragem, $f_a = N/T$. Na análise de Fourier discreta, os coeficientes da série podem ser obtidos via algoritmo expedito de análise, conhecido como *Fast Fourier Transform* (FFT), Transformada Rápida de Fourier, segundo o qual é possível a transcrição do registro temporal para a seguinte forma:

$$x(t) = \sum_{r=0}^{N-1} 2\sqrt{a_r^2 + b_r^2} \cos(\omega_r t + \delta_r) \quad (22)$$

onde $\delta_r = \arctg(\frac{b_r}{a_r})$. Pode-se construir, então, sua representação no domínio da frequência. O grande benefício da FFT é que o número de operações necessárias cai de N^2 , da Transformada Discreta de Fourier, para $N \log(N)$, reduzindo tempo de processamento.

Para os casos com grau de liberdade, serão avaliados também os resultados de variação da posição do centroide do corpo ao longo do tempo de simulação, possibilitando o estudo do movimento e de suas amplitudes máximas.

Além dessas análises, empregando-se a ferramenta *Paraview*, é verificada a vorticidade, a qual é a média local da rotação sobre um determinado eixo de coordenada. É, portanto, o rotacional do campo de velocidade:

$$\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{U} \quad (23)$$

Como se tratam de simulações bidimensional o enfoque é a vorticidade Z (ε), componente vertical da vorticidade, dada como:

$$\varepsilon = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (24)$$

onde v e u são as componentes da velocidade na direção transversal e longitudinal ao escoamento, respectivamente.

3.7 MÉTODO DE VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

3.7.1 Verificação

A verificação de código não é tratada neste trabalho, sendo a verificação da solução o principal problema a ser estudado.

É seguida uma abordagem científica, onde primeiro são realizados os estudos de verificação e incertezas numéricas estimadas com base no método apresentado por Eça e Hoekstra (2009), Eça, Vaz e Hoekstra (2010) e Rosetti e Fajarra (2015), e somente depois, os resultados numéricos com as menores incertezas serão comparados com os experimentos.

A incerteza numérica, $U(\phi)$, define um intervalo com 95% de confiança no qual deve conter a solução exata. Ela é naturalmente relacionada com a estimativa do erro numérico e é definida como:

$$\phi_i - U_\phi \leq \phi_{exact} \leq \phi_i + U_\phi \quad (25)$$

onde ϕ_i é o valor da quantidade ϕ encontrada na simulação i e ϕ_{exact} o valor exato dessa quantidade.

É comumente aceito que o erro numérico de uma previsão de CFD tem três componentes: o erro de arredondamento, o erro iterativo e o erro de discretização. Os procedimentos para a estimativa de erro numérico assumem que o erro de discretização seja dominante (EÇA; HOEKSTRA, 2014). A equação básica para estimar o erro de discretização, ϵ_ϕ , é:

$$\epsilon_\phi \simeq \delta_{RE} = \phi_i - \phi_o = \alpha_x h_i^{\beta_x} \quad (26)$$

Já a Equação 27 é usada para problemas transientes :

$$\delta_{RE} = \phi_i - \phi_o = \alpha_x h_i^{\beta_x} + \alpha_t \tau_i^{\beta_t} \quad (27)$$

Nessas equações, ϕ_i representa qualquer quantidade local, ϕ_o é a estimativa da solução exata, h_i e τ_i são tamanhos típicos de célula e de incremento de tempo, β_x e β_t são as ordens de precisão observadas da discretização de espaço e tempo, respectivamente, α_x e α_t são coeficientes. Assim, cinco incógnitas devem ser calculadas exigindo, no mínimo, cinco simulações (ROSETTI et al., 2016), resolvendo a Equação 27 por regressão, pelo método dos mínimos quadrados.

Para calcular a estimativa de erro é preciso haver uma convergência monotônica. Desse modo, é necessário estabelecer a ordem de convergência de tempo e espaço, β , para determinar os casos de convergência monotônica aparente ($\beta > 0$) ou divergência ($\beta < 0$). Se nenhum valor de β existe, toma-se como convergência oscilatória. A alteração média dos dados é:

$$\Delta_\phi = \frac{\phi_i - \phi_j}{n_d - 1} \quad (28)$$

onde n_d é o número de pontos.

Se os dados não mostrarem convergência monotônica aparente ou, se nem todos os dados estiverem na faixa assintótica, pode-se usar diferentes ordens aparentes de convergência no tempo e no espaço, ou também definir um estimador de erro modificado que não assuma a convergência monotônica:

$$\delta' = \phi_i - \phi_o = \alpha_{x1} h_i + \alpha_{x2} h_i^2 + \alpha_{t1} \tau_i + \alpha_{t2} \tau_i^2 \quad (29)$$

Assim, se a ordem de convergência for monotônica, com $0,5 < \beta < 2,1$, um fator de segurança de valor $F_s = 1,25$ deve ser usado, se não, o valor $F_s = 3$ é utilizado, como mostrado nas Equações 30 e 31.

Comparando o desvio padrão com a alteração média dos dados, se $\sigma < \Delta_\phi$:

$$U(\phi_i) = 1,25\delta + \sigma + |\phi_i - \phi_{fit}| \quad (30)$$

Por outro lado, se $\sigma > \Delta_\phi$:

$$U(\phi_i) = 3 \frac{\sigma}{\delta_\phi} (\delta + \sigma + |\phi_i - \phi_{fit}|) \quad (31)$$

onde ϕ_{fit} é o valor da variável dependente obtida da regressão e δ é o critério de estimativa de erro escolhido para $|\phi_i - \phi_{fit}|$.

3.7.2 Discretização e Estudos de Incerteza

Foram estudados três tamanhos de malha e três incrementos de tempo para o caso de uma coluna circular e para o caso de arranjo com colunas circulares em $S/L = 2$

e $\alpha = 0^\circ$. O incremento de tempo (τ) e o tamanho da malha (N) foram sistematicamente variados, resultando em 9 simulações para cada caso. Essas variáveis podem ser representadas em valores adimensionais, que são definidos por discretização de espaço e tempo, como mostrado pela Equação 32 e Equação 33, respectivamente:

$$h_i = \sqrt{\frac{N_{cel,1}}{N_{cel,i}}} \quad (32)$$

$$t_i = \frac{\tau_i}{\tau_1} \quad (33)$$

Portanto, h_1 é a malha mais refinada e t_1 é o incremento de tempo mais refinado. As discretizações de espaço para a coluna isolada e para o arranjo de colunas são mostradas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. A discretização de tempo utilizada foi a mesma para os dois caso sendo essa mostrada na Tabela 3.

Tabela 1 – Malha para o caso de uma coluna circular.

| Malha | M1 | M2 | M3 |
|-----------|--------|-------|-------|
| N_{cel} | 178900 | 44674 | 19822 |
| h_i | 1 | 2 | 3 |

Fonte: Autora (2019).

Tabela 2 – Malha para o caso de arranjo circular.

| Malha | M1 | M2 | M3 |
|-----------|--------|-------|-------|
| N_{cel} | 186314 | 45059 | 19760 |
| h_i | 1 | 2 | 3 |

Fonte: Autora (2019).

Tabela 3 – Incremento de tempo.

| Incremento de Tempo | TS1 | TS2 | TS3 |
|---------------------|-----|-----|-----|
| τ | 2,5 | 5 | 7,5 |
| t_i | 1 | 2 | 3 |

Fonte: Autora (2019).

3.7.3 Validação

Eça, Vaz e Hoekstra (2010) indica que a incerteza de validação, U_{val} , é obtida por :

$$U_{val}(\phi) = \sqrt{U_{num}(\phi)^2 + U_{input}(\phi)^2 + U_{data}(\phi)^2} \quad (34)$$

onde U_{num} é a incerteza numérica, U_{input} é a incerteza dos parâmetros de entrada, e U_{data} é a incerteza experimental.

O erro de validação, E , é dado por:

$$E = S_i - D_i \quad (35)$$

onde S_i é a previsão numérica (ϕ_i) e D_i o valor experimental.

Ao comparar-se esse dois valores, tem-se: quando $|E| \gg U_{val}$, o modelo deve ser melhorado, pois o erro de modelagem é dominante; se $|E| < U_{val}$, indica-se que a solução está dentro do ruído imposto pelas diferentes fontes de incerteza e, sendo $|E|$ pequeno o suficiente, então a solução é validada com precisão equivalente a U_{val} .

Os resultados foram verificados e validados seguindo a técnica apresentada, com o auxílio numérico da ferramenta de Verificação e Validação (V&V) do programa ReFRESCO (desenvolvimento pelo MARIN - *Maritime Research Institute Netherlands*).

3.8 SÍNTESE DAS ANÁLISES CONTEMPLADAS POR ESTE TEXTO

A Tabela 4 representa a ordem de apresentação do capítulo de Resultados e Discussões. Dessa forma, essa matriz, contemplando 15 simulações, é suficiente para o atendimento dos objetivos definidos anteriormente.

Tabela 4 – Matriz das simulações realizadas.

| Simulação | Número de colunas | Formato da seção | Situação | Ângulo de incidência do escoamento (°) |
|-----------|-------------------|------------------|----------|--|
| 1 | 1 | Circular | Fixo | 0 |
| 2 | 1 | Quadrada | Fixo | 0 |
| 3 | 1 | Diamante | Fixo | 0 |
| 4 | 1 | Circular | 2 GDL | 0 |
| 5 | 1 | Quadrada | 2 GDL | 0 |
| 6 | 1 | Diamante | 2 GDL | 0 |
| 7 | 3 | Circular | Fixo | 0 |
| 8 | 3 | Circular | Fixo | 180 |
| 9 | 3 | Circular | Fixo | 90 |
| 10 | 3 | Quadrada | Fixo | 0 |
| 11 | 3 | Quadrada | Fixo | 180 |
| 12 | 3 | Quadrada | Fixo | 90 |
| 13 | 3 | Diamante | Fixo | 0 |
| 14 | 3 | Diamante | Fixo | 180 |
| 15 | 3 | Diamante | Fixo | 90 |

Fonte: Autora (2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

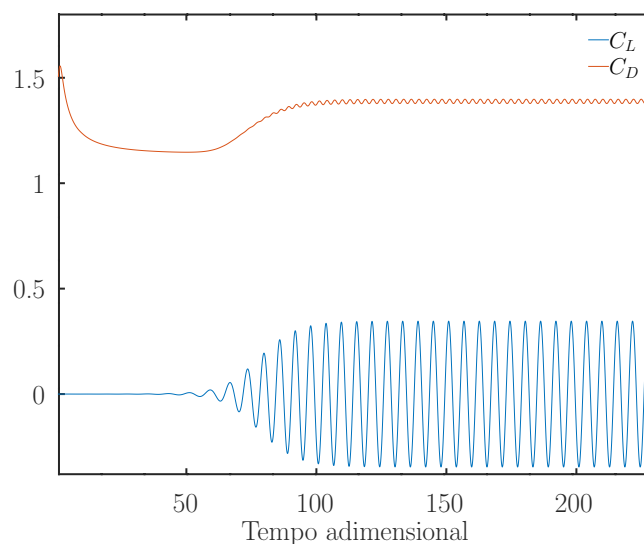
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos das simulações assim como discussões sobre os mesmos. Os resultados serão apresentados na mesma ordem exposta no capítulo de metodologia.

4.1 COLUNA FIXA COM SEÇÃO CIRCULAR

Para o caso de um coluna fixa com seção circular, os resultados a seguir correspondem à malha mais refinada (h_1) e ao incremento de tempo mais refinado (t_1). A Figura 17 mostra a variação dos coeficientes de arrasto e de sustentação ao longo do tempo adimensional ($t_{adim} = tU/L$).

Realizando um corte no sinal no tempo adimensional 125, a partir do qual a liberação de vórtices entra em equilíbrio e as forças possuem amplitude e frequência bem definidas e invariáveis, encontrou-se a média do coeficiente de arrasto, $\overline{C_D} = 1,388$, e o valor quadrático médio do coeficiente de sustentação, $C_{L,rms} = 0,244$.

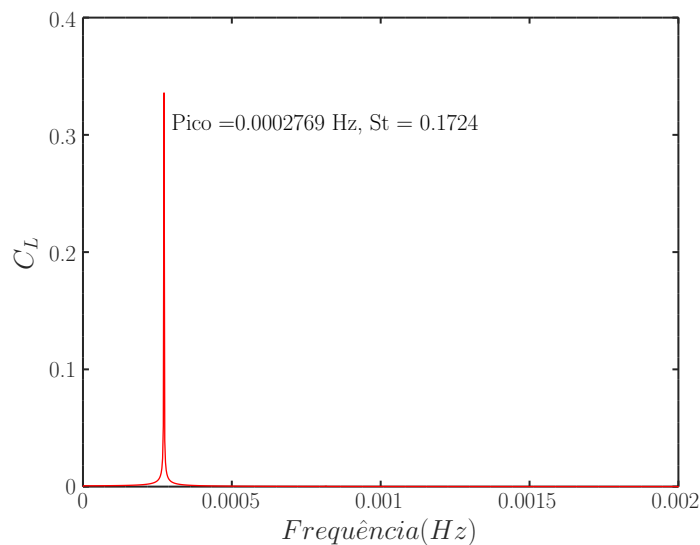
Figura 17 – Histórico de tempo de C_D e C_L para o caso circular.



Fonte: Autora (2019).

Após realizar a FFT da força de sustentação, gerou-se a Figura 18, a qual representa o sinal no domínio da frequência. Foi obtido o número de Strouhal pela frequência de pico, no valor de $St = 0,172$.

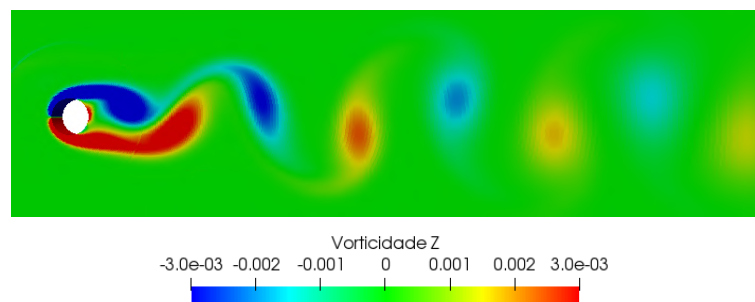
Figura 18 – Espectro de frequência para o caso circular.



Fonte: Autora (2019).

Na Figura 19, é mostrada a vorticidade perpendicular ao plano do escoamento (rotação da velocidade no eixo z), a cor vermelha representa a rotação do escoamento no sentido anti-horário e a cor azul a rotação no sentido horário. É possível observar a emissão de vórtices (*Vortex Shedding*), com a esteira transiente e os vórtices emitidos em uma determinada frequência, conforme comentado na revisão teórica.

Figura 19 – Vorticidade para o caso circular, tempo adimensional 148.



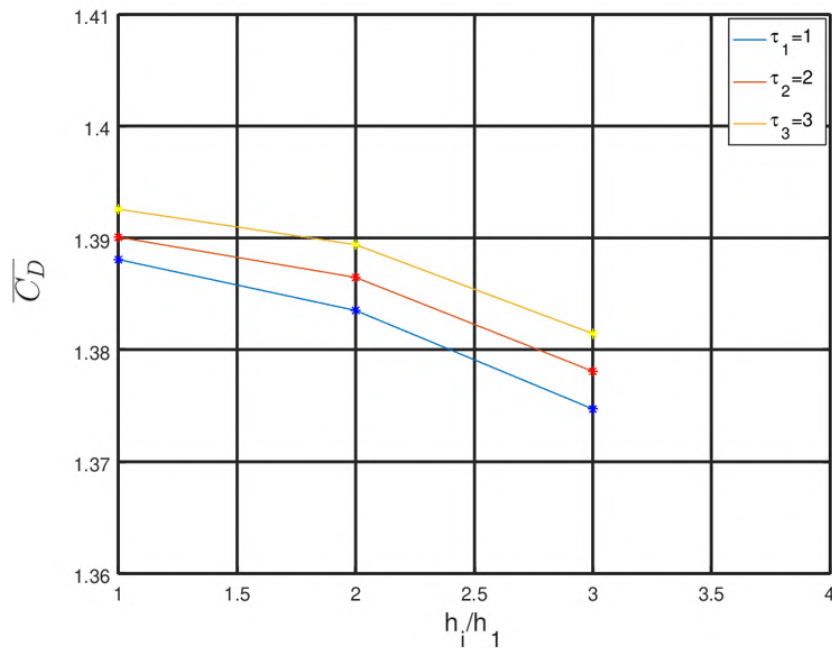
Fonte: Autora (2019).

Além disso, é possível observar que à medida que o vórtice se move na esteira, diminui sua intensidade, espalhando-se, perdendo sua pressão e velocidade até se homogeneizar com o valor do campo de pressão e velocidade do próprio escoamento.

4.1.1 Verificação e Validação

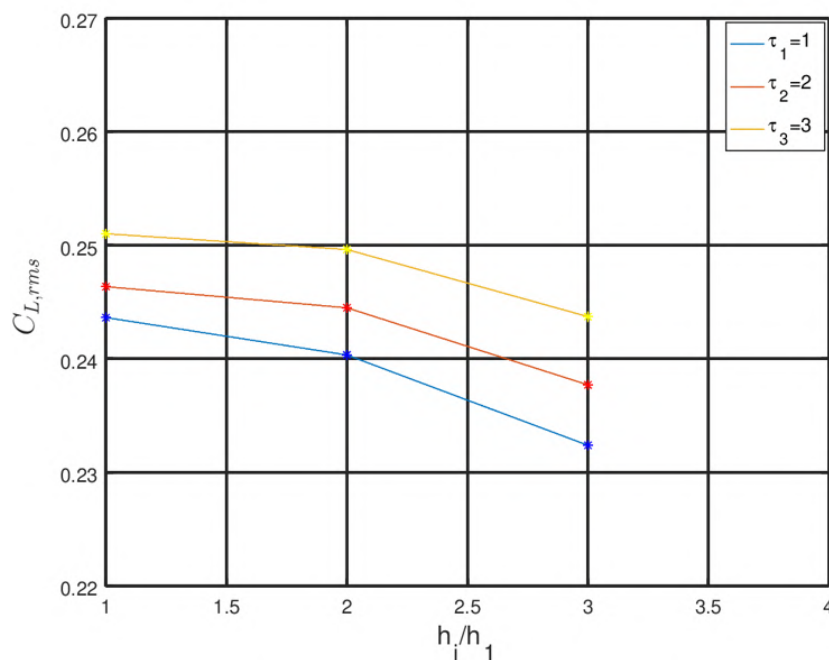
A sensibilidade dos resultados do coeficiente de arrasto e de sustentação à variação do número de células e incremento de tempo do tempo é mostrada nas Figuras 20 e 21, respectivamente.

Figura 20 – Análise de convergência para o coeficiente médio de arrasto.



Fonte: Autora (2019).

Figura 21 – Análise de convergência para o coeficiente de sustentação rms.



Fonte: Autora (2019).

É possível observar que com a diminuição do incremento de tempo e do tamanho da malha os resultados se aproximam, evidenciando a convergência dos resultados.

Prosseguindo com o processo de verificação, foi encontrada uma convergência monotônica com $\beta_x = 2$ e $\beta_t = 2$ para o arrasto médio, com uma incerteza numérica de

$U(\overline{C_D}) = 0,0025$ e $\overline{C_{D_{exact}}} = 1,3881$.

Para o $C_{L,rms}$ foi encontrada uma convergência monotônica com $\beta_x = 2$ e $\beta_t = 1,2$, uma incerteza numérica de $U(C_{L,rms}) = 0,0030$ e um valor exato de $(C_{L,rms})_{exact} = 0,2415$.

Finalmente, para o número de Strouhal, $\beta_x = 1,1$, $\beta_t = 1,1$, $U(St) = 0,000006597$ e $St_{exact} = 0,16897$.

A incerteza numérica apresentada é para a simulação com malha e incremento de tempo mais refinados. O intervalo final das grandezas para tal simulação é encontrado abaixo.

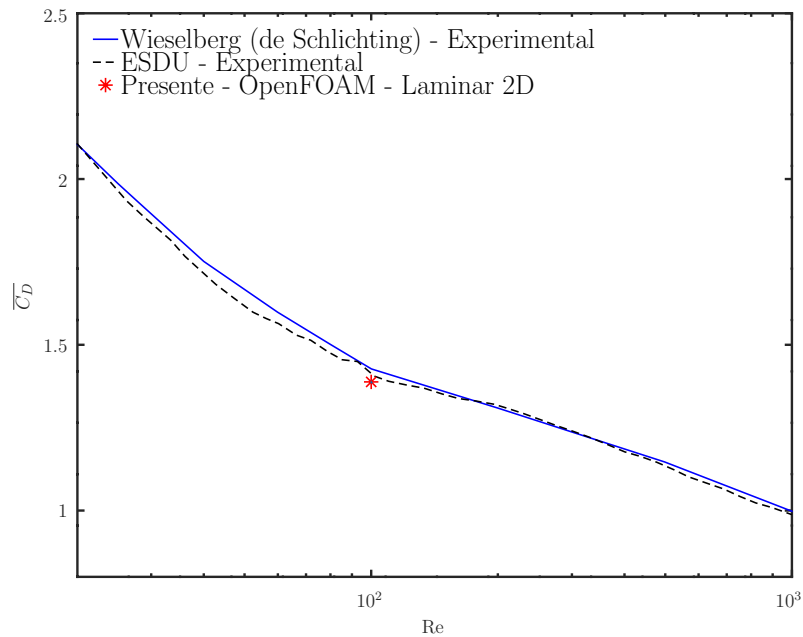
$$1,3856 < \overline{C_D} < 1,3906$$

$$0,2408 < C_{L,rms} < 0,2468$$

$$0,16897 < St < 0,16898$$

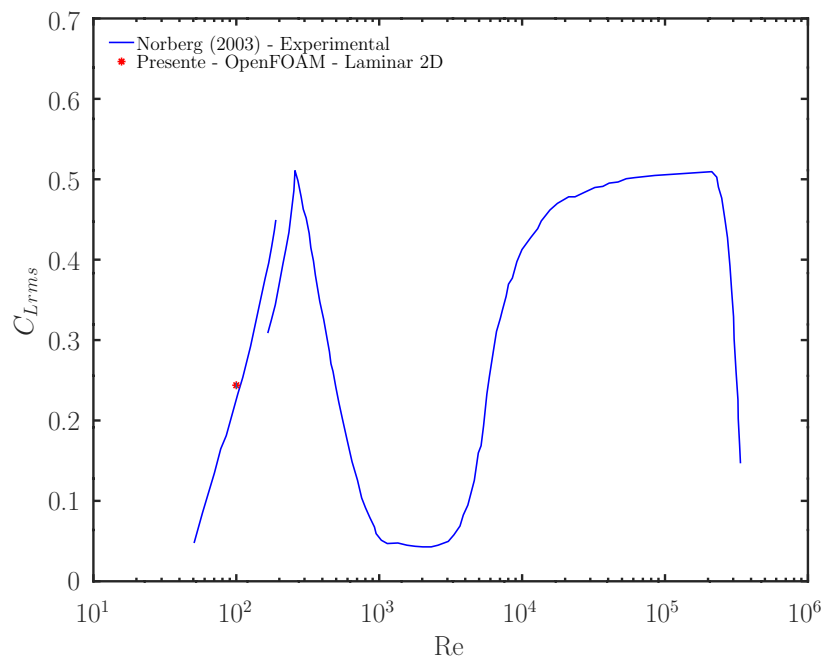
Os resultados são comparados com valores experimentais nas Figuras 22 e 23, nas quais o ponto em vermelho representa o resultado encontrado no presente trabalho e as linhas preta e azul são os valores experimentais obtidos pelos autores citados na legenda. As incertezas nos coeficientes são pequenas, fazendo com que a barra de erro não seja visível no gráfico, e a concordância com o valor experimental é notável.

Figura 22 – Resultados numérico e experimentais para o coeficiente de arrasto médio.



Fonte: Adaptado de Rosetti (2015).

Figura 23 – Resultados numérico e experimentais para o coeficiente de sustentação rms.



Fonte: Adaptado de Norberg (2003).

É esperada uma discrepância entre os valores experimentais e numéricos, uma vez que os efeitos tridimensionais, inevitáveis nos experimentos, não estão presentes nas simulações bidimensionais. Em relação aos valores experimentais, Rosetti (2015) encontrou uma incerteza experimental de $U_{data}(\overline{C_D}) = 0,06$, usando distribuição de

student com nível de confiança de 90%, e um valor do coeficiente de arrasto médio experimental igual a 1,41. Comparando a incerteza numérica com a diferença entre valores numéricos e experimentais, obtém-se:

$$U_{val}(\overline{C_D}) = 0,06005$$

$$E(\overline{C_D}) = 0,02193$$

Como $|E| < U_{val}$, conclui-se que o resultado numérico para o coeficiente de arrasto médio é validado com o valor experimental. Para os valores do coeficiente de sustentação e do número de Strouhal não foram encontrados valores de incertezas experimentais que possibilitassem o processo de validação dos mesmos.

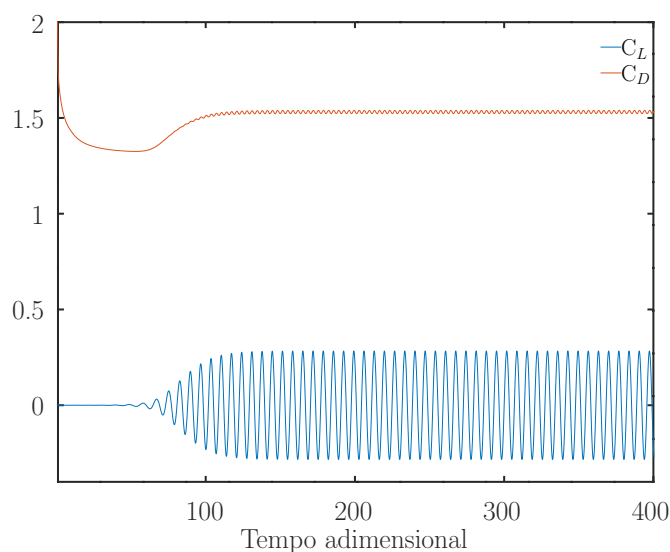
Tendo verificado e validado as simulações da coluna circular fixa, o próximo passo é alterar o formato da seção.

4.2 COLUNA FIXA COM SEÇÃO QUADRADA

Para a coluna fixa com seção quadrada, as malhas utilizadas possuem a mesma ordem de h_1 e o mesmo incremento de tempo t_1 do caso circular.

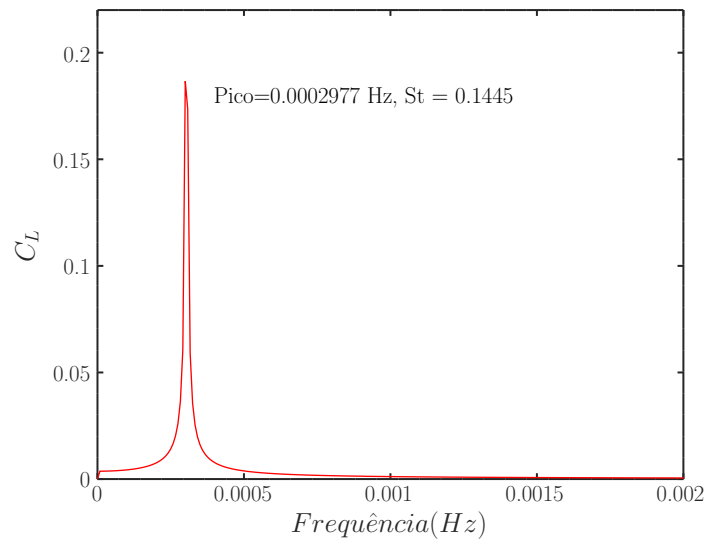
Os coeficientes de arrasto e de sustentação e a frequência de desprendimento de vórtices foram coletados, sendo apresentados nas formas de histórico de tempo e espectro de frequência, respectivamente, Figuras 24 e 25. Novamente, as componentes de força possuem amplitude e frequência bem definidas, sendo que $\overline{C_D} = 1,5309$, $C_{L,rms} = 0,2001$ e $St = 0,1445$.

Figura 24 – Histórico de tempo de C_D e C_L para a seção quadrada.



Fonte: Autora (2019).

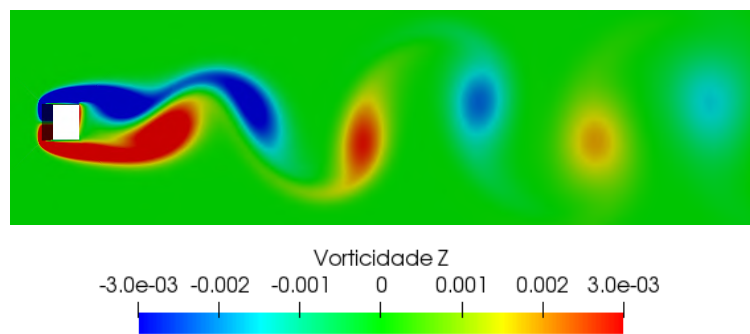
Figura 25 – Espectro de frequência para a seção quadrada.



Fonte: Autora (2019).

Na Figura 26 é mostrada a vorticidade perpendicular ao plano do escoamento, na qual pode-se observar a esteira transiente com liberação de vórtices sincronizados. Contrastando com os vórtices emitidos na seção circular, os da seção quadrada possuem maior escala e intensidade. As seções quadradas têm um ponto fixo de separação da camada limite, permitindo um descolamento antecipado quando comparado com a seção circular, o que leva a vórtices de maior intensidade.

Figura 26 – Vorticidade para a seção quadrada, tempo adimensional 168.

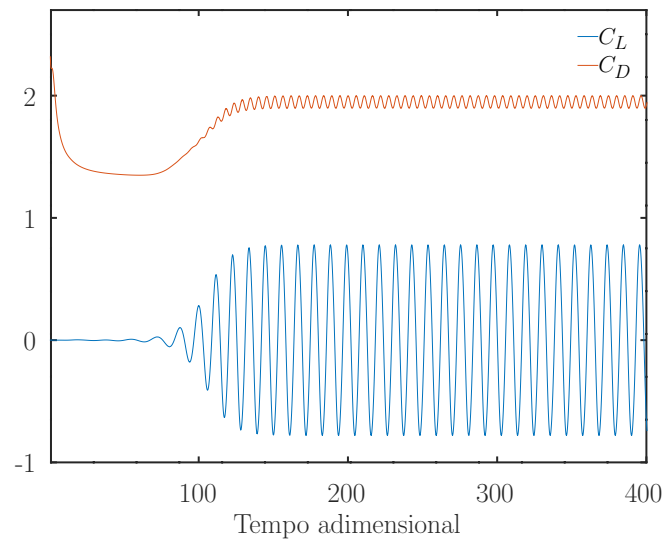


Fonte: Autora (2019).

4.3 COLUNA FIXA COM SEÇÃO DIAMANTE

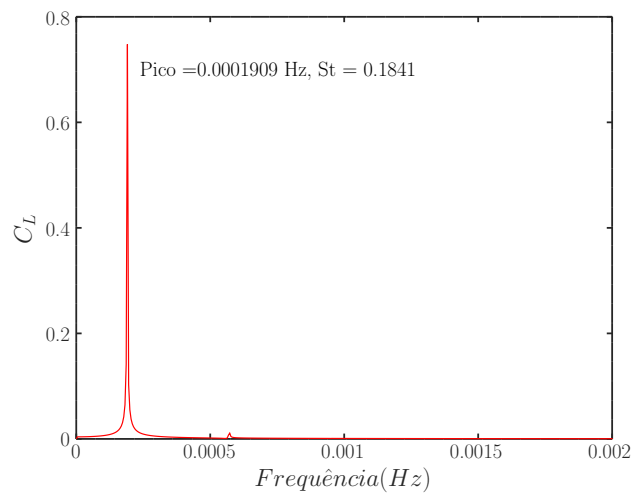
A seção quadrada com ângulo de aproximação do escoamento de 45° é chamada de seção diamante. Os históricos de tempo dos coeficientes de arrasto e sustentação, e espectro de frequência são mostrados nas Figuras 27 e 28, respectivamente. Foram obtidos os valores $\overline{C_D} = 1,9484$, $C_{L,rms} = 0,5517$ e $St = 0,1841$.

Figura 27 – Histórico de tempo de C_D e C_L para a seção diamante.



Fonte: Autora (2019).

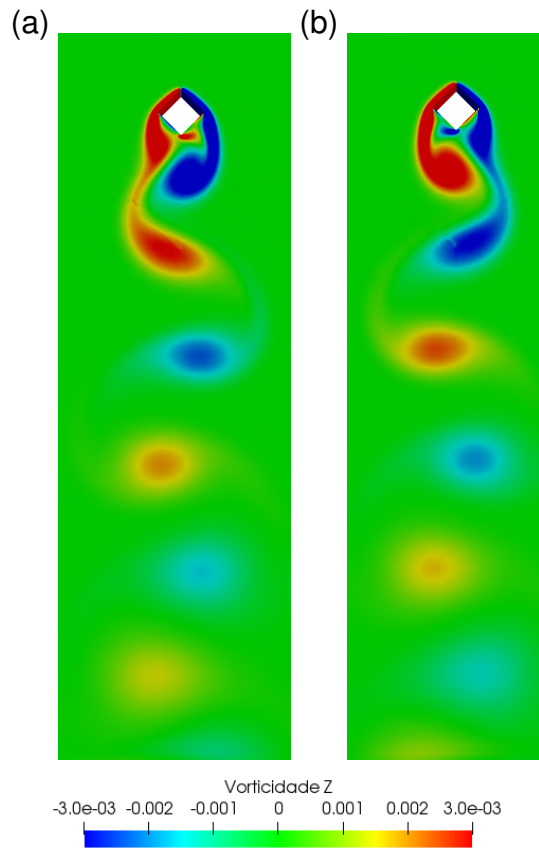
Figura 28 – Espectro de frequência para a seção diamante.



Fonte: Autora (2019).

Pode-se observar na Figura 28 o surgimento de um novo pico de frequência, de menor amplitude, com valor de $f_2 = 3f_{pico} = 0,0005728$ Hz. Essa frequência advém dos vórtices liberados pela aresta de trás do diamante, Figura 29.

Figura 29 – Vorticidade para a seção diamante, tempos adimensionais (a) 104 e (b) 108.



Fonte: Autora (2019).

A Tabela 5 mostra as comparações dos presentes resultados com aqueles encontrados na literatura para seções quadradas. Com $\alpha = 0^\circ$, os resultados para $\overline{C_D}$ e St do presente modelo adequaram-se favoravelmente com outros resultados numéricos, já os resultados dos valores de $C_{L,rms}$ de diferentes estudos, estão dispersos. A concordância ocorre principalmente com os valores de Sen, Mittal e Biswas (2011). Para $\alpha = 45^\circ$, vê-se disparidades entre os valores, as quais podem ser decorrentes, entre outros fatores, da maneira como o comprimento característico do corpo é considerado.

Tabela 5 – Resultados para seção quadrada e diamante.

| α [°] | Estudos | B | $\overline{C_D}$ | $C_{L,rms}$ | St |
|--------------|-------------------------------------|-------|------------------|-------------|-------|
| 0 | (SOHANKAR; NORBERG; DAVIDSON, 1998) | 0,05 | 1,477 | 0,156 | 0,146 |
| 0 | (DAREKAR; SHERWIN, 2001) | 0,023 | 1,486 | 0,186 | 0,146 |
| 0 | (SHARMA; ESWARAN, 2004) | 0,05 | 1,494 | 0,192 | 0,149 |
| 0 | (SINGH et al., 2009) | 0,05 | 1,51 | 0,16 | 0,147 |
| 0 | (SINGH et al., 2009) | 0,1 | 1,605 | 0,171 | 0,154 |
| 0 | (SAHU; CHHABRA; ESWARAN, 2009) | 0,05 | 1,488 | 0,188 | 0,149 |
| 0 | (SEN; MITTAL; BISWAS, 2011) | 0,05 | 1,529 | 0,193 | 0,145 |
| 0 | (ZHAO; CHENG; ZHOU, 2013) | 0,025 | 1,452 | 0,198 | 0,145 |
| 0 | Presente | 0,05 | 1,531 | 0,200 | 0,144 |
| 45 | (SOHANKAR; NORBERG; DAVIDSON, 1998) | 0,05 | 1,720 | 0,450 | 0,175 |
| 45 | (ZHAO; CHENG; ZHOU, 2013) | 0,025 | 1,870 | 0,654 | 0,139 |
| 45 | Presente | 0,071 | 1,948 | 0,552 | 0,184 |

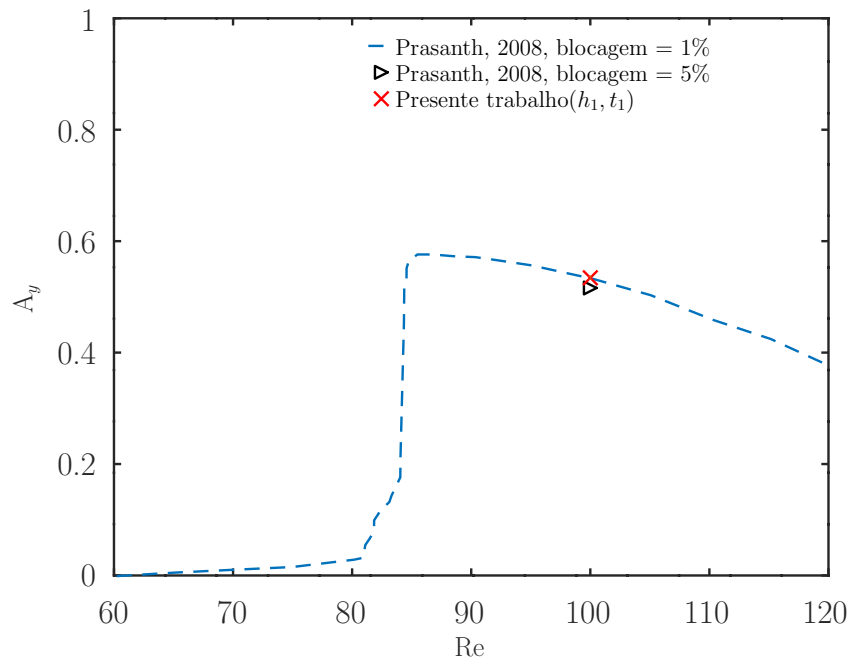
Fonte: Autora (2019).

Ciente que, de acordo com a literatura, os ângulos de aprornamento de $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$ são os mais importantes em termos da resposta ao escoamento, esses foram os resultados apresentados nesse trabalho. Porém, para entendimento da influência da variação do ângulo na resposta, também foram avaliados os ângulos de incidência de escoamento de $\alpha = 15^\circ$ e $\alpha = 30^\circ$ e esses resultados encontram-se no Apêndice A.

4.4 VIV COM 2 GDL PARA SEÇÃO CIRCULAR

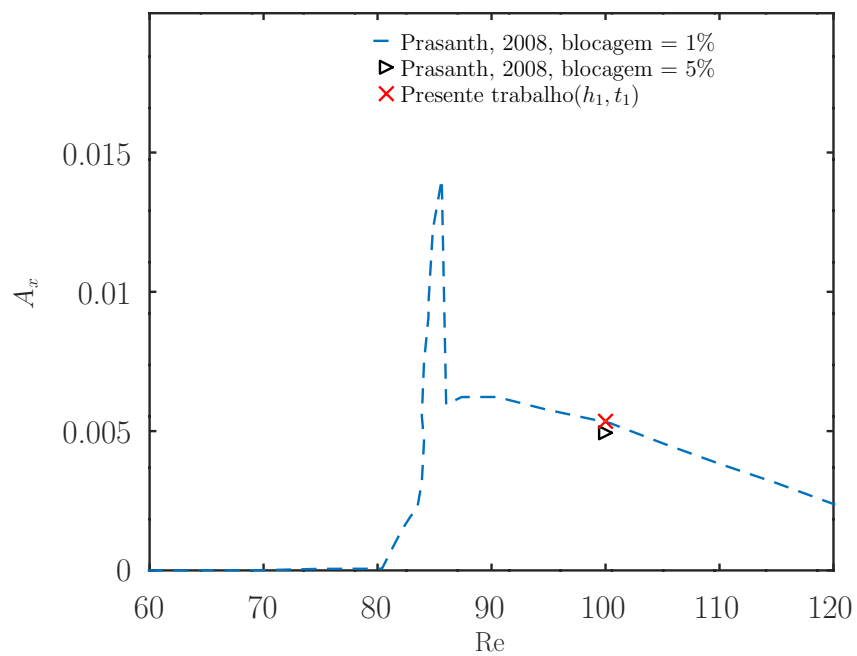
Como muitas são as variáveis aplicáveis ao estudo de simulação VIV, as simulações feitas nessa seção estão de acordo com as de Prasanth e Mittal (2008), possibilitando a validação dos resultados. Dessarte, os resultados para a amplitude característica na direção transversal ao escoamento (A_y) e amplitude normal ao escoamento (A_x) são apresentadas nas Figuras 30 e 31, respectivamente, sendo o marcador vermelho representativo dos resultado obtido neste estudo e a linha azul e o marcador preto representativos do trabalho de Prasanth e Mittal (2008). Também são comparados os valores dos coeficientes de sustentação rms ($C_{L,rms}$) e arrasto rms ($C_{D,rms}$), Figuras 32 e 33, repectivamente, expostos da mesma maneira.

Figura 30 – Amplitude significativa transversal ao escoamento.



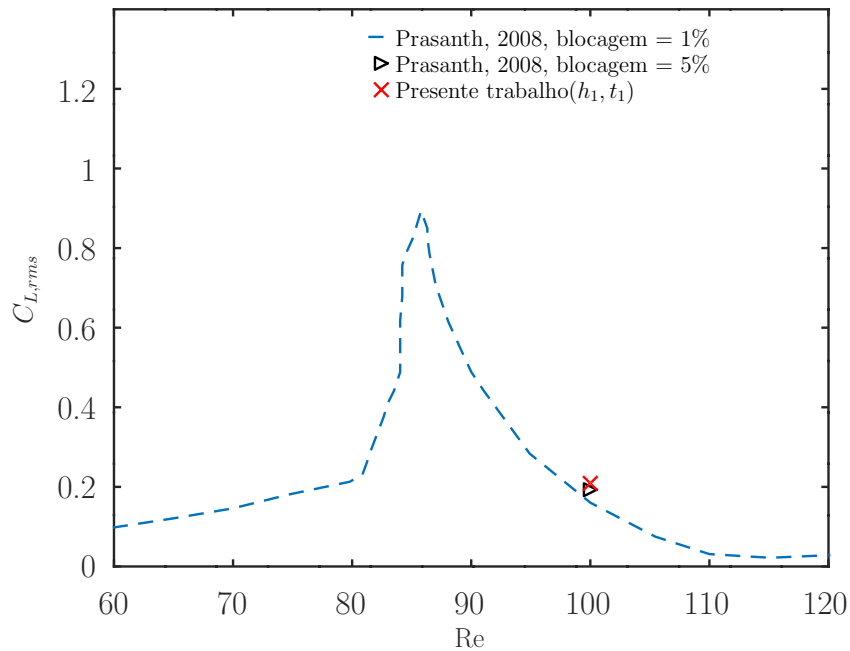
Fonte: Adaptado de Prasanth e Mittal (2008).

Figura 31 – Amplitude significativa na direção do escoamento.



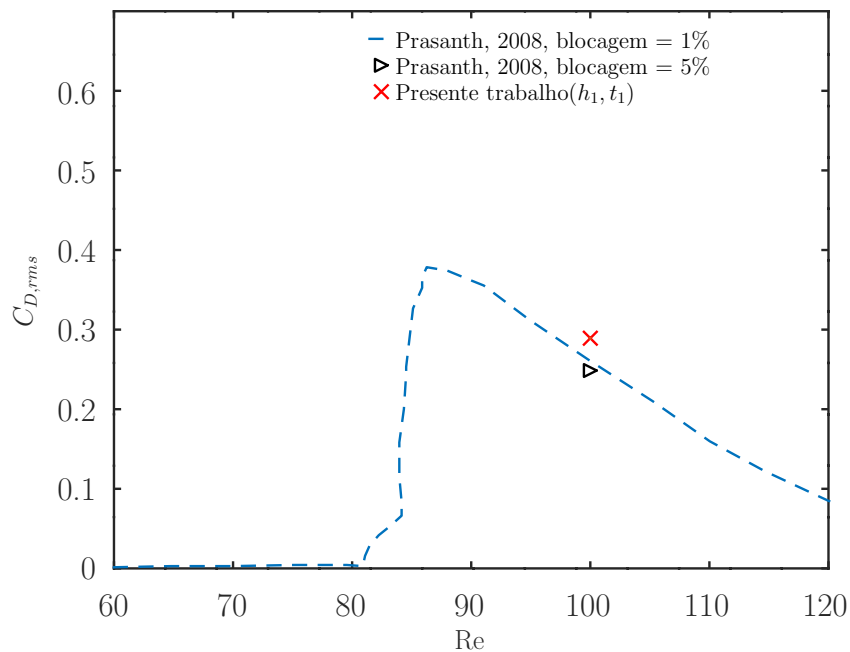
Fonte: Adaptado de Prasanth e Mittal (2008).

Figura 32 – Coeficiente de sustentação rms.



Fonte: Adaptado de Prasanth e Mittal (2008).

Figura 33 – Coeficiente de arrasto rms.



Fonte: Adaptado de Prasanth e Mittal (2008).

Percebe-se que os resultados encontrados no presente trabalho estão de acordo com os de Prasanth e Mittal (2008), tanto para a blocagem de 1% como 5%, sendo que as maiores diferenças aparecem para o coeficiente de arrasto rms.

4.4.1 Verificação e Validação

Prosseguindo com o processo de verificação, para o $C_{D,rms}$ foi encontrada uma convergência monotônica com $\beta_x = 1, 2$ e $\beta_t = 1, 2$, uma incerteza numérica de $U(C_{D,rms}) = 0,00109$ e um valor exato de $C_{D,rms,exact} = 0,289$.

Para o $C_{L,rms}$ foi encontrada uma convergência monotônica com $\beta_x = 2$ e $\beta_t = 2$, com uma incerteza numérica de $U(C_{L,rms}) = 0,0028$ e $C_{L,rms,exact} = 0,209$.

Analisando A_x , a convergência encontrada é monotônica com $\beta_x = 1, 2$ e $\beta_t = 1, 2$, com uma incerteza numérica de $U(A_x) = 0,000107$ e $A_{x,exact} = 0,00539$

E para A_y , convergência monotônica com $\beta_x = 1, 2$ e $\beta_t = 1, 2$, sendo a incerteza numérica equivalente a $U(A_y) = 0,00287$ e $A_{y,exact} = 0,534$.

O intervalo final das grandezas integrais para a simulação mais refinada é encontrado abaixo.

$$0,2879 < C_{D,rms} < 0,2901$$

$$0,2062 < C_{L,rms} < 0,2118$$

$$0,0053 < A_x < 0,0055$$

$$0,5311 < A_y < 0,5369$$

Comparando a incerteza numérica com a diferença entre valores numéricos e aqueles encontrados por Prasanth e Mittal (2008), obtém-se:

$$U_{num}(C_{D,rms}) = 0,00109$$

$$E(C_{D,rms}) = 0,03418$$

$$U_{num}(C_{L,rms}) = 0,000249$$

$$E(C_{L,rms}) = 0,0000492$$

$$U_{num}(A_x) = 0,000107$$

$$E(A_x) = 0,00030179$$

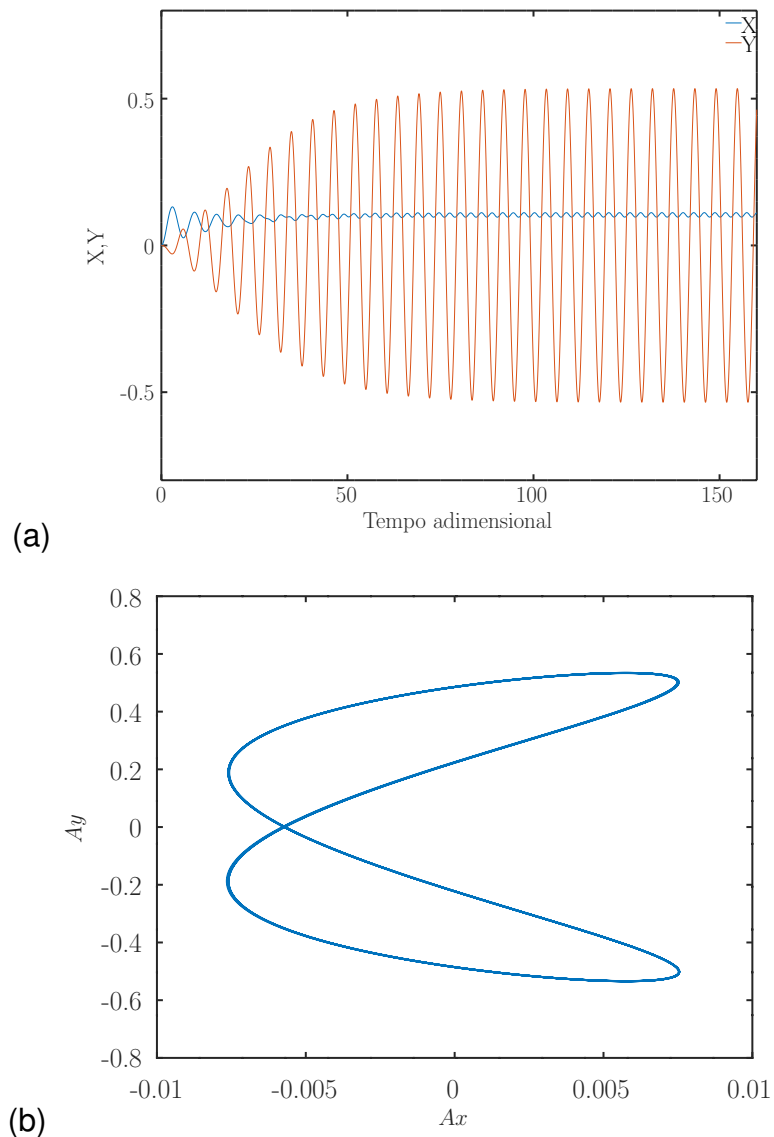
$$U_{num}(A_y) = 0,00287$$

$$E(A_y) = 0,018206$$

Dos valores em que $|E| < U_{val}$, conclui-se que os resultados numéricos para o coeficiente de sustentação e a amplitude característica transversal ao escoamento são validados com os valores numéricos encontrados por Prasanth e Mittal (2008).

A Figura 34 mostra o histórico de tempo do deslocamento da coluna (a), e o seu movimento acoplado (b), ilustrando o formato típico de oito, sendo que os valores não estão em escala para melhor visualização.

Figura 34 – (a) Histórico de tempo de deslocamento da coluna de seção circular e (b) seu movimento acoplado.



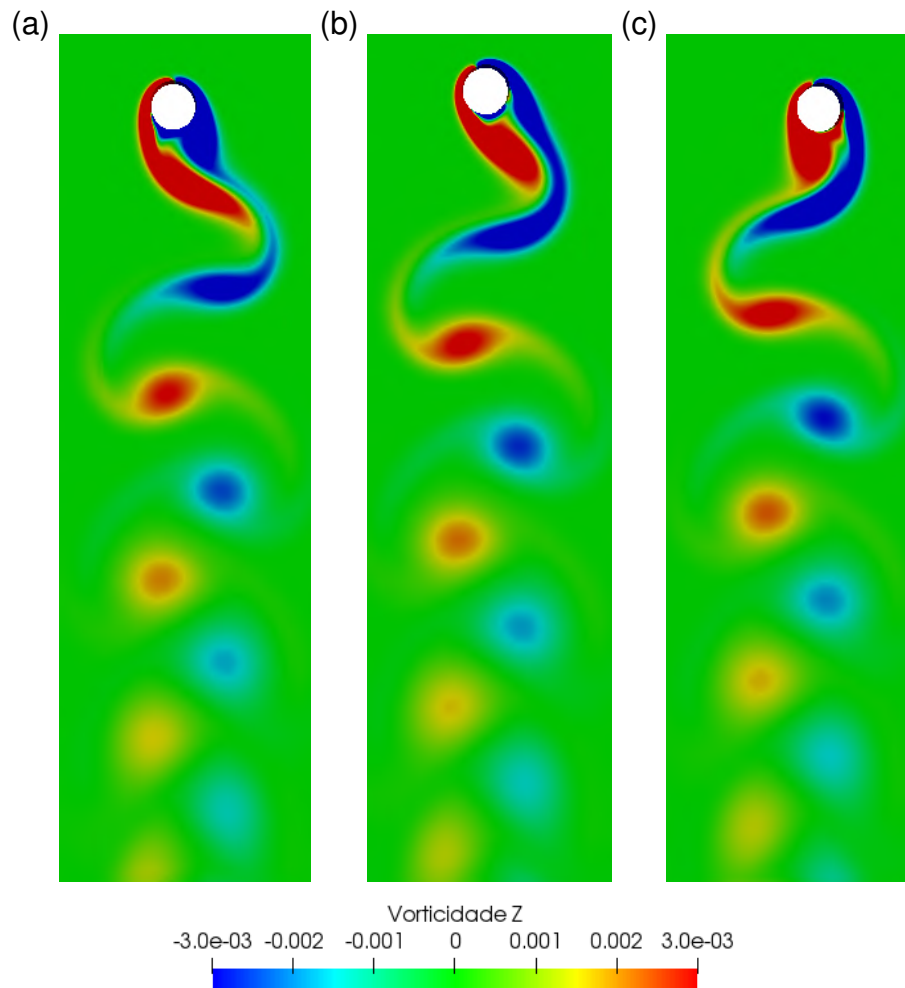
Fonte: Autora (2019).

Analisando o deslocamento do corpo, encontrou-se as amplitudes significativas $A_x = 0,0054$ e $A_y = 0,53$ e uma frequência de vibração transversal de $f_y = 2,80e^{-04}$,

sendo que $f_x = 2f_y$. A frequência natural do corpo é igual a frequência de liberação de vórtices encontrada no caso fixo, $f_n = 2,71e^{-04}$, e a frequência de liberação de vórtices com 2 GDL é $f_s = 2,77e^{-04}$, desse modo, as frequências estão sincronizadas, $f_y \approx f_n \approx f_s$, portanto, o sistema encontra-se em batimento, o que leva a maiores amplitudes de vibração.

Finalmente, é apresentada a vorticidade, Figura 35, em três instantes subsequentes. A esteira de vórtices é composta por dois vórtices lançados por ciclo de oscilação, fazendo com que o arrasto oscile duas vezes a frequência de desprendimento de vórtices, ou seja, $f_x \approx 2f_s$. Além disso, percebe-se que o regime de vórtices é muito semelhante ao caso fixo, Figura 19.

Figura 35 – Vorticidade para o caso circular com 2GDL em três instantes subsequentes.



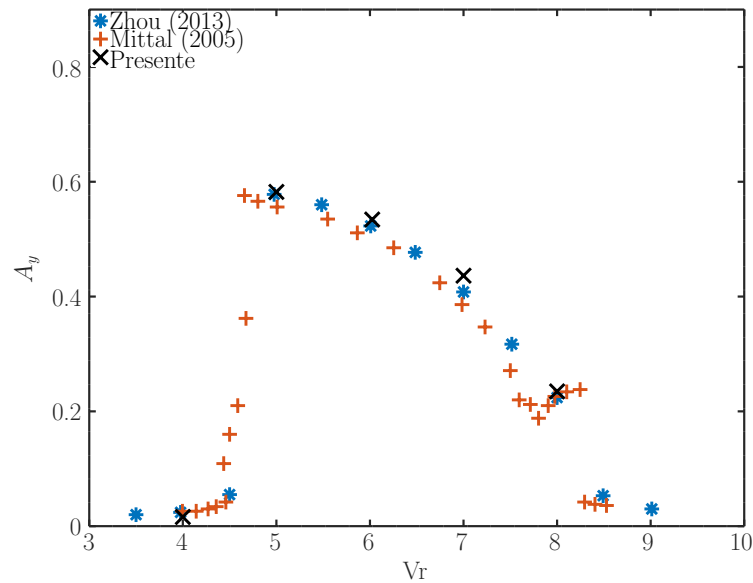
Fonte: Autora (2019).

4.4.2 Variação da Velocidade Reduzida

Foram realizadas também as simulações de VIV variando-se a velocidade reduzida, V_r . Os estudos foram feitos para o caso circular em $Re = 100$ e os resultados

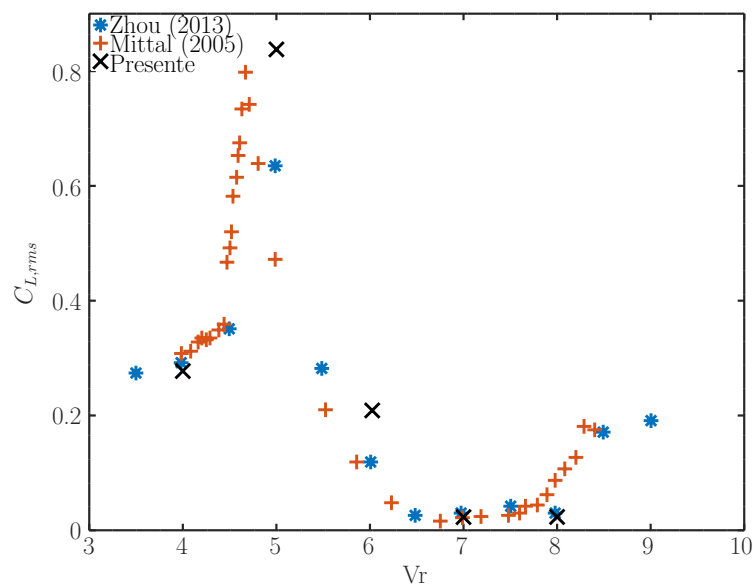
foram comparados com os obtidos por Singh e Mittal (2005) e Zhao, Cheng e Zhou (2013). As Figuras 36 e 37 comparam os resultados numéricos obtidos para $C_{L,rms}$ e A_y , respectivamente, sendo os marcadores laranja os resultados de Singh e Mittal (2005), os marcadores azuis os resultados de Zhao, Cheng e Zhou (2013) e os marcadores pretos os valores do presente trabalho.

Figura 36 – A_y para diferentes V_r .



Fonte: Autora (2019).

Figura 37 – $C_{L,rms}$ para diferentes V_r .

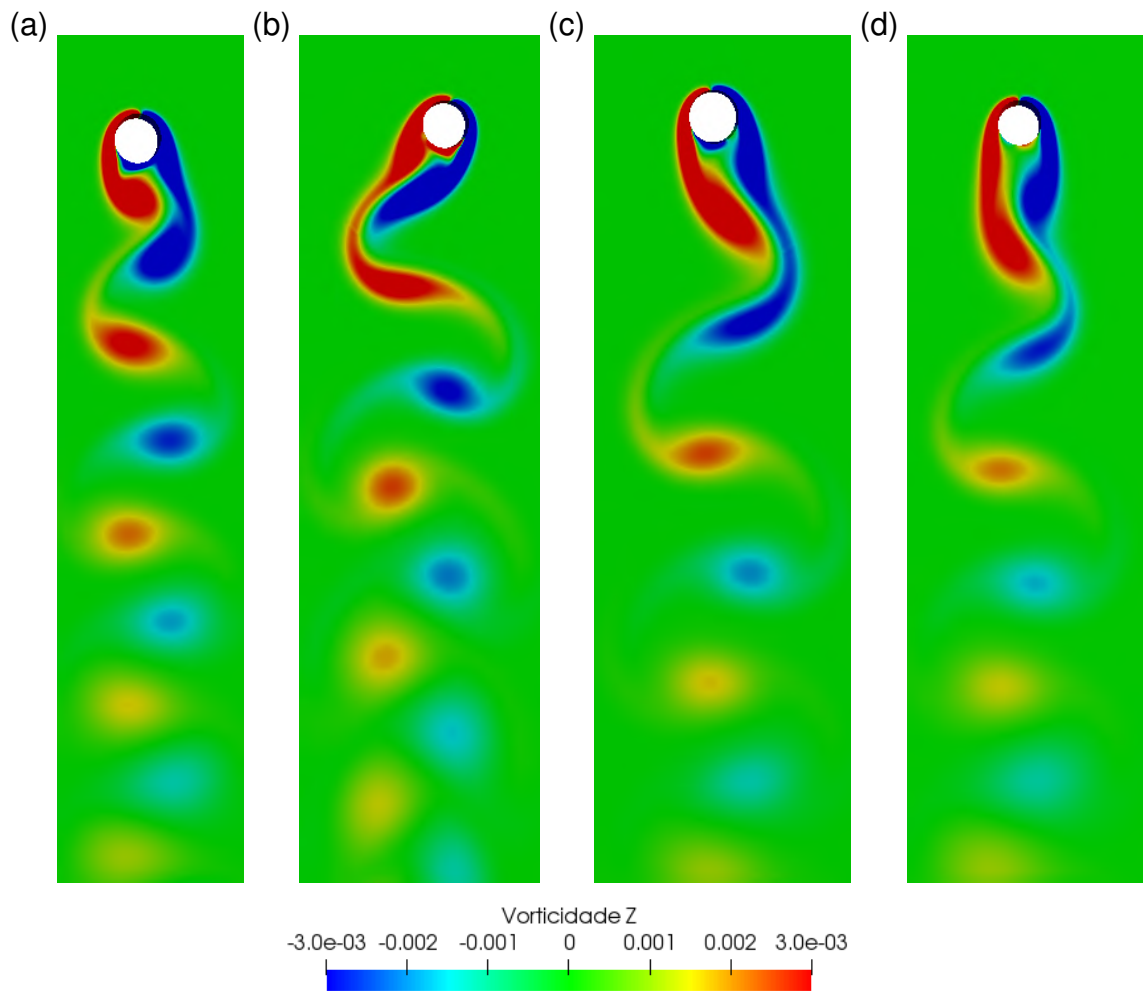


Fonte: Autora (2019).

As maiores amplitudes de movimento transversal ao escoamento ocorreram para a velocidade reduzida $Vr = 5$, assim como o maior valor de $C_{L,rms}$, o que leva à inferência de que essa é uma velocidade reduzida crítica de projeto, devendo ser evitada. Nesse caso, $f_y = 3,20e^{-04}$, $f_n = 3,21e^{-04}$ e $f_s = 3,20e^{-04}$, as quais são deveras próximas e conduzem à maior amplitude de vibração transversal.

Analisando a vorticidade para cada velocidade reduzida, Figura 38, observa-se o crescimento longitudinal dos vórtices antes de se desprenderem da coluna, o que faz com que a frequência de liberação de vórtices diminua com o aumento da velocidade reduzida.

Figura 38 – Vorticidade para as velocidades reduzidas (a) 5, (b) 6 (c) 7 e (d) 8, tempo adimensional 160.



Fonte: Autora (2019).

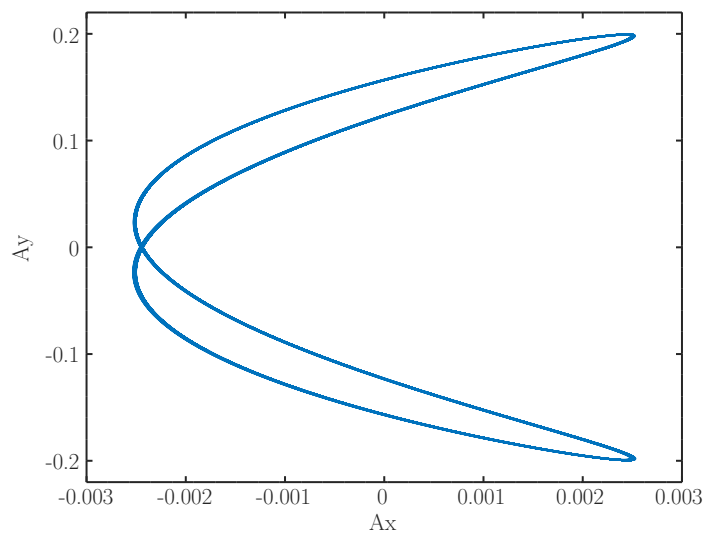
4.5 VIV COM 2 GDL PARA SEÇÃO QUADRADA

Para o VIV de uma seção quadrada com razão de massa $m^* = 10$, não foram encontrados resultados numéricos ou experimentais na literatura. Todavia, as

simulações seguem os mesmos parâmetros da seção circular, para que o resultados possam ser comparados entre si, portanto, $m^* = 10$, $\zeta = 0$, $Vr = 6,024$ e $Re = 100$.

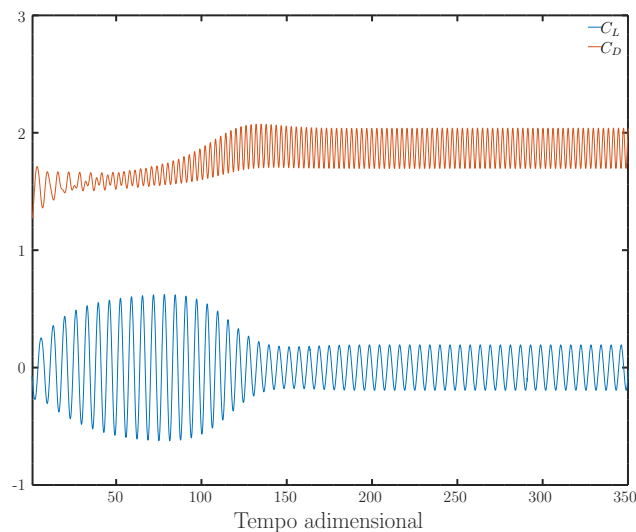
Foram obtidas as amplitudes $A_y = 0,199$ e $A_x = 0,002$, sendo que o movimento acoplado apresenta um formato de oito, Figura 39. A frequência de vibração na direção transversal ao escoamento possui o valor de $f_y = 3,11e^{-04}$ e na direção do escoamento é equivalente a $f_x = 2f_y$. Como $f_y/f_n = 1,04$, o sistema está em batimento. Os resultados dos coeficientes foram $\overline{C_D} = 1,868$, $C_{L,rms} = 0,133$ e $C_{D,rms} = 0,121$, Figura 40.

Figura 39 – Movimento acoplado da coluna com seção quadrada.



Fonte: Autora (2019).

Figura 40 – Histórico de tempo para C_D e C_L para $\alpha = 0^\circ$.

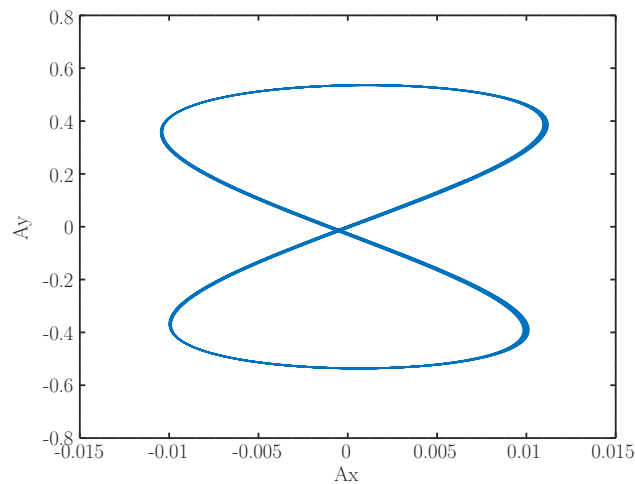


Fonte: Autora (2019).

4.6 VIV COM 2 GDL PARA SEÇÃO DIAMANTE

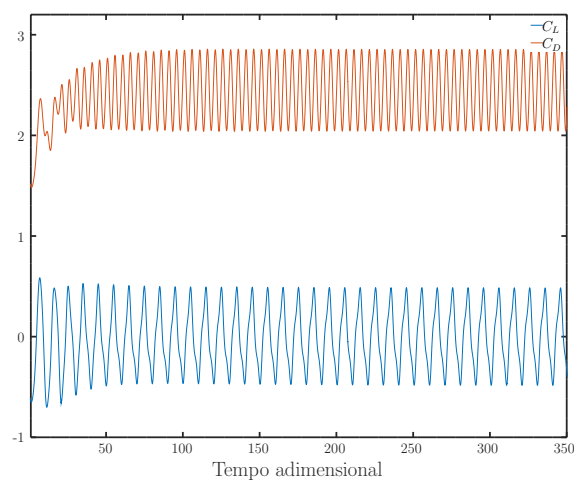
Para a seção diamante (45°), identificou-se $A_y = 0,536$ e $A_x = 0,007$, sendo que novamente surge o formato de oito no movimento acoplado, Figura 41. A amplitude de oscilação em x é muito menor que a amplitude em y e $f_x = 2f_y$, sendo $f_y = 2,00e^{-04}Hz$. A razão de frequências é $f_y/f_n = 1,05$, destacando-se novamente que o sistema está em batimento. Os coeficientes obtidos foram $\overline{C_D} = 2,445$, $C_{L,rms} = 0,301$, $C_{D,rms} = 0,286$, Figura 42. Também é possível constatar que a emissão de vórtices entra em equilíbrio em um menor intervalo de tempo do que a seção quadrada com $\alpha = 0^\circ$.

Figura 41 – Movimento acoplado, $\alpha = 45^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

Figura 42 – Histórico de tempo para C_D e C_L para $\alpha = 45^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

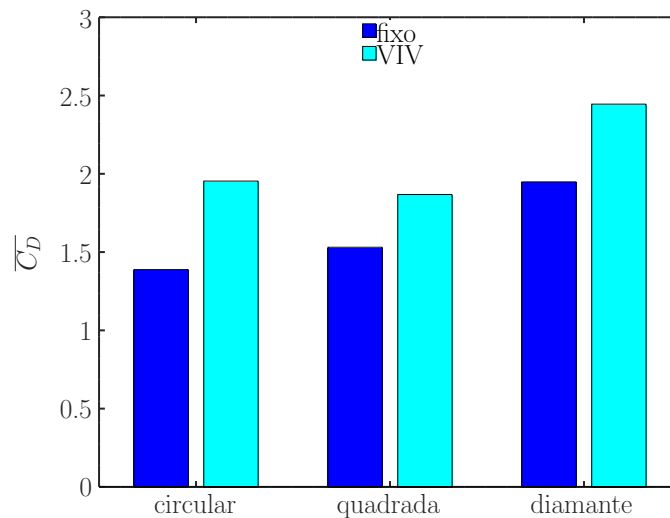
Outrossim, como dito na seção de colunas fixas, foram avaliados os ângulos de

incidência do escoamento $\alpha = 15^\circ$ e $\alpha = 30^\circ$. Os resultados encontram-se no Apêndice B.

4.7 COMPARAÇÃO ENTRE COLUNAS FIXAS E EM VIV

A seguir são comparados os resultados das colunas circular e quadrada nas situações fixa e com 2 graus de liberdade. Nota-se, portanto, o aumento do coeficiente médio de arrasto quando a coluna possui grau de liberdade, Figura 43. Esse efeito é chamado de amplificação do arrasto. Blevins (1977) relata em seu livro esse comportamento, enunciando que a média do coeficiente de arrasto aumenta de acordo com a amplitude de oscilação transversal, para a condição de *lock-in*. Desse modo, como as maiores amplitudes transversais ocorreram para as seções circular e diamante, são essas mesmas seções que possuem o maior aumento no $\overline{C_D}$. Com uma amplitude de deslocamento transversal menor, a amplificação para a seção quadrada é menor.

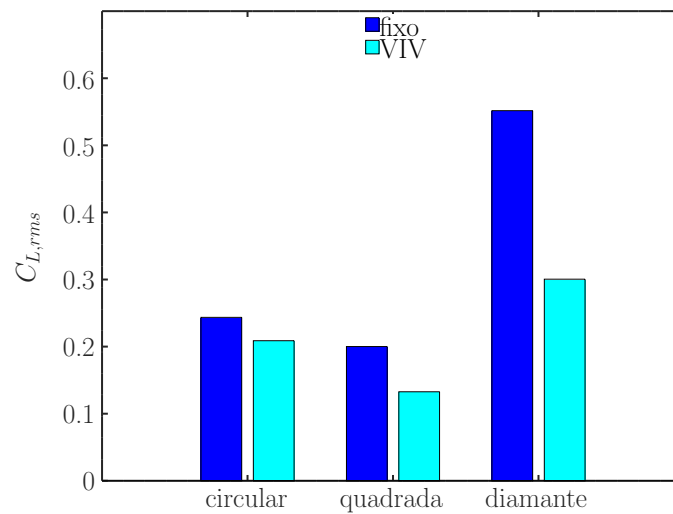
Figura 43 – Valores de $\overline{C_D}$ para as colunas isoladas.



Fonte: Autora (2019).

Para o valor rms do coeficiente de sustentação, o comportamento é contrário, Figura 44, indicando a diminuição da amplitude da força de sustentação quando o corpo possui dois graus de liberdade.

Figura 44 – Valores de $C_{L,rms}$ para as colunas isoladas.



Fonte: Autora (2019).

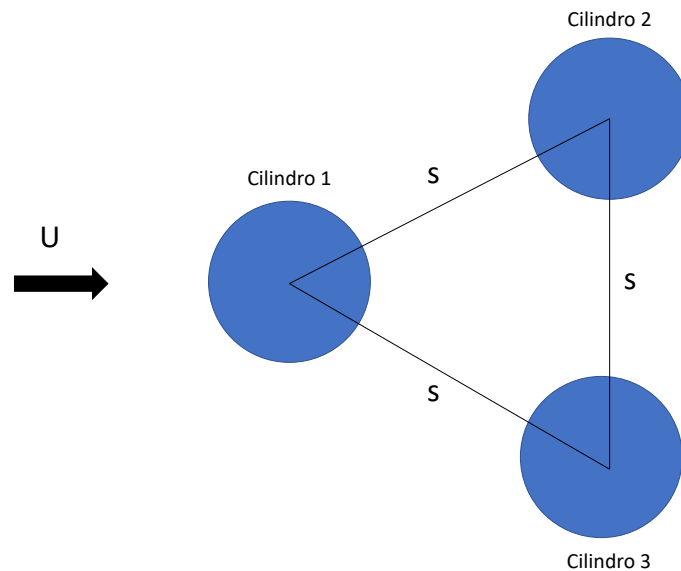
Dos casos apresentados, a coluna com 2 GDL e seção diamante apresenta o maior valor de $\overline{C_D}$, o maior valor de $C_{L,rms}$ ocorre para essa mesma seção, porém, para a condição fixa. O menor valor de $\overline{C_D}$ é encontrado para a coluna circular fixa e o menor valor de $C_{L,rms}$ é identificado para a coluna de seção quadrada com 2GDL.

Nas próximas seções serão apresentados os resultados para os arranjos de colunas, os quais também serão comparados com os valores das colunas isoladas, apresentados até o momento.

4.8 ARRANJOS FIXOS COM 3 COLUNAS DE SEÇÃO CIRCULAR

Para que mais uma vez os resultados possam ser confrontados com os da literatura, realizou-se primeiramente a análise das forças em cada coluna separadamente, no caso do ângulo de escoamento igual a zero. A malha utilizada possui a mesma ordem de h_1 e o incremento de tempo é t_1 . A Figura 45 mostra a nomenclatura usada para o caso com três cilindros e $\alpha = 0^\circ$.

Figura 45 – Três cilindros com $\alpha = 0^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

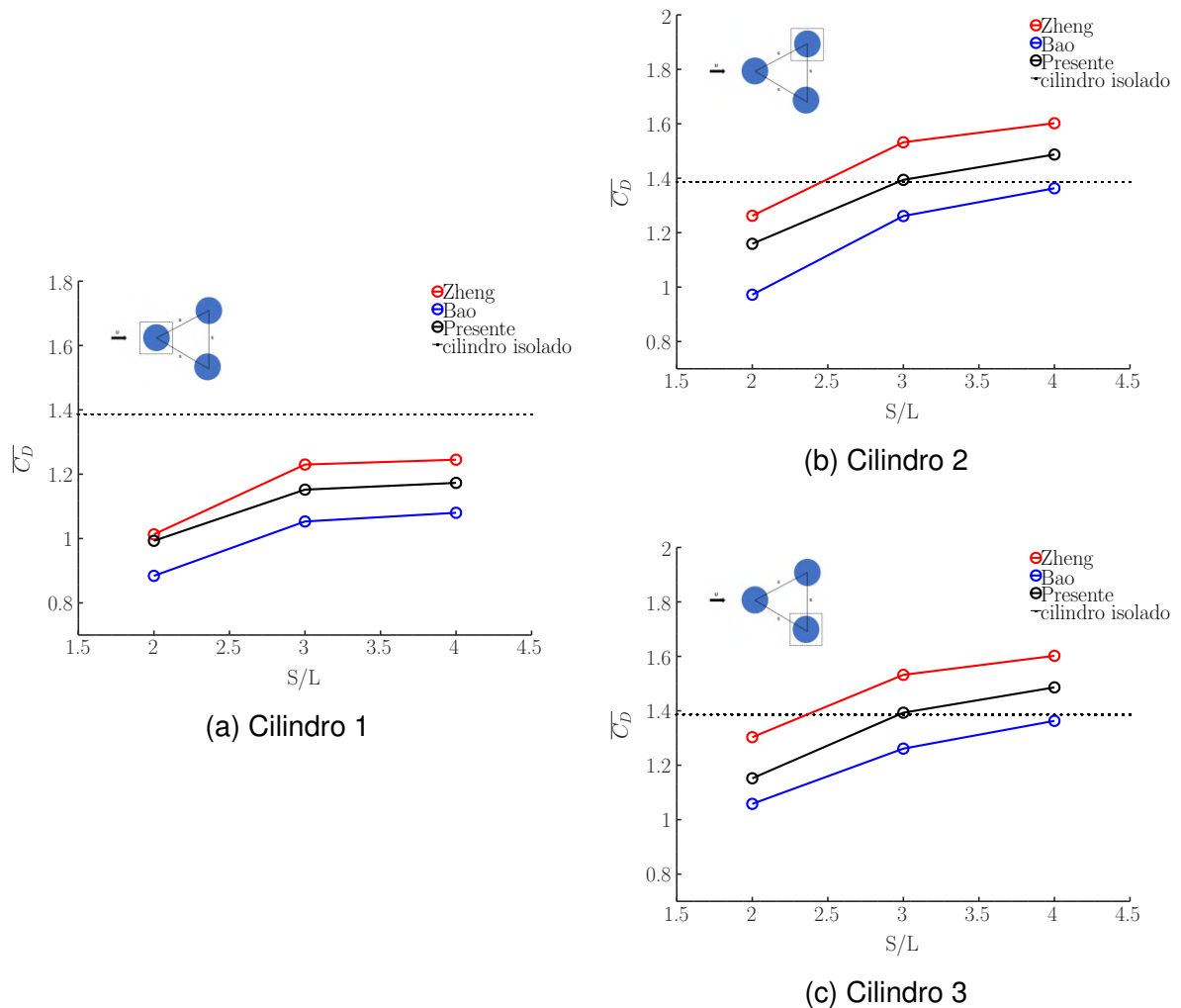
Os presentes resultados e aqueles de Zheng, Zhang e Lv (2016) e Bao, Zhou e Huang (2010) são mostrados nas Figuras 46, 47, 48 e 49, sendo que os marcadores vermelhos representam os resultados de Zheng, Zhang e Lv (2016), os marcadores azuis os resultados de Bao, Zhou e Huang (2010) e os marcadores pretos os resultados do presente estudo. Também é apresentado o valor do cilindro isolado calculado anteriormente, linha preta, e na parte superior de cada gráfico é ilustrado a qual coluna o resultado se refere.

A média do coeficiente de arrasto, Figura 46, cresce com o aumento da distância relativa entre colunas. Os valores para as colunas lado a lado são iguais. Além disso, os valores para $S/L = 3$ são muito próximos ao do cilindro isolado, para os cilindros a jusante. O maior valor de $\overline{C_D}$ ocorre para os cilindros a jusante em $S/L = 4$, $\overline{C_D} = 1,487$, e o menor valor ocorre em $S/L = 2$ para o cilindro a montante, $\overline{C_D} = 0,993$.

O valor quadrático médio do coeficiente de sustentação, Figura 47, foi menor para a coluna a montante. Os resultados apresentam discrepâncias entre autores principalmente para $S/L = 2$ e $S/L = 4$. O menor valor, $C_{D,rms} = 0,001$, ocorre para $S/L = 3$ no cilindro a montante e o maior valor, $C_{D,rms} = 0,036$, para as colunas a jusante em $S/L = 2$.

O valor quadrático médio do coeficiente de sustentação, Figura 48, é mais baixo na coluna a montante, próximo a zero em todos os casos. Esse coeficiente aumenta com o espaçamento para os cilindros a jusante, os quais são afetados pela esteira da coluna a montante. Novamente, os valores para $S/L = 3$ são os mais próximos do cilindro isolado, o comportamento diferente para os outros espaçamentos pode ser devido ao fato das colunas a jusante estarem dentro da zona de ativação criada pela coluna a montante, conforme o comportamento encontrado nos experimento de

Figura 46 – $\overline{C_D}$ para os cilindros (a)1, (b) 2 e (c) 3 quando $\alpha = 0^\circ$.



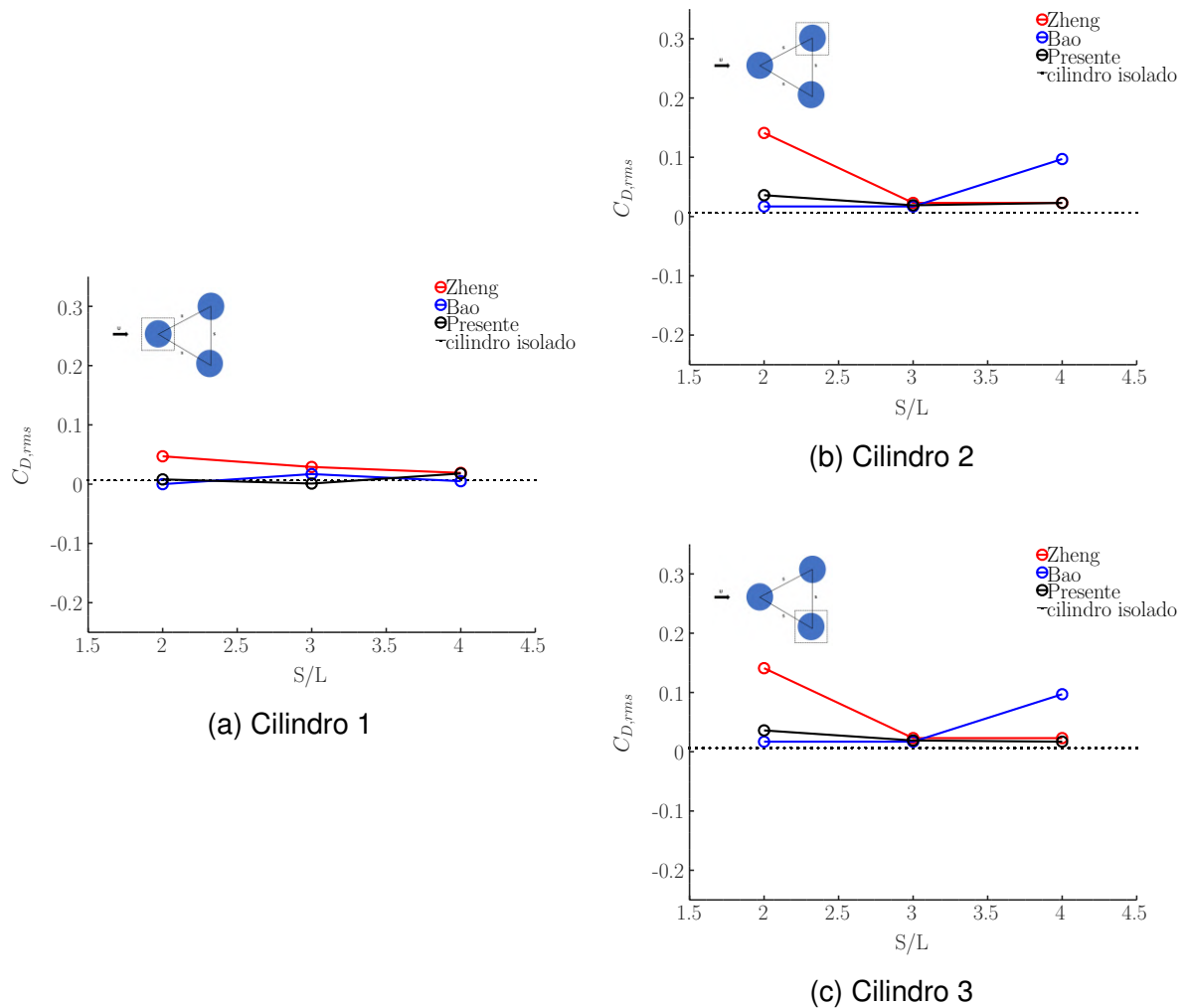
Fonte: Autora (2019).

Gonçalves et al. (2019). O $C_{L,rms}$ mais alto, $C_{L,rms} = 0,374$, ocorreu para as colunas a jusante em $S/L = 4$ e o menor, $C_{L,rms} = 0,006$, ocorreu para a coluna a montante em $S/L = 2$. Nesse caso fica claro também a semelhança com os resultados de Bao, Zhou e Huang (2010).

O valor quadrático médio do coeficiente de força de arrasto, Figura 49, mostra o comportamento de atração entre as colunas a jusante, e os valores tendem a zero conforme aumenta o espaçamento. Para a coluna a montante, os valores permanecem próximos a zero. O maior absoluto, $C_{L,rms} = 0,081$, ocorreu para as colunas a jusante em $S/L = 3$, o menor valor é zero, como dito anteriormente.

Observa-se que existem discrepâncias entre os resultados dos autores citados e os do presente estudo. Porém, satisfatoriamente, os presentes resultados estão dentro da faixa dos resultados citados. Essas diferenças podem advir dos diferentes métodos de discretização utilizados, diferentes tamanhos de malha e incremento de

Figura 47 – $C_{D,rms}$ para os cilindros (a) 1, (b) 2 e (c) 3 quando $\alpha = 0^\circ$.



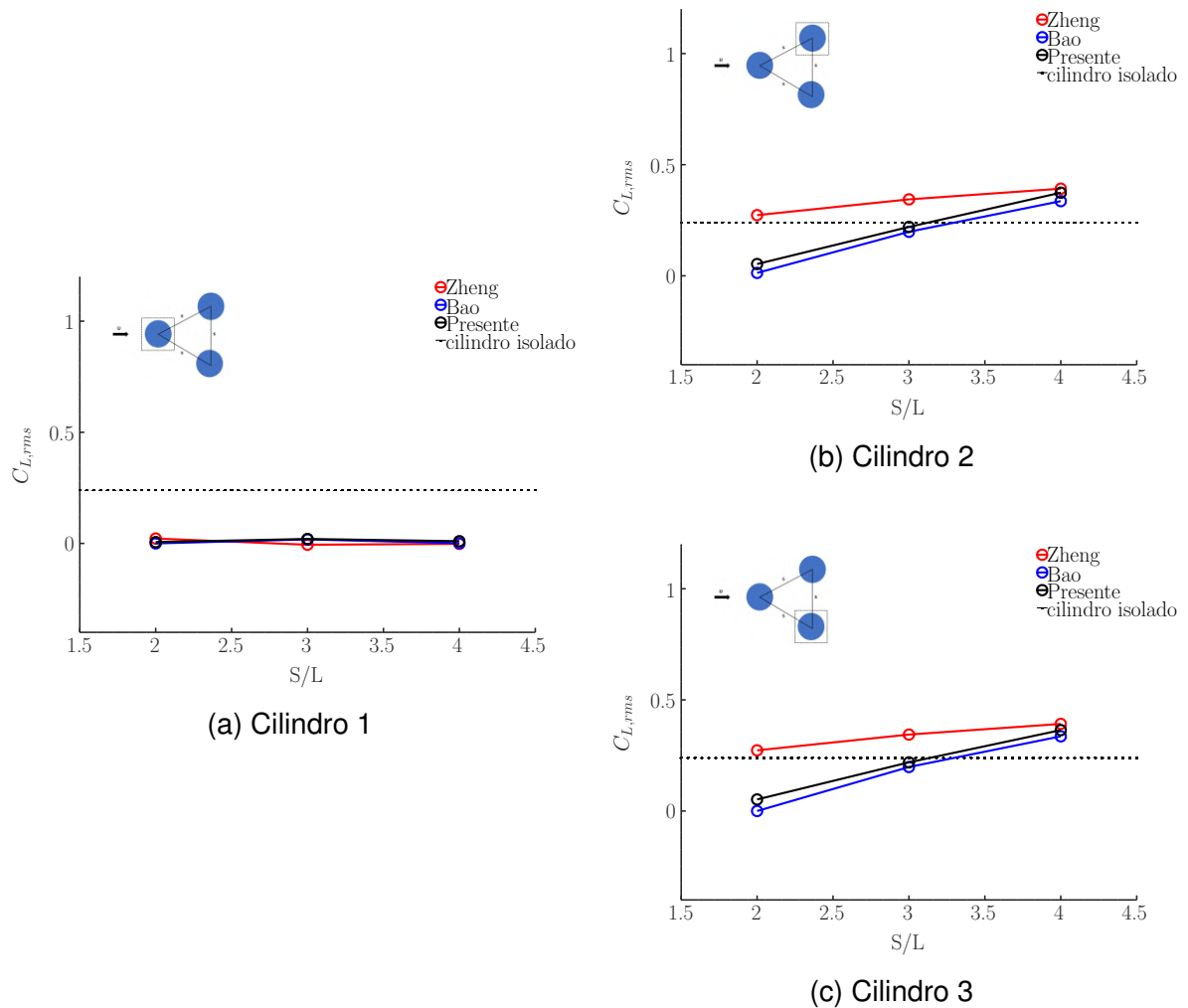
Fonte: Autora (2019).

tempo, por exemplo.

Após a realização dessas análises, serão avaliados os valores totais das forças para as 3 colunas. Os valores dos coeficientes de força total consideram a área projetada da respectiva coluna multiplicada pelo número de colunas. Assim, pode-se comparar o valor de todo o sistema com a coluna isolada. As Figuras 50, 51 e 52 mostram o histórico de tempo dos coeficientes de arrasto e sustentação resultantes para cada espaçamento, sendo a curva em vermelho o coeficiente de arrasto e a curva em azul o coeficiente de sustentação.

Para $S/L = 3$ e $S/L = 4$, as forças possuem um sinal que a partir de determinado valor de tempo encontram uma amplitude e frequência definidas. Entretanto, do histórico para C_D e C_L para $S/L = 2$, observa-se que as amplitudes dos coeficientes de arrasto e de sustentação não possuem essa característica. Portanto, para melhor descrever esses resultados, foi realizada a análise de incerteza para o

Figura 48 – $C_{L,rms}$ para os cilindros (a) 1, (b) 2 e (c) 3 quando $\alpha = 0^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

mesmo, de acordo com os parâmetros apresentados na subseção 3.7.2.

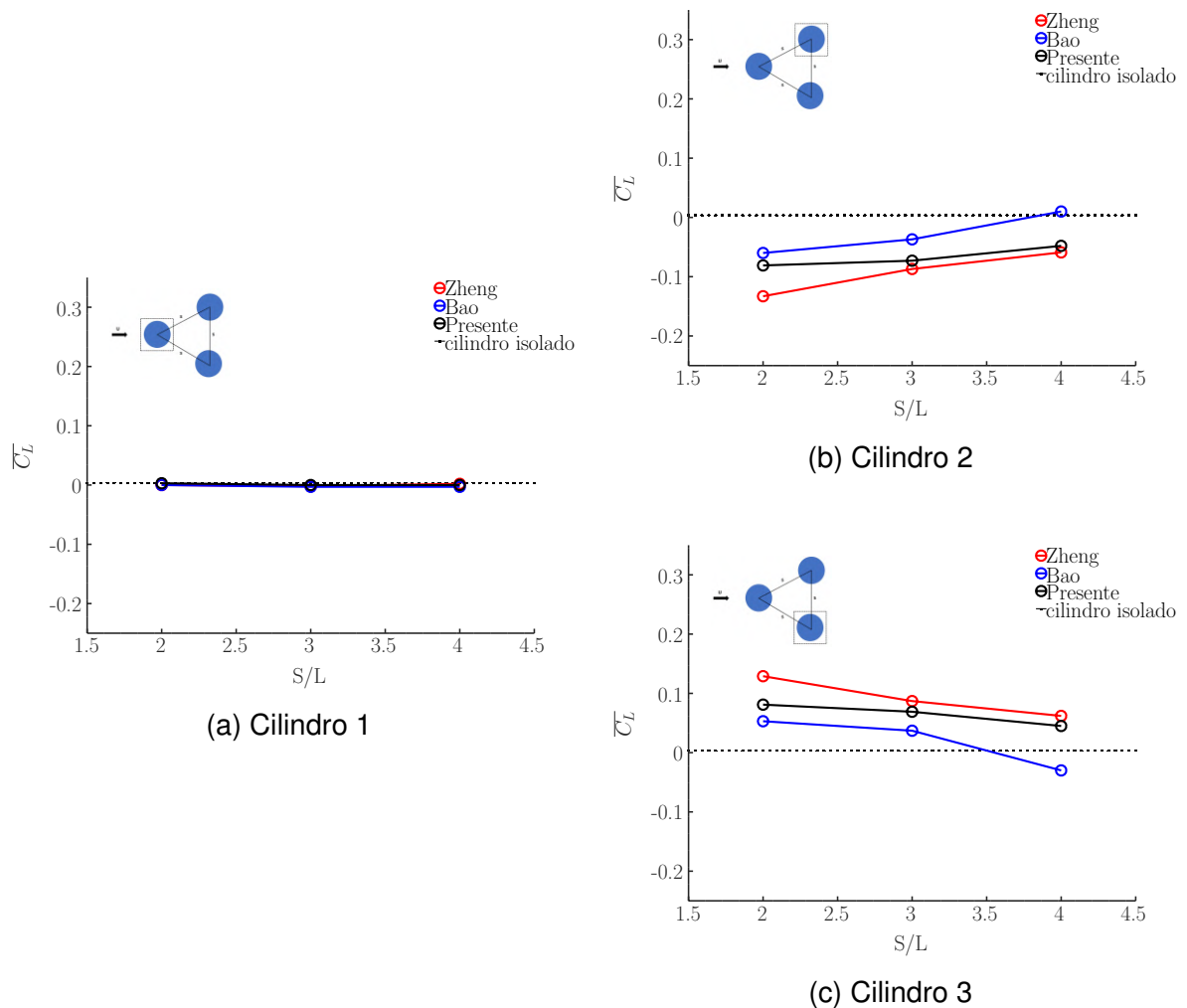
Assim, para o coeficiente de arrasto, foi encontrada uma incerteza numérica de $U(\overline{C_D}) = 0,017936$ e $\overline{C_{D,exact}} = 1,0932$. Para $C_{L,rms}$ foi encontrada uma incerteza de $U(C_{L,rms}) = 0,0050708$ e $C_{L,rms,exact} = 0,029896$. Para o número de Strouhal foi identificada uma incerteza de $U(St) = 0,0017501$ e $St_{exact} = 0,11930$. Assim, os intervalos para a malha mais refinada em tamanho de célula e incremento de tempo são os seguintes:

$$1,0841 < \overline{C_D} < 1,1199$$

$$0,02079 < C_{L,rms} < 0,03093$$

$$0,1180 < St < 0,1216$$

Figura 49 – $\overline{C_L}$ para os cilindros (a) 1, (b) 2 e (c) 3 quando $\alpha = 0^\circ$.



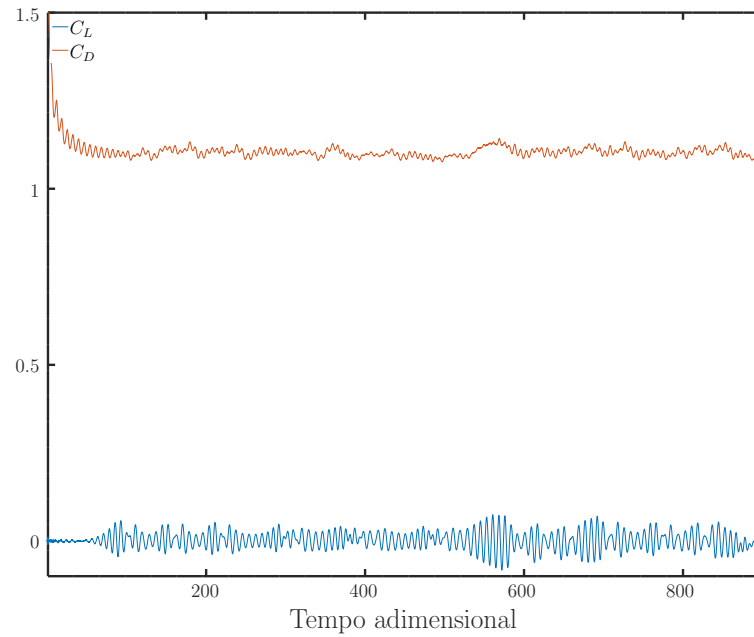
Fonte: Autora (2019).

Desse modo, conclui-se que os resultados com tal característica não são um problema de malha ou incremento de tempo, mas sim uma característica do escoamento.

Dessarte, para melhor entender o escoamento nesses arranjos, foram avaliados os vórtices através da análise da vorticidade na direção perpendicular ao plano do escoamento.

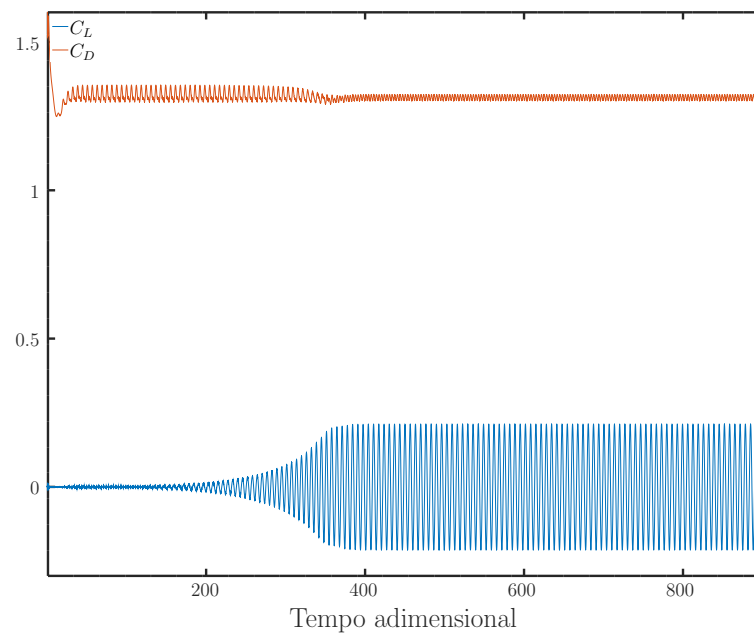
Para $S/L = 2$, Figura 53, não encontrou-se um padrão de vórtices, além disso, o escoamento que surge é assimétrico, uma esteira mais larga é formada atrás do cilindro 3. Lam e Cheung (1988) em seus experimentos de arranjos triangulares de cilindros em $Re = 2,1 \times 10^3$ e $3,5 \times 10^3$, também relata esse comportamento e ressalta que fato da esteira ser mais ampla no cilindro inferior ou superior depende das condições de contorno. Lam e Cheung (1988) chama esse comportamento de escoamento biestável, sendo que o escoamento pode ir em direção ao cilindro acima ou abaixo, formando

Figura 50 – Histórico para C_D e C_L para $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

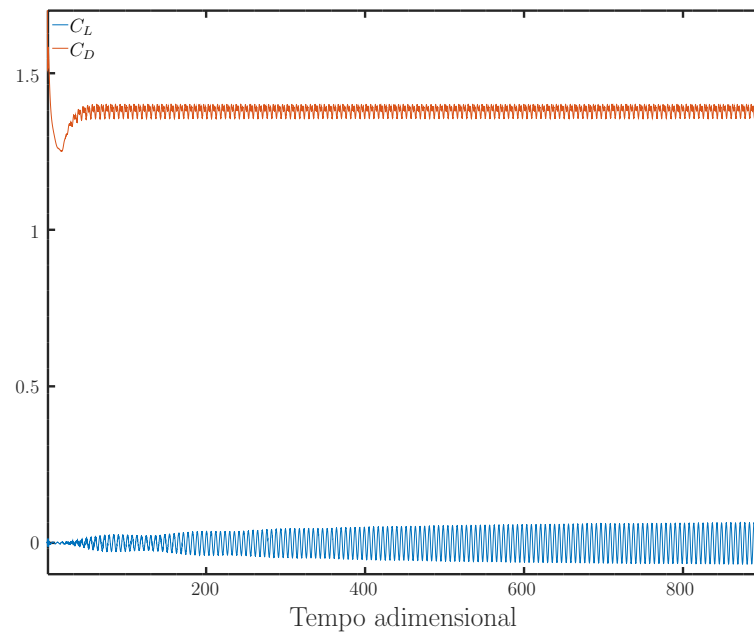
Figura 51 – Histórico para C_D e C_L para $S/L = 3$ e $\alpha = 0^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

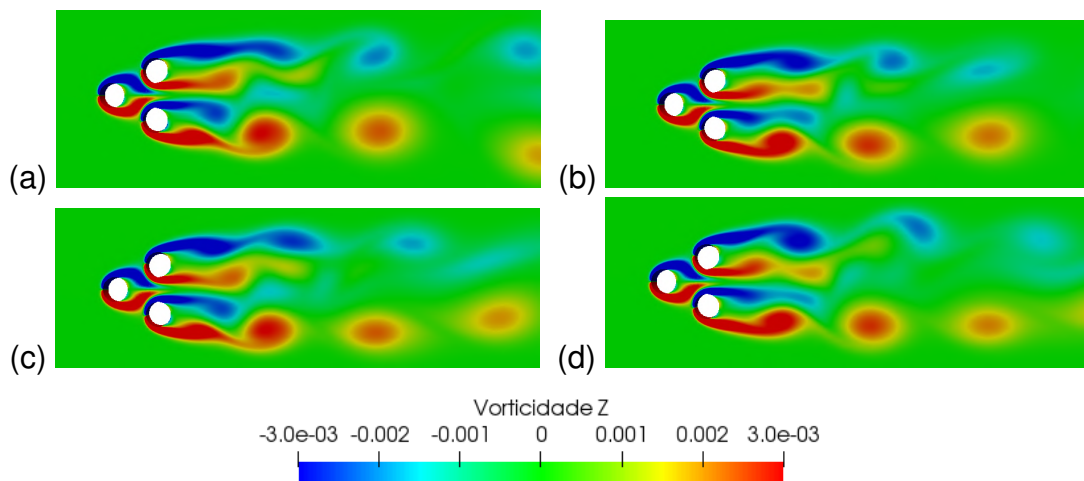
uma esteira mais larga e uma mais esteira com frequências diferentes e, uma vez a esteira estabelecida, essa permanecerá dessa maneira.

Figura 52 – Histórico para C_D e C_L para $S/L = 4$ e $\alpha = 0^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

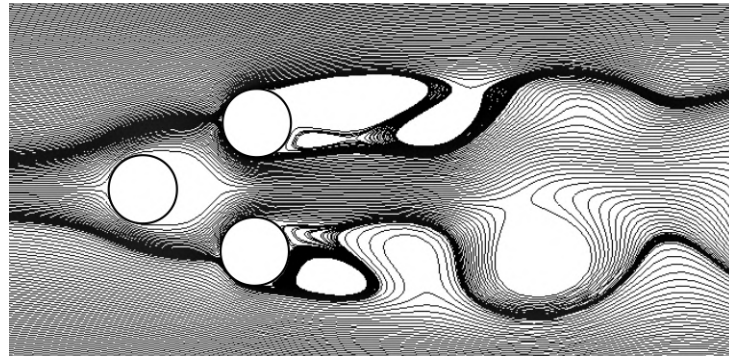
Figura 53 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$ para os tempos adimensionais (a) 436, (b) 440, (c) 448 e (d) 448.



Fonte: Autora (2019).

As linhas de corrente para $S/L = 2$ são mostradas na Figura 54, onde é possível perceber que a corrente vinda do cilindro a montante é comprimida para passar entre os cilindros a jusante.

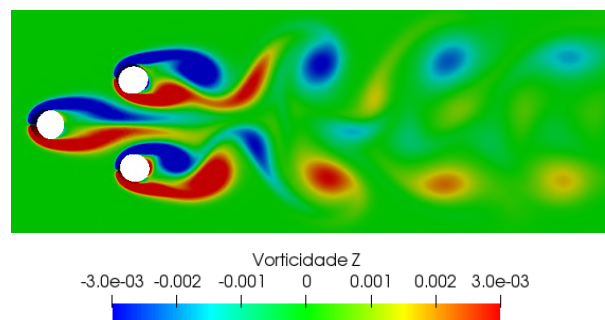
Figura 54 – Linhas de corrente para $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

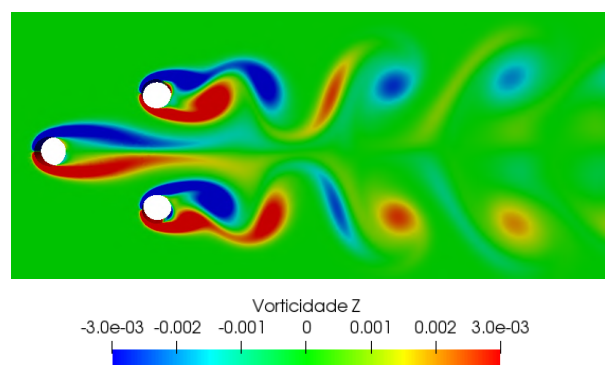
Já para o caso de $S/L = 3$, Figura 55, fica claro a emissão de vórtices sincronizados nos cilindros 2 e 3, enquanto que a esteira do cilindro 1 estreita-se no espaço entre os cilindros a jusante. Observando $S/L = 4$, Figura 56, tem-se igualmente vórtices sincronizados e há influência da esteira do cilindro a montante no escoamento que chega aos cilindros 2 e 3, o que aumenta o arrasto nos mesmos. Consta-se então, conforme averiguado por Lam e Cheung (1988), que conforme aumenta o espaçamento, o efeito de escoamento biestável é eliminado. Nesses casos, também ocorre recirculação atrás do cilindro a montante, Figura 57.

Figura 55 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 0^\circ$.



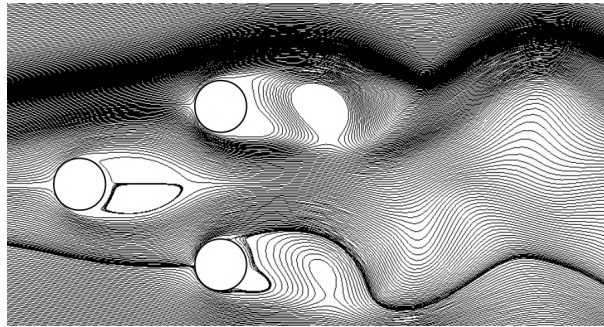
Fonte: Autora (2019).

Figura 56 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 0^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

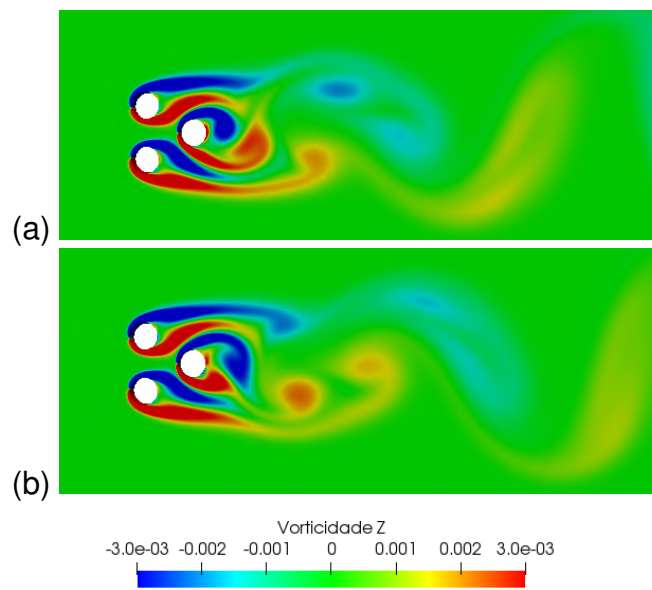
Figura 57 – Linhas de corrente para $S/L = 3$ e $\alpha = 0^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

Ao se aplicar o ângulo de incidência do escoamento de $\alpha = 180^\circ$, todos os resultados de força se tornam periódicos, com amplitudes e frequências invariáveis. Para $S/L = 2$, uma esteira simétrica ocorre nos cilindros lado a lado, Figura 58, devido à simetria do escoamento, e os vórtices emitidos pela coluna a jusante logo são dissipados pelos vórtices das colunas laterais.

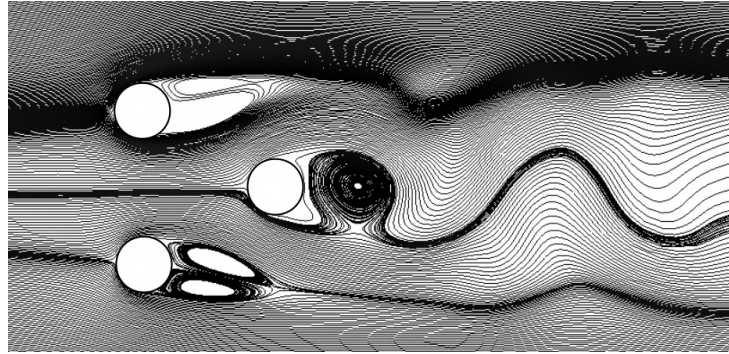
Figura 58 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 436 e (b) 440.



Fonte: Autora (2019).

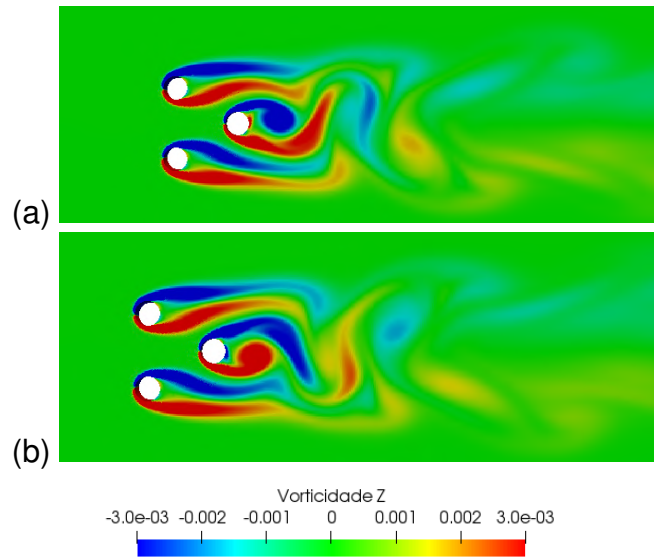
Para $S/L = 3$, o desprendimento de vórtices é formado atrás do cilindro a jusante, percebe-se também que, devido à presença desse cilindro, as camadas de cisalhamento dos lados internos dos cilindros a montante são desviadas para fora, Figura 59, e os vórtices desenvolvidos neles são visivelmente suprimidos pelo cilindro a jusante, Figura 60.

Figura 59 – Linhas de corrente para $S/L = 3$ e $\alpha = 180^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

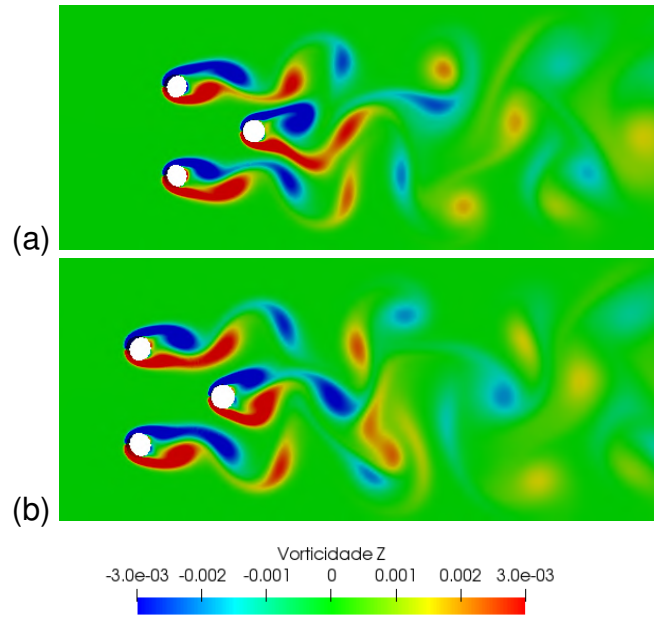
Figura 60 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 436 e (b) 440.



Fonte: Autora (2019).

Quando o espaçamento entre colunas é suficientemente grande, como o caso de $S/L = 4$, o desprendimento de vórtices é totalmente desenvolvido atrás de todos os cilindros, como pode ser visto na Figura 61. Os cilindros lado a lado, nesse caso, emitem vórtices sincronizadamente.

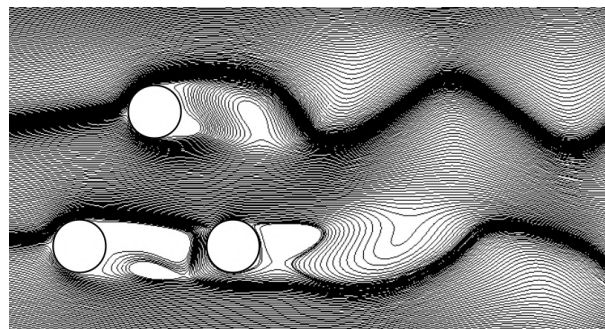
Figura 61 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 436 e (b) 440.



Fonte: Autora (2019).

Com o ângulo de 90° , os cilindros 2 e 3 estão na posição *tandem* em relação ao escoamento que se aproxima e o cilindro 1 fica no lado superior desses. A característica proeminente nesse ângulo é que o escoamento que passa pelo espaço entre os cilindros 1 e 2 junta-se ao lado superior frontal do cilindro 3 e é dividido em duas partes entre os cilindros 1 e 3. Por outro lado, o escoamento através do espaço entre os cilindros 2 e 3 está sempre descendo, comportamento também observado por Bao, Zhou e Huang (2010), formando uma esteira mais estreita e uma mais ampla atrás dos cilindros 1 e 3, respectivamente, Figura 62.

Figura 62 – Linhas de corrente para $S/L = 3$ e $\alpha = 90^\circ$.

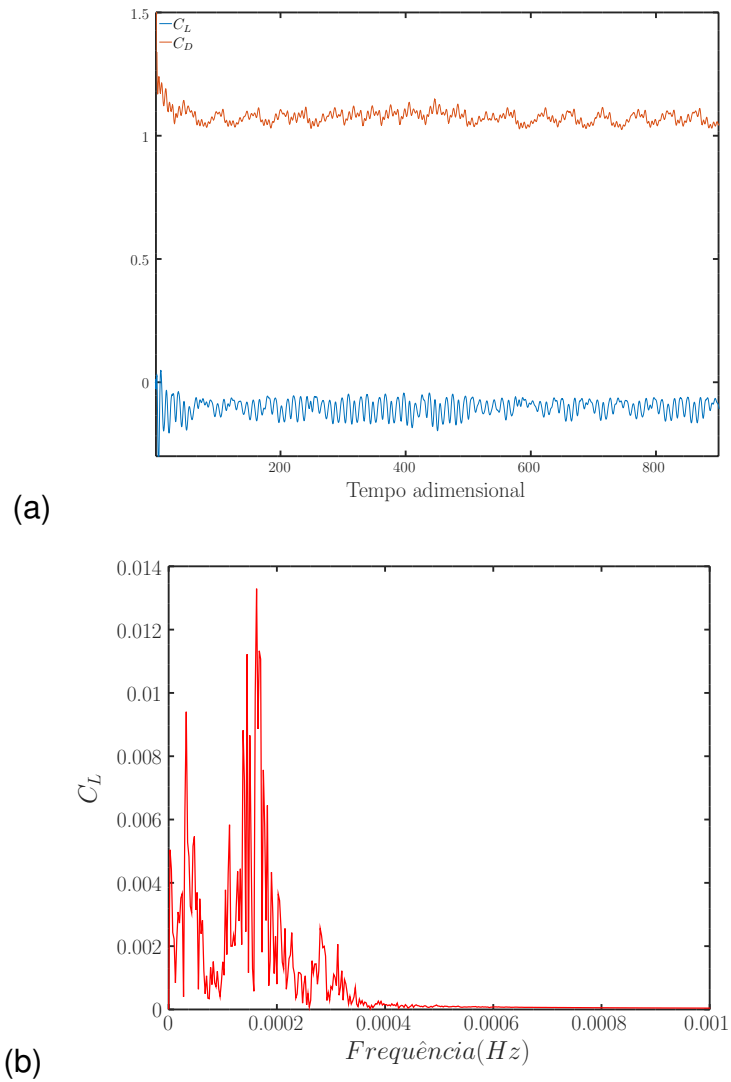


Fonte: Autora (2019).

Nesse ângulo, é esperado que as forças não entrem em equilíbrio, uma vez que o escoamento não é simétrico. Para $S/L = 2$ isso realmente ocorre. A Figura 63 (a) mostra o histórico de tempo para $S/L = 2$ e $\alpha = 90^\circ$, onde é possível identificar que as amplitudes dos coeficientes são variáveis ao longo do tempo e em (b) observa-se

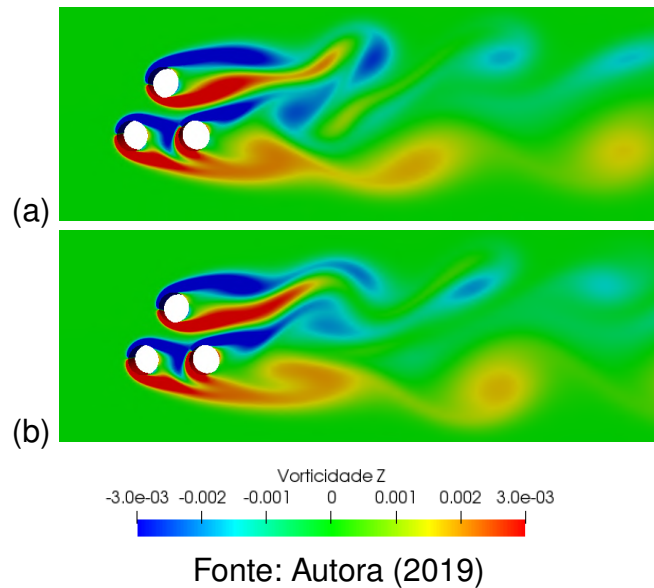
a variação das frequências. Bao, Zhou e Huang (2010) também encontrou em suas simulações flutuações irregulares das forças para $S/L = 2$ e $\alpha = 90^\circ$. Da Figura 64 é possível observar que não há um padrão nos vórtices emitidos.

Figura 63 – (a) Histórico para C_D e C_L e (b) espectro de frequência para $S/L = 2$ e $\alpha = 90^\circ$.



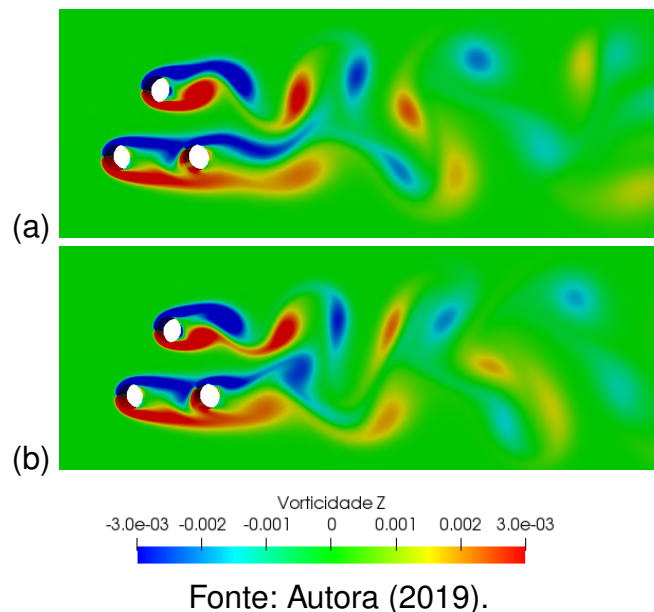
Fonte: Autora (2019).

Figura 64 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 176 e (b) 180.



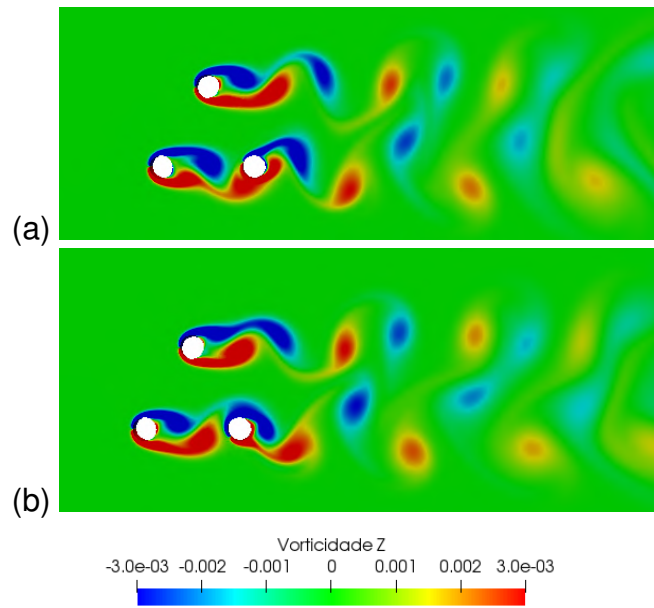
Porém, para os casos com $S/L = 3$ e $S/L = 4$ o sistema alcança equilíbrio, possuindo um sinal modulado. Para $S/L = 3$, Figura 65, um vórtice totalmente desenvolvido é formado e desprendido atrás do cilindro acima e, como dito anteriormente, uma esteira mais larga se forma atrás dos cilindros inferiores.

Figura 65 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 436 e (b) 440.



Para $S/L = 4$, Figura 66, ocorre o desprendimento de vórtices em todos os cilindros. A esteira do cilindro superior é praticamente independente e o cilindro inferior a montante interfere no escoamento que chega ao cilindro inferior a jusante, mudando seu regime de desprendimento de vórtices.

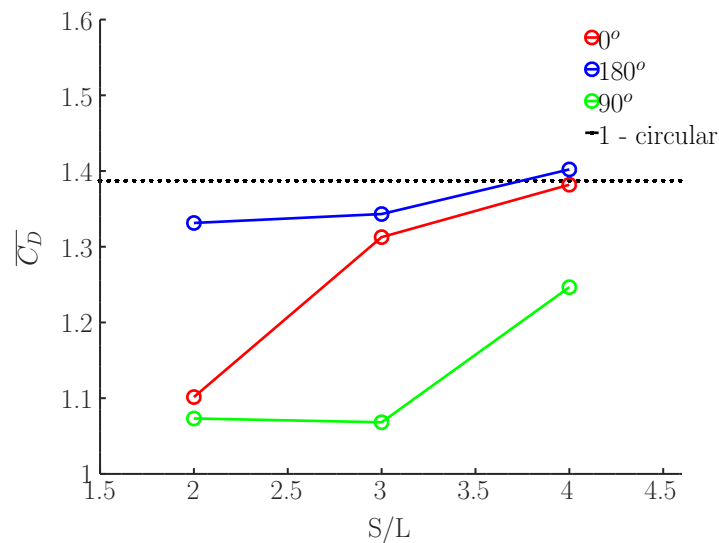
Figura 66 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 436 e (b) 440.



Fonte: Autora (2019).

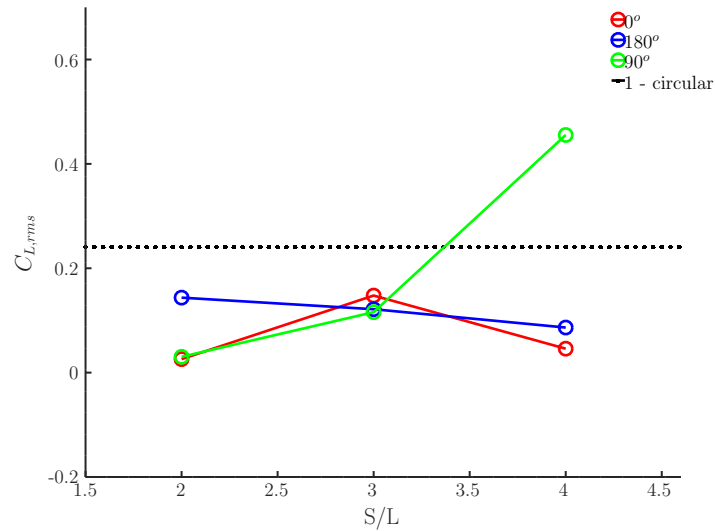
Agora serão comparados os resultados dos diferentes ângulos de incidência do escoamento (α) e dos diferentes distâncias relativas (S/L). As Figuras 67, 68 e 69 mostram os valores dos coeficientes de arrasto e de sustentação e o número de Strouhal total para as 3 seções circulares, com os ângulos de incidência 0° (linha vermelha), 90° (linha verde) e 180° (linha azul) e o valor para a coluna isolada (linha preta).

Figura 67 – Variação de $\overline{C_D}$ com S/L e com α .



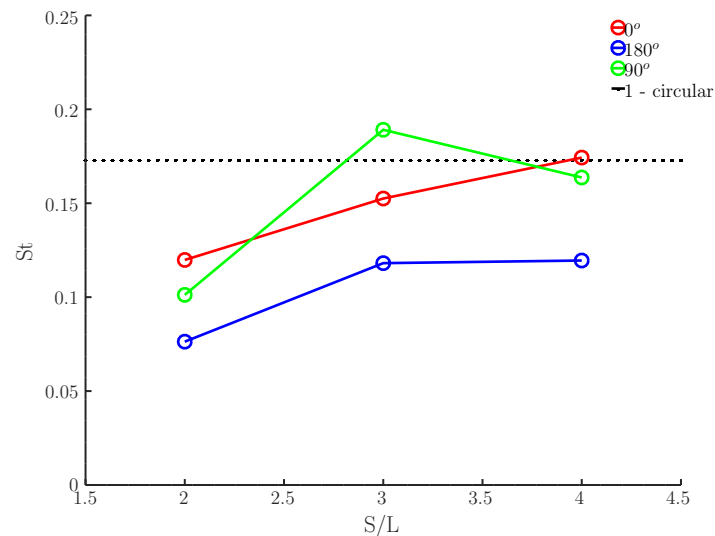
Fonte: Autora (2019).

Figura 68 – Variação de $C_{L,rms}$ com S/L e com α .



Fonte: Autora (2019).

Figura 69 – Variação de St com S/L e com α .



Fonte: Autora (2019).

Percebe-se que para $S/L = 4$ os valores de $\overline{C_D}$ são muito próximos para $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$ e também próximos ao valor da coluna isolada, mostrando que com uma maior distância entre colunas os efeitos da proximidade são menos significativos, assim como a influência dos ângulos $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$. Além disso, para o maior espaçamento, o escoamento atua diretamente em todos os cilindros, aumentando o arrasto e, a sustentação tende a diminuir pelo fato das esteiras das demais colunas não interferirem no escoamento que chega à coluna. Quanto ao St , para o maior espaçamento, tanto o ângulo $\alpha = 0^\circ$ como $\alpha = 90^\circ$ levam a valores muito próximos ao

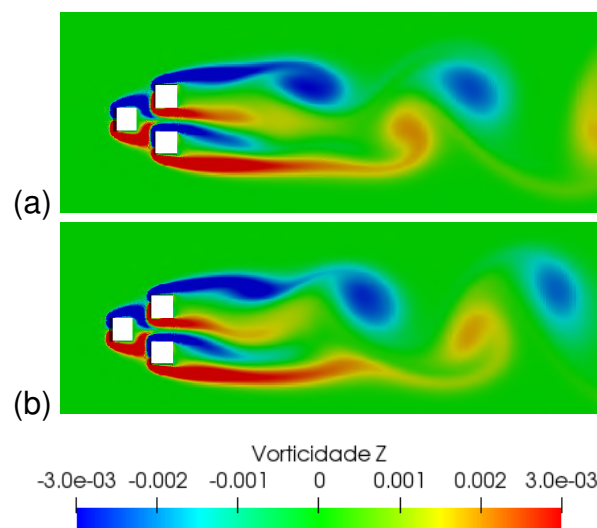
valor da coluna isolada pois os vórtices começam a ser emitidos na mesma frequência que para uma só coluna.

4.9 ARRANJOS FIXOS COM 3 COLUNAS DE SEÇÃO QUADRADA

Nesta seção serão apresentados os resultados dos arranjos com seção quadrada, sendo novamente aplicados os ângulos de incidência de escoamento de 0° , 90° e 180° e os espaçamentos $S/L = 2, 3$ e 4 .

No caso de $\alpha = 0^\circ$, para $S/L = 2$, a esteira da coluna a montante é suprimida pelas colunas a jusante, as quais emitem vórtices de maneira semelhante a coluna isolada, Figura 70. Essa supressão de vórtices da coluna a montante é chamada por Rahman et al. (2019) de blindagem estável.

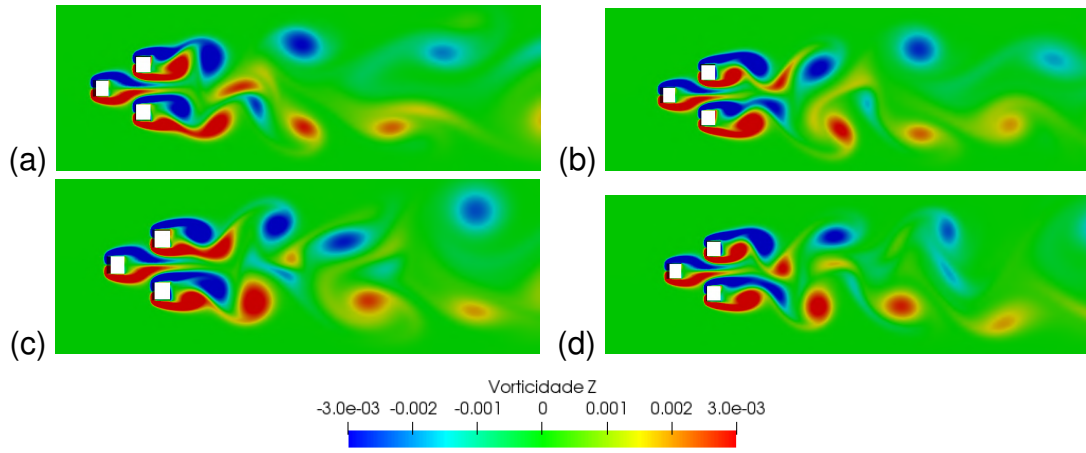
Figura 70 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$, tempos adimensionais (a) 600 e (b) 604.



Fonte: Autora (2019).

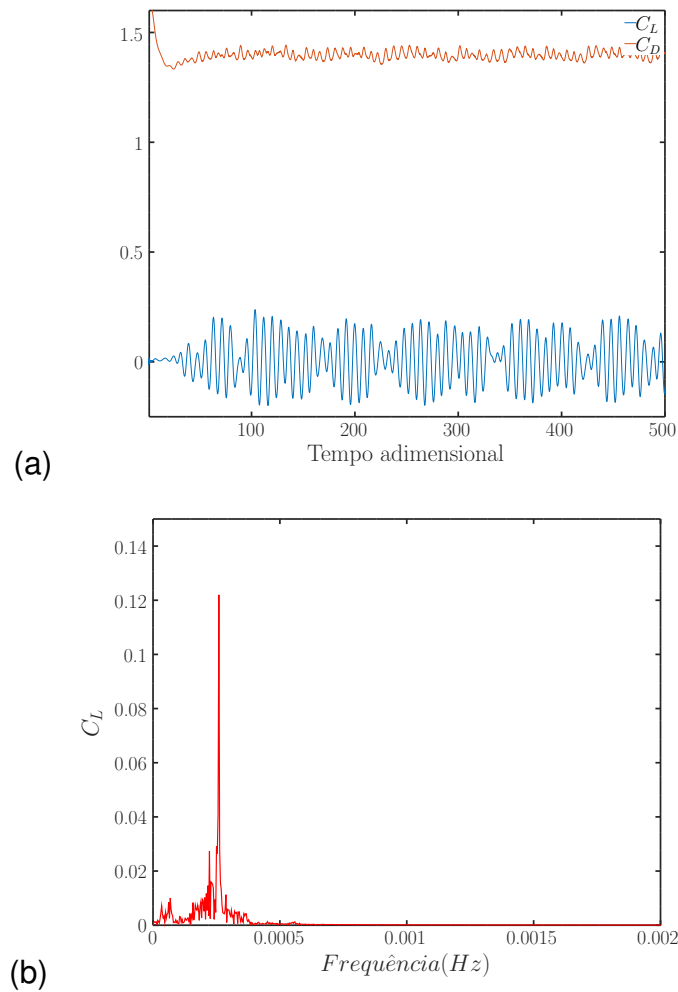
Para $S/L = 3$, Figura 71, não é identificado um padrão de vórtices no escoamento, levando a amplitudes e frequências variantes das forças de arrasto e de sustentação, Figura 72. Rahman et al. (2019) realizou simulações em $Re = 150$ para arranjo de colunas de seção quadrada e encontrou tal efeito para $S/L = 2$ e $S/L = 3$. Rahman et al. (2019) chama esse comportamento de escoamento modulado, devido às alterações irregulares dos coeficientes de força.

Figura 71 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 0^\circ$, tempos adimensionais (a) 600, (b) 604, (c) 608 e (d) 612.



Fonte: Autora (2019).

Figura 72 – (a) Histórico de tempo e (b) densidade espectral de frequência para para $S/L = 3$ e $\alpha = 0^\circ$.

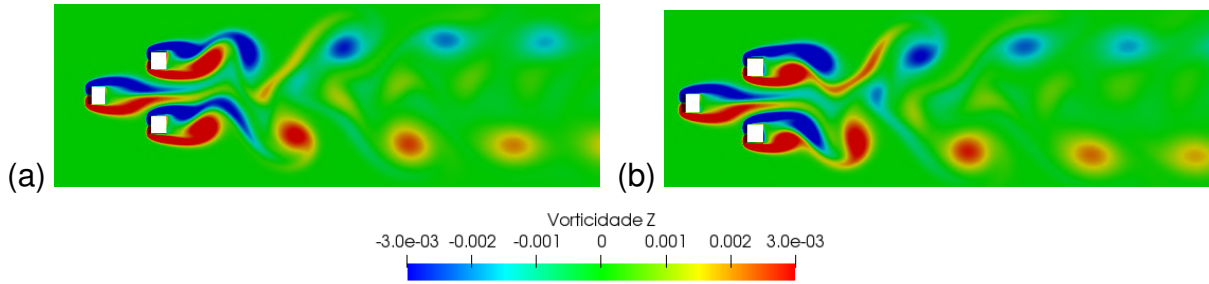


Fonte: Autora (2019).

Com $S/L = 4$, a esteira de vórtices possui um padrão bem visível, Figura 73,

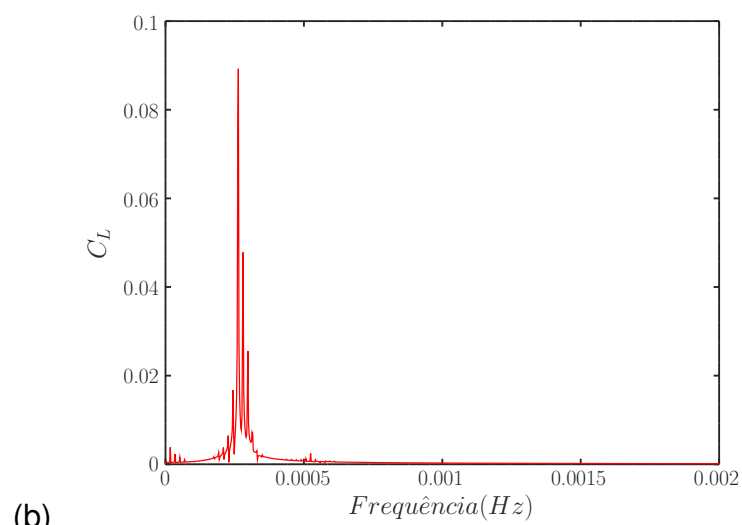
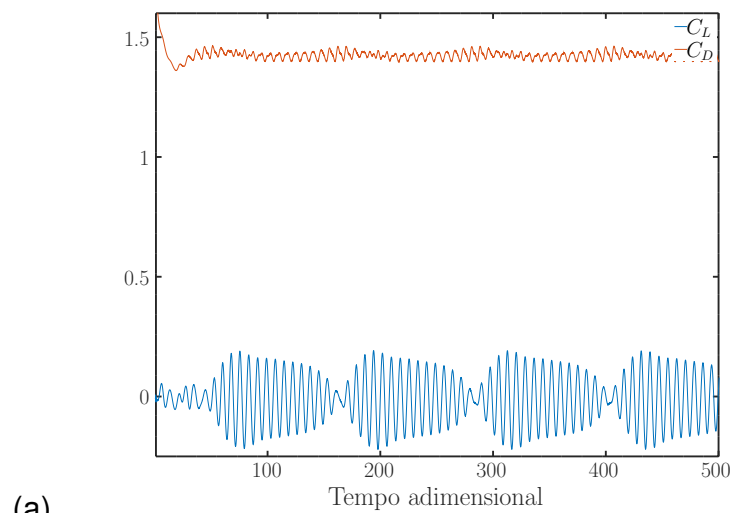
com uma emissão antifásica nas colunas lado a lado. O sinal resultante é modulado para as forças de arrasto e de sustentação, Figura 74.

Figura 73 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 0^\circ$, tempos adimensionais (a) 436 e (b) 440.



Fonte: Autora (2019).

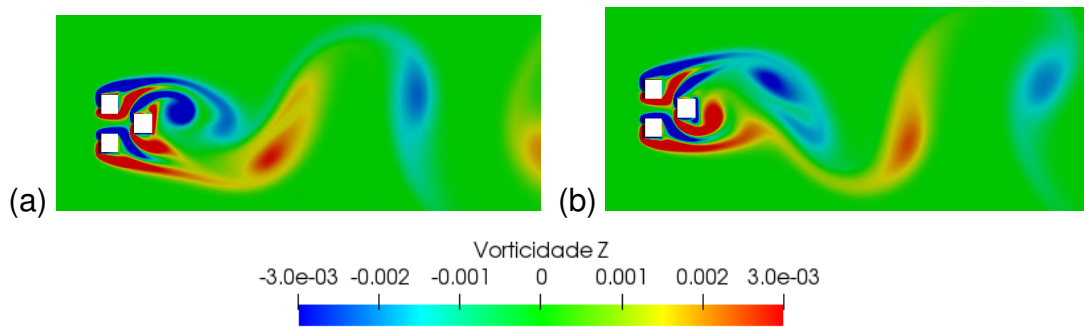
Figura 74 – (a) Histórico de tempo e (b) espectro de frequência para para $S/L = 4$ e $\alpha = 0^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

No caso de $\alpha = 180^\circ$, novamente, todos os espaçamentos geram sinais periódicos de força, devido a maior estabilidade desse tipo de arranjo. Em $S/L = 2$, Figura 75, a coluna a jusante desvia o cisalhamento das colunas a montante, o que leva à formação de vórtices de maior tamanho, aumentando a força de arrasto. A emissão da coluna a jusante é suprimida por esses vórtices e a esteira resultante é semelhante a de uma coluna isolada.

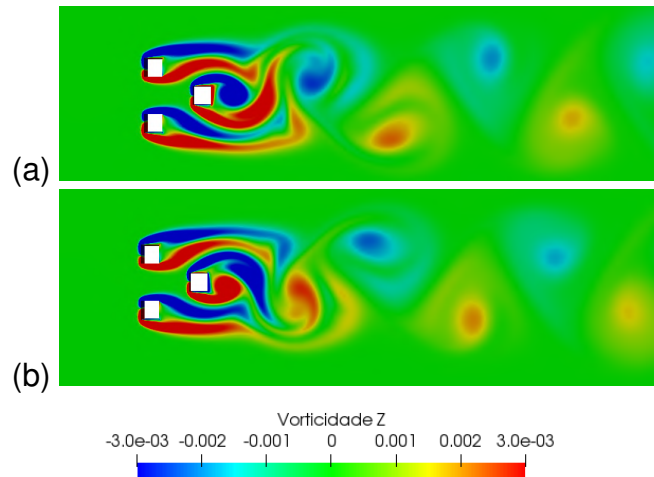
Figura 75 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 160 e (b) 164.



Fonte: Autora (2019).

Em $S/L = 3$, Figura 76, esse desvio é menor, e a emissão de vórtices dos cilindros montante se mistura com o desprendimento de vórtices do cilindro a jusante.

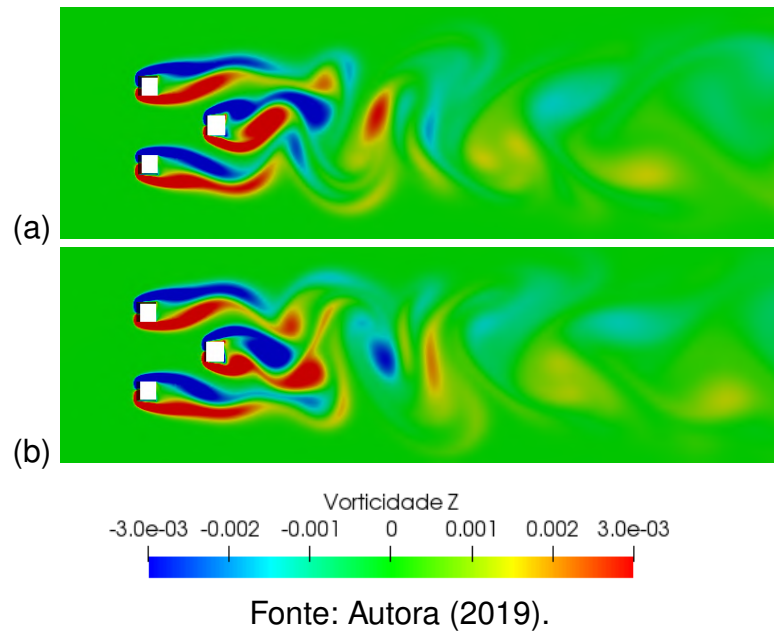
Figura 76 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 160 e (b) 164.



Fonte: Autora (2019).

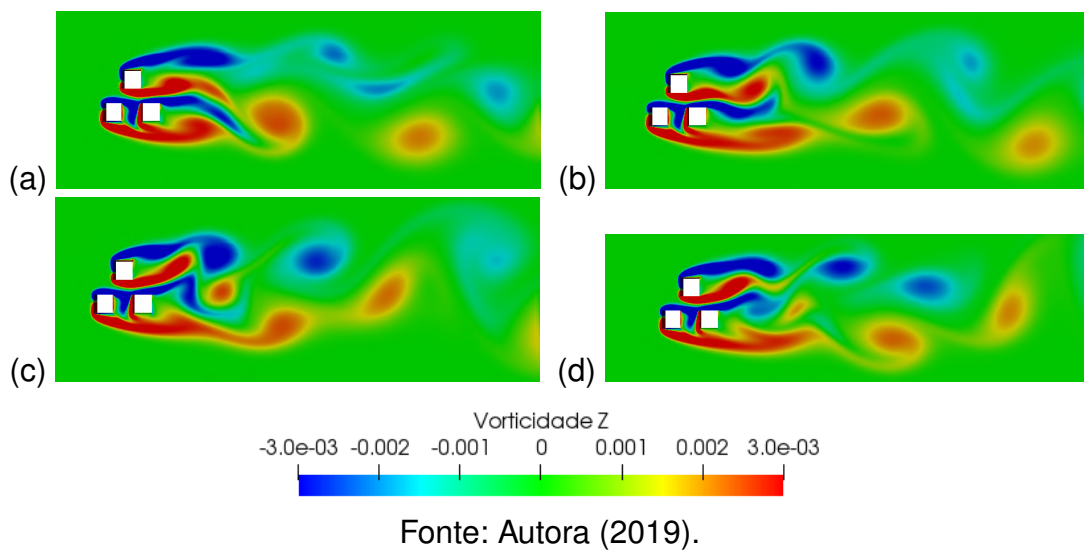
Quando $S/L = 4$, Figura 77, ocorre o desprendimento de vórtices para as três colunas, porém os vórtices ainda estão próximos e interagem de modo a perderem rapidamente a intensidade.

Figura 77 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 336 e (b) 340.



Para o ângulo de incidência de $\alpha = 90^\circ$, com $S/L = 2$, Figura 78, a emissão de vórtices também não possui um padrão, formando um sinal contínuo não estacionário. O escoamento descendo entre as colunas em *tandem* leva a uma esteira mais larga nessa região, desenvolvendo apenas os vórtices na aresta inferior. Os vórtices emitidos pela coluna acima são afetados por essa esteira, sendo que somente os vórtices do lado superior do cilindro 1 são desenvolvidos.

Figura 78 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 336, (b) 340, (c) 344 e (d) 348.



Para $S/L = 3$, Figura 79, o sistema possui forças em três amplitudes

constantes, sendo que a coluna superior possui sua própria esteira de vórtices e as colunas inferiores outra esteira própria. Resultado semelhante é notado para $S/L = 4$, Figura 80.

Figura 79 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 336 e (b) 340.

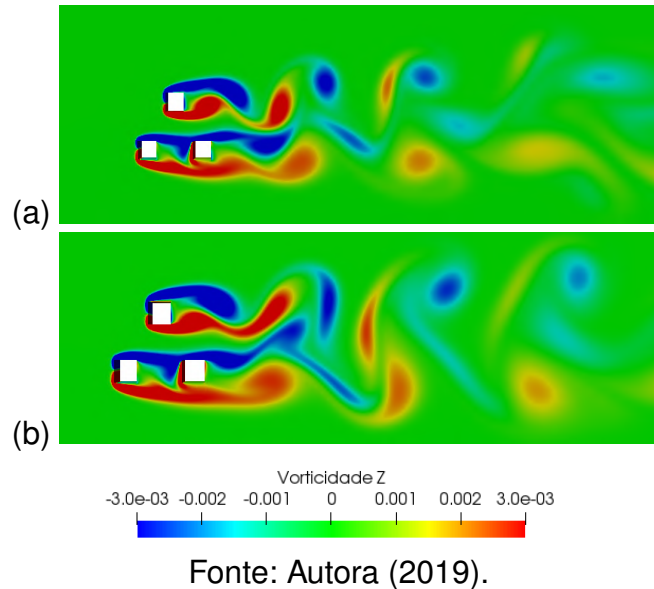
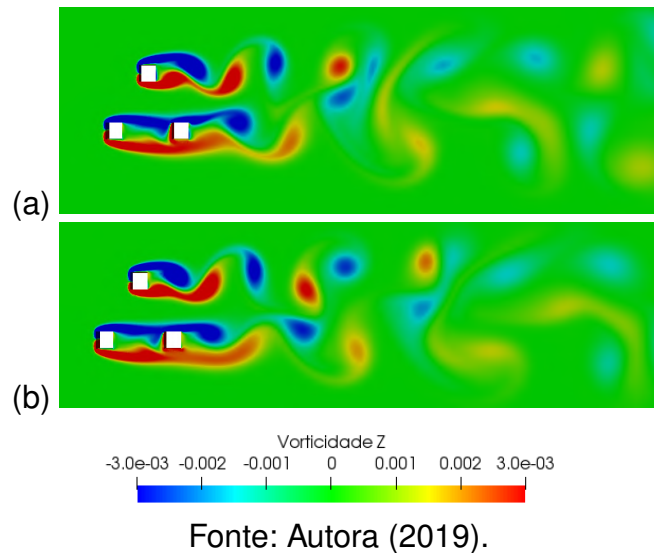
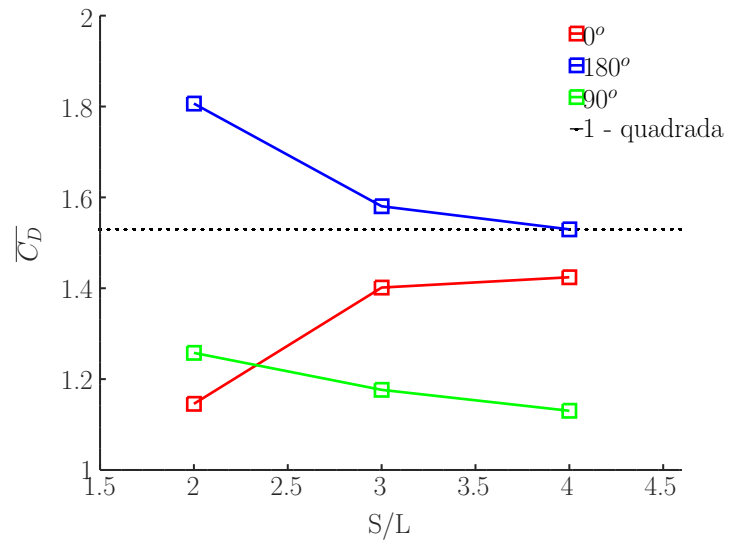


Figura 80 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 200 e (b) 204.



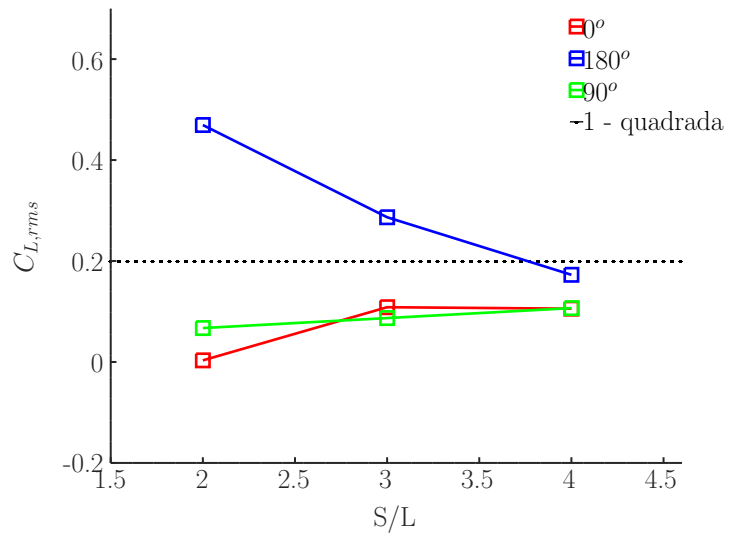
A seguir, nas Figuras 81, 82 e 83, são apresentadas as comparações dos resultados para diferentes ângulos de aproximação do escoamento e diferentes distâncias relativas para a seção quadrada.

Figura 81 – Variação de $\overline{C_D}$ com S/L e α .

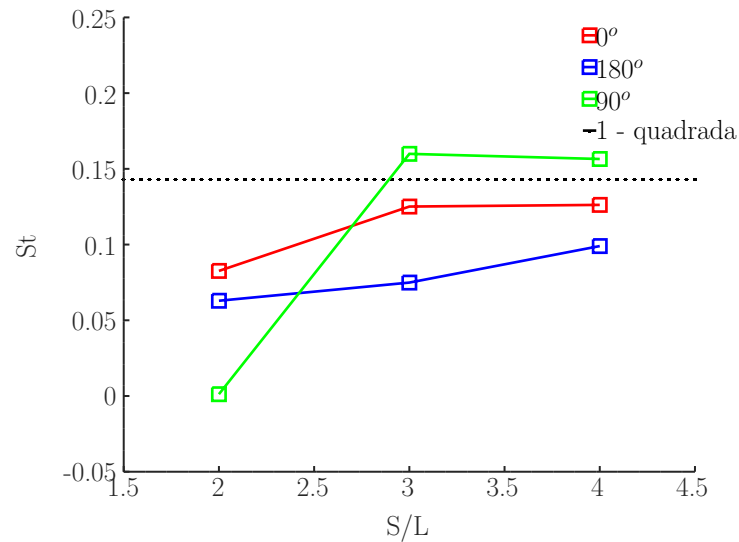


Fonte: Autora (2019).

Figura 82 – Variação de $C_{L,rms}$ com S/L e α .



Fonte: Autora (2019).

Figura 83 – Variação de St com S/L e α .

Fonte: Autora (2019).

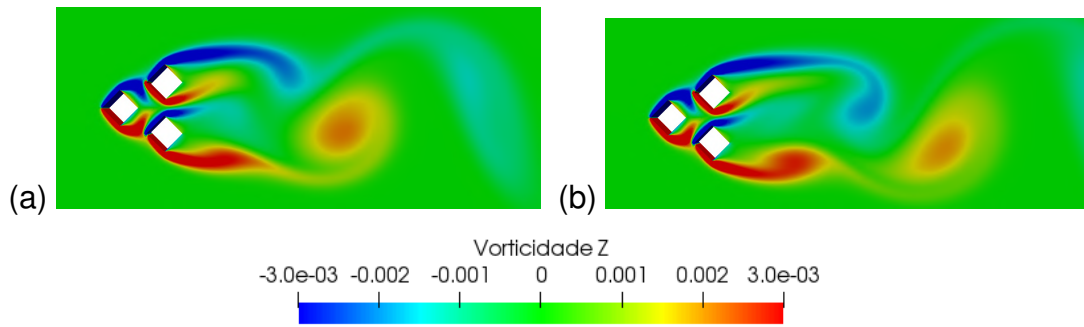
O maior valor da média do coeficiente de arrasto ocorre para $S/L = 2$ em $\alpha = 180^\circ$. Rahman et al. (2019) também constatou em seus resultados numéricos para $Re = 150$ o maior valor de arrasto em $\alpha = 180^\circ$ para o espaçamento de $S/L = 2,5$. Percebe-se que com o aumento do espaçamento os resultados tendem ao valor da coluna isolada de seção quadrada, o único valor que desvia desse resultado é para $\alpha = 90^\circ$. Os resultados para $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 90^\circ$ não variam muito ao se alterar a distância de $S/L = 3$ para $S/L = 4$. Praticamente em todos os casos os valores de St tendem ao valor da coluna isolada, pois vórtices nessa mesma frequência começam a ser emitidos.

4.10 ARRANJOS FIXOS COM 3 COLUNAS DE SEÇÃO DIAMANTE

Nessa seção serão apresentados os resultados para as colunas com seção diamante.

Iniciando pela análise da vorticidade, para $\alpha = 0^\circ$ e $S/L = 2$, as forças se tornam periódicas, sendo que a esteira da coluna a montante é suprimida pelas colunas a jusante e essas emitem vórtices de apenas um dos seus lados, formando uma esteira semelhante a de uma coluna isolada, conforme pode ser visto na Figura 84.

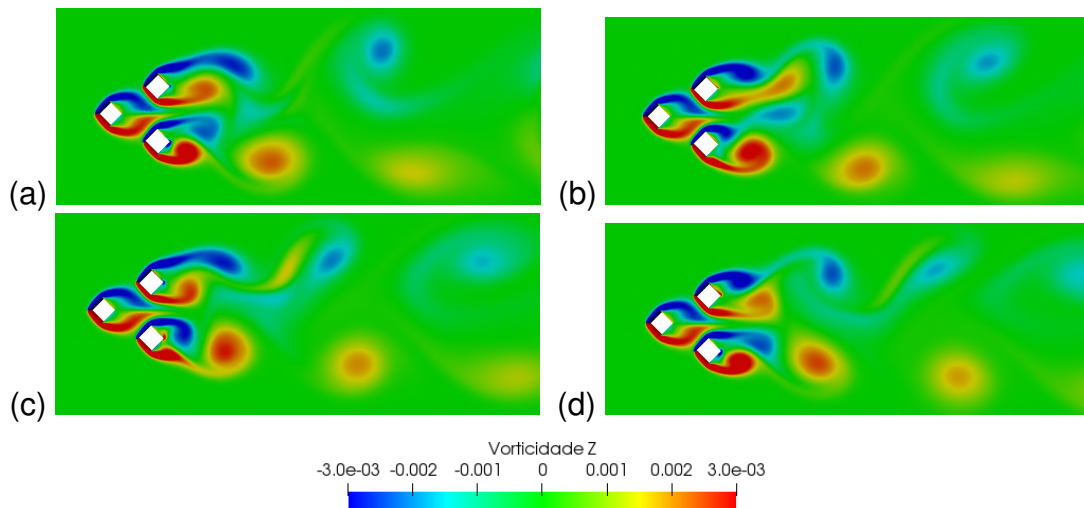
Figura 84 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$, tempos adimensionais (a) 570 e (b) 574.



Fonte: Autora (2019).

Para $S/L = 3$, Figura 85, os vórtices emitidos não apresentam um padrão. Ocorre uma esteira mais larga atrás do cilindro inferior e uma mais estreita no cilindro superior, indicando o aparecimento de um escoamento biestável, novamente. Os vórtices das arestas internas das colunas a jusante são rapidamente dissipados pela interação com os vórtices das arestas externas e a relação entre esses vórtices é assimétrica.

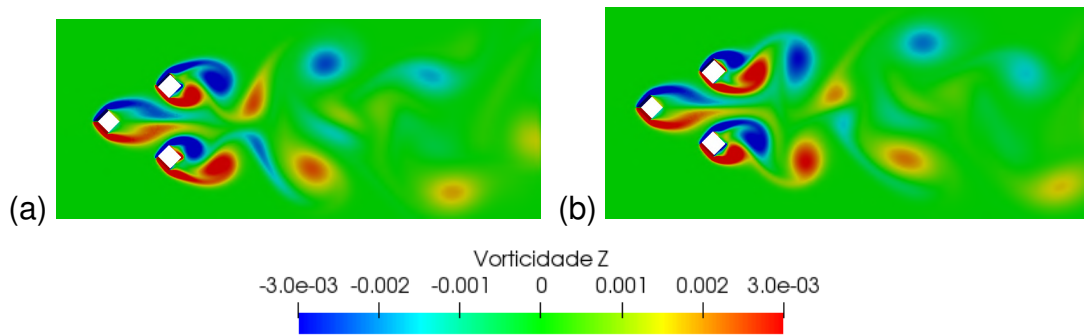
Figura 85 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 0^\circ$, tempos adimensionais (a) 260, (b) 264 (c) 268 e (d) 272.



Fonte: Autora (2019).

Para $S/L = 4$, Figura 86, a esteira de vórtices é clara, a emissão de vórtices nas colunas a jusante é sincronizada e a esteira da coluna a montante estreita-se para passar entre as colunas.

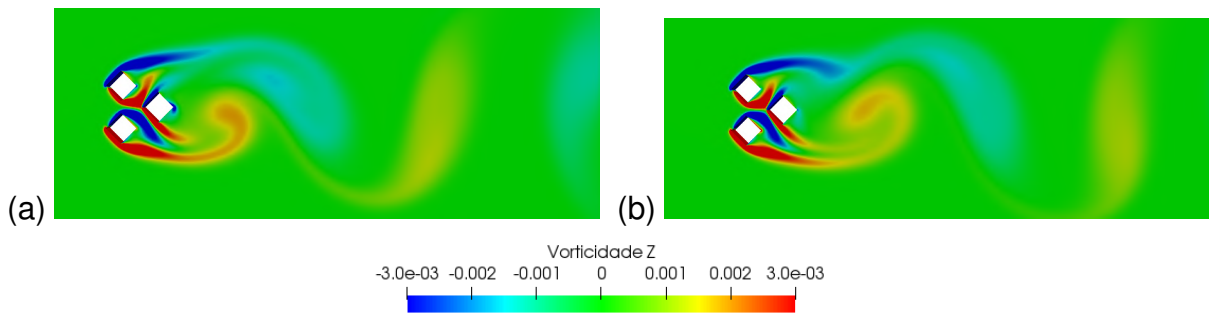
Figura 86 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 0^\circ$, tempos adimensionais (a) 260 e (b) 264.



Fonte: Autora (2019).

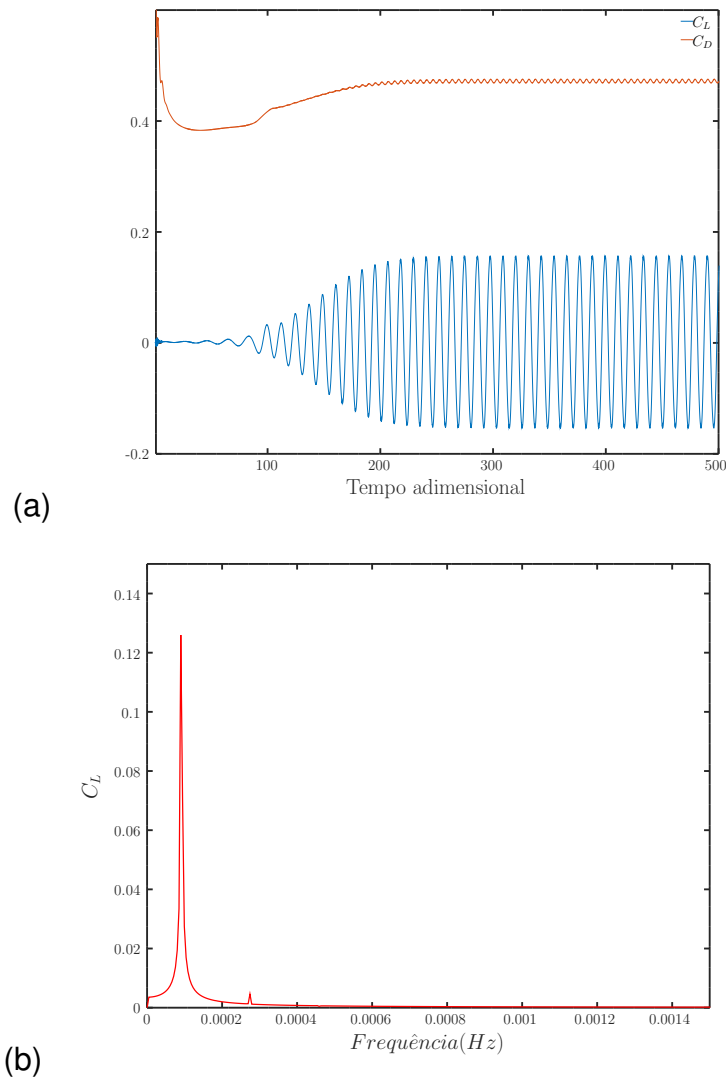
Para o ângulo $\alpha = 180^\circ$ e $S/L = 2$, encontra-se um sinal periódico para as forças de arrasto e de sustentação. É possível observar na Figura 87 a frequência definida na emissão de vórtices, sendo esses vindos das colunas a montante, formando uma esteira semelhante ao caso de coluna isolada. A emissão de vórtices da coluna a jusante é anulada pela esteira das colunas a montante. A Figura 88 mostra a semelhança do comportamento com o caso isolado, até mesmo com o aparecimento de um novo pico de frequência de menor intensidade.

Figura 87 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 260 e (b) 264.



Fonte: Autora (2019).

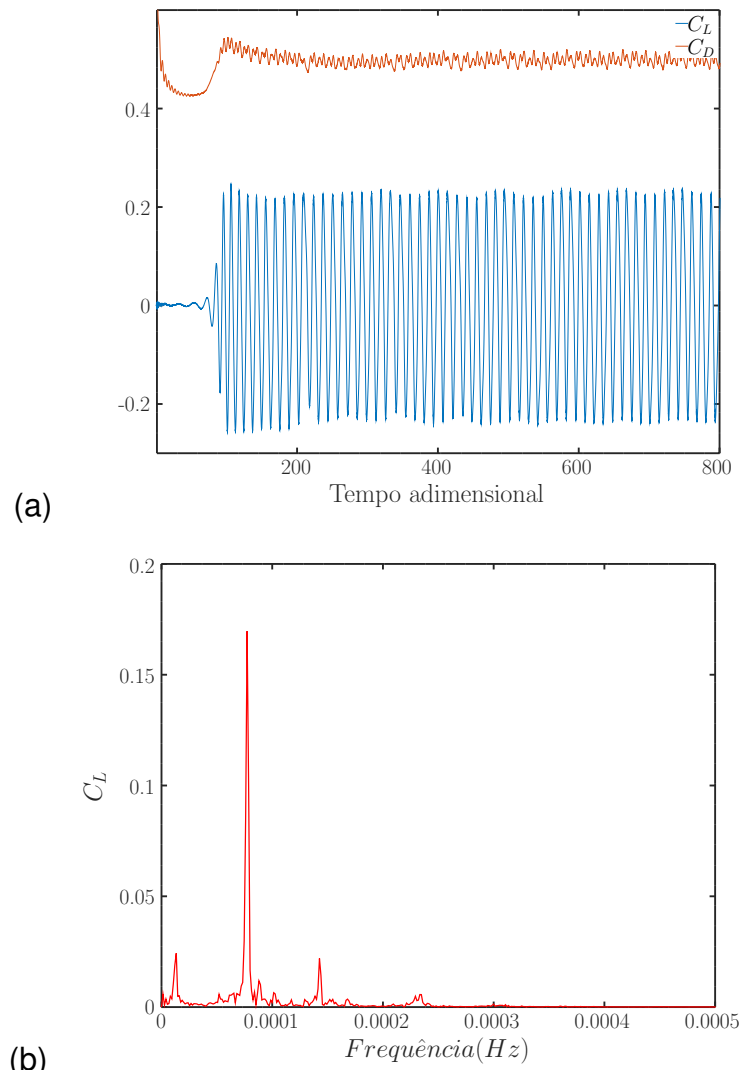
Figura 88 – (a) Histórico de tempo e (b) espectro de frequência para $S/L = 2$ e $\alpha = 180^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

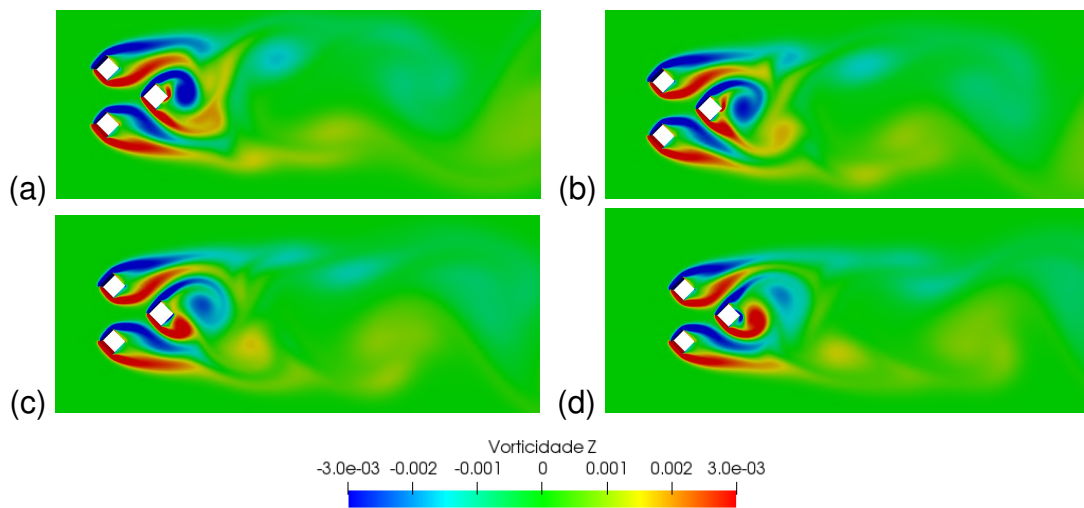
Em $S/L = 3$, a força de sustentação é periódica, com amplitudes e frequências bem definidas, mas a força de arrasto possui flutuações na amplitude, como pode ser visto na Figura 89. Possivelmente esse comportamento está ligado com a atração assimétrica que existe entre os vórtices, Figura 90.

Figura 89 – (a) Histórico de tempo e (b) espectro de frequência para $S/L = 3$ e $\alpha = 180^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

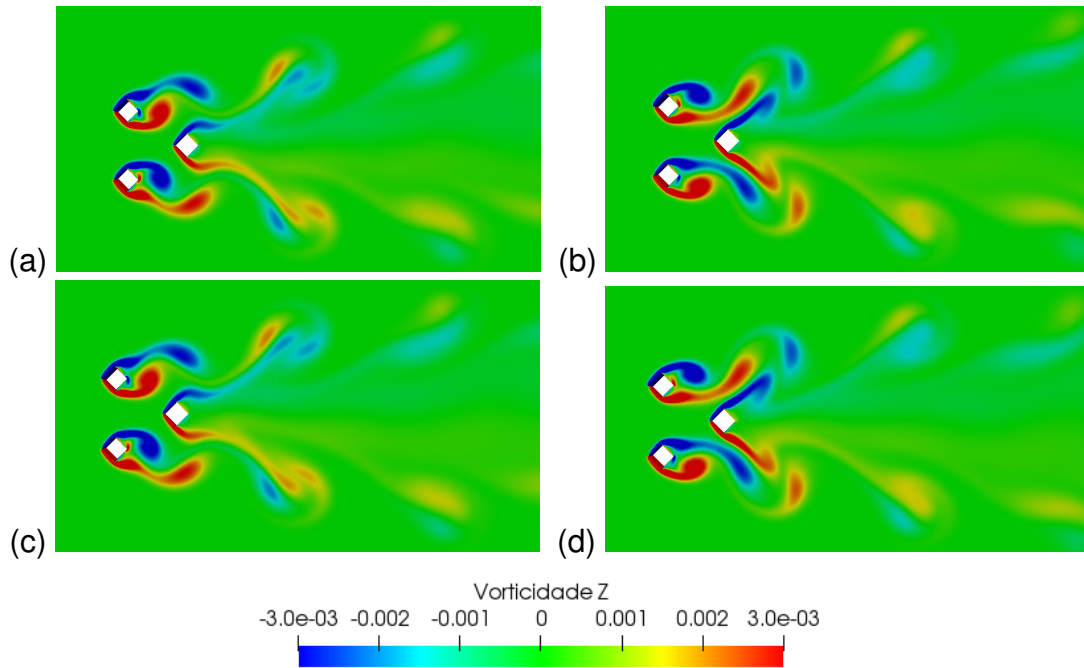
Figura 90 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 400, (b) 404, (c) 408 e (d) 412.



Fonte: Autora (2019).

Com $S/L = 4$ existe uma envoltória e uma envolvida nas forças de arrasto e de sustentação, formando um sinal modulado. Ao observar a Figura 91, vê-se a emissão sincronizada de vórtices pelas colunas a montante e os vórtices da coluna a jusante são atraídos por esses.

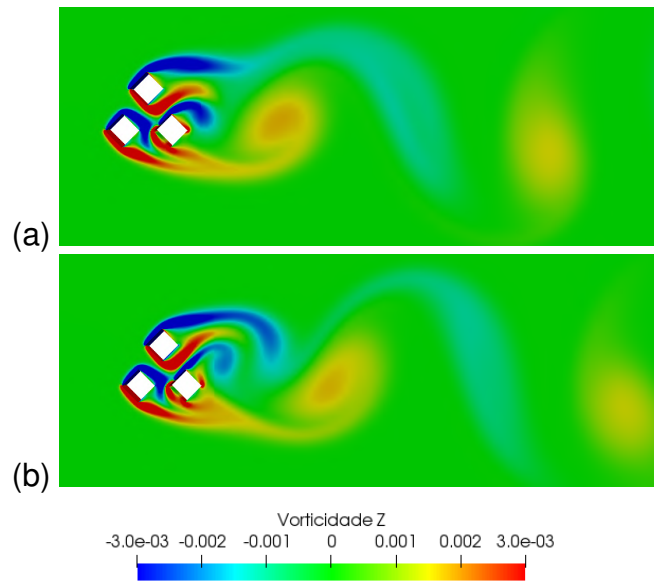
Figura 91 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 180^\circ$, tempos adimensionais (a) 260, (b) 264, (c) 268 e (d) 272.



Fonte: Autora (2019).

Com o ângulo de $\alpha = 90^\circ$, no caso de $S/L = 2$, novamente a frequência de vórtices na esteira é bem definida, Figura 92. Os vórtices são emitidos por uma aresta da coluna superior e pela junção do escoamento entre as colunas inferiores.

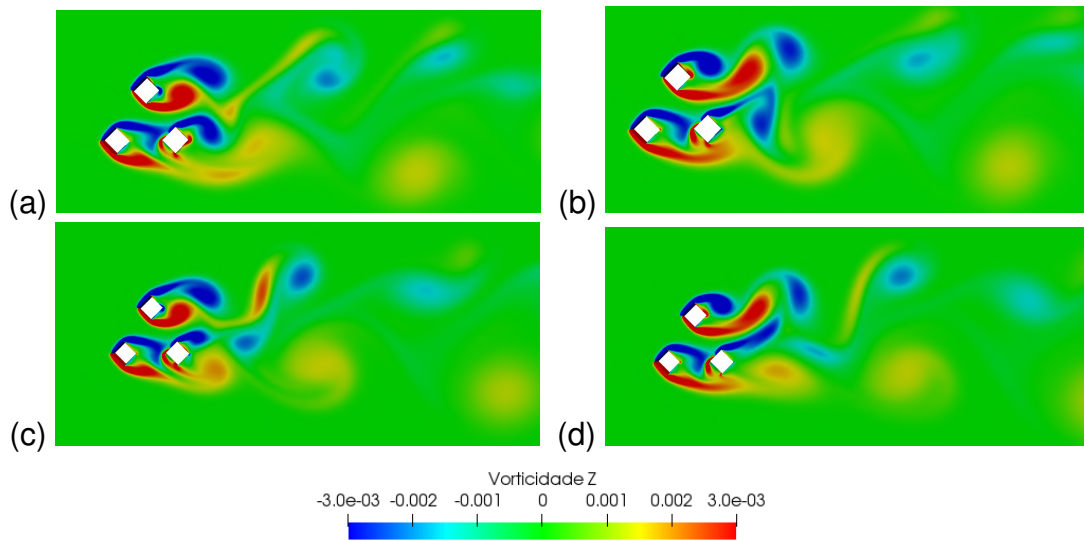
Figura 92 – Vorticidade para $S/L = 2$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 260 e (b) 264.



Fonte: Autora (2019).

No caso de $S/L = 3$ o escoamento é mais complexo, existindo 4 amplitudes de forças. A emissão na coluna inferior a jusante começa a ocorrer nas 4 arestas, como pode ser visto na Figura 93 (a).

Figura 93 – Vorticidade para $S/L = 3$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 260, (b) 264, (c) 268 e (d) 272.

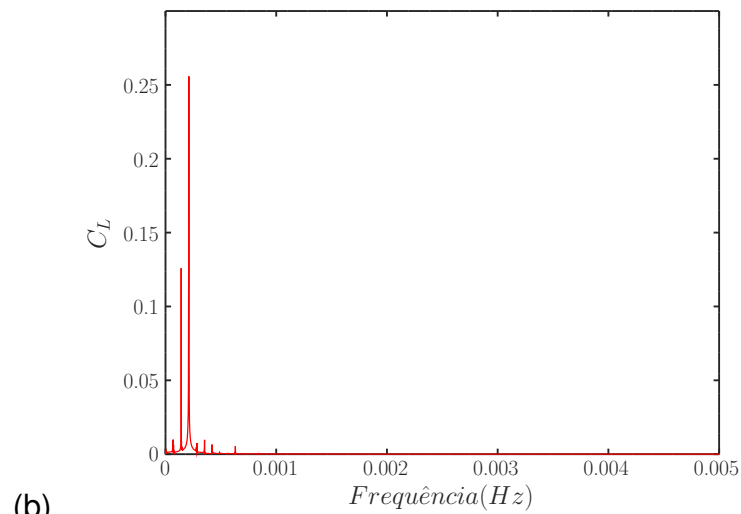
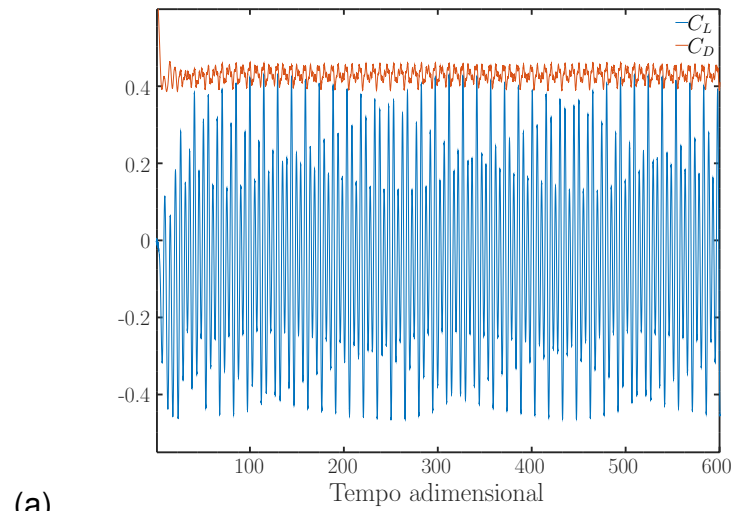


Fonte: Autora (2019).

Com $S/L = 4$, existem quatro curvas de envoltórias e envolvidas para as forças de arrasto e de sustentação, Figura 94. Esse escoamento complexo leva ao aumento da amplitude da força de sustentação. A coluna superior, Figura 95, possui uma esteira independente das colunas inferiores e muito parecida com a coluna isolada. As

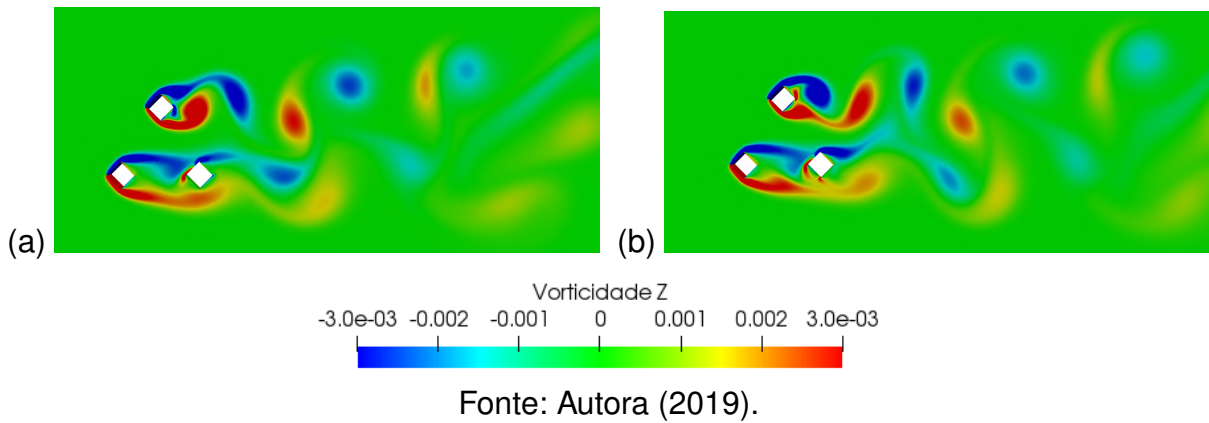
colunas inferiores possuem uma esteira com vórtices de menor intensidade e com a frequência variante de acordo com os vórtices que são emitidos por cada aresta da seção diamante.

Figura 94 – (a) Histórico de tempo e (b) espectro de frequência para $S/L = 4$ e $\alpha = 90^\circ$.



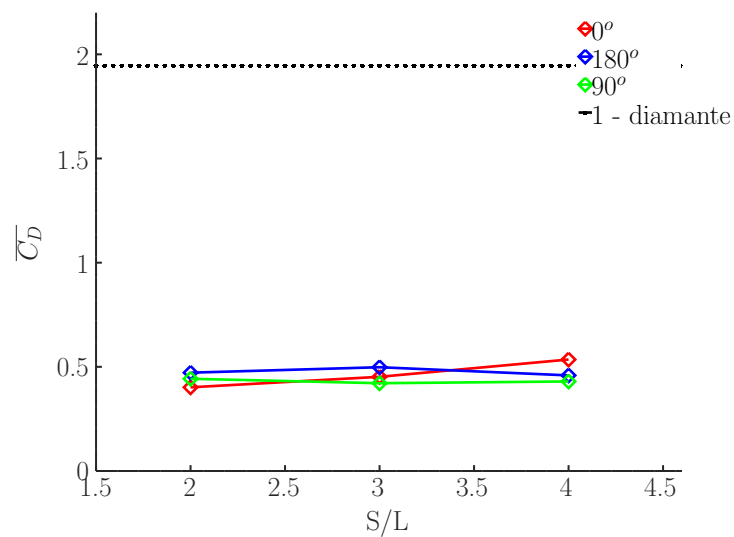
Fonte: Autora (2019).

Figura 95 – Vorticidade para $S/L = 4$ e $\alpha = 90^\circ$, tempos adimensionais (a) 104 e (b) 108.

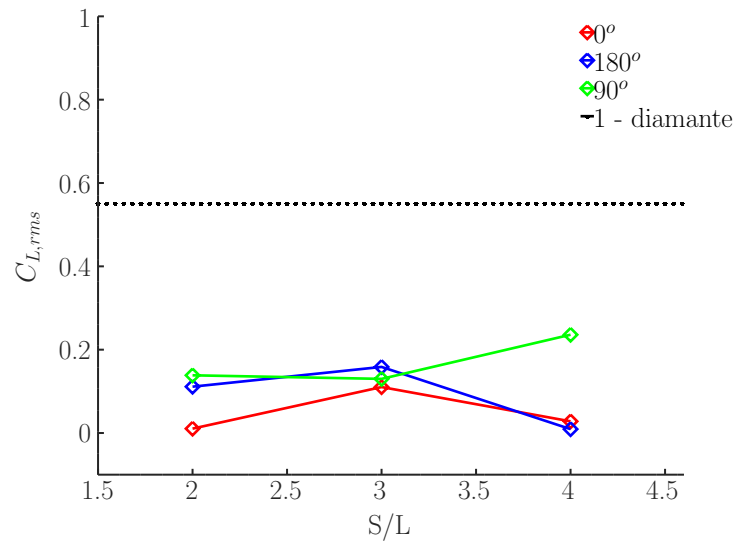


Nas Figuras 96, 97 e 98 são comparados os valores dos coeficientes de arrasto, de sustentação e o número de Strouhal para os diferentes ângulos de incidência e diferentes distâncias relativas para os arranjos de seção diamante.

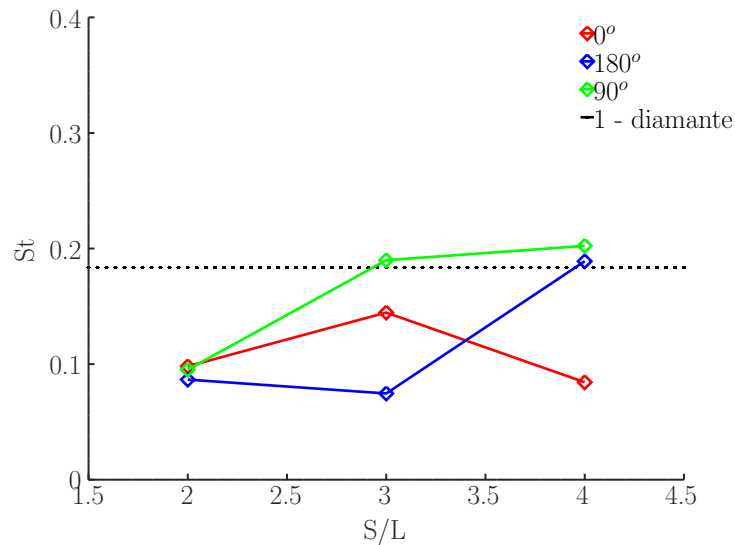
Figura 96 – Variação de $\overline{C_D}$ com S/L e α .



Fonte: Autora (2019).

Figura 97 – Variação de $C_{L,rms}$ com S/L e α .

Fonte: Autora (2019).

Figura 98 – Variação de St com S/L e α .

Fonte: Autora (2019).

Curiosamente, o arranjo de colunas em formato diamante leva a médias do coeficiente de arrasto muito inferiores, sendo quase 5 vezes menor que do caso da coluna isolada. O valor do coeficiente de arrasto médio possui pouca variação ao se alterar os espaçamentos e ângulos, sendo que seu maior valor ocorre para $S/L = 4$ e $\alpha = 0^\circ$. O valor rms do coeficiente de sustentação também é inferior à coluna isolada, chegando a zero para $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$. Por fim, o número de Strouhal é mais próximo ao valor da coluna isolada para os maiores espaçamentos e nos ângulos $\alpha = 180^\circ$ e $\alpha = 90^\circ$. Os valores de St mais próximos ao da coluna isolada para $\alpha = 90^\circ$ são

representativos do fato que a coluna superior começa a possuir esteira semelhante a da coluna isolada.

A seguir serão discutidas as forças totais para as três seções de colunas analisadas neste estudo.

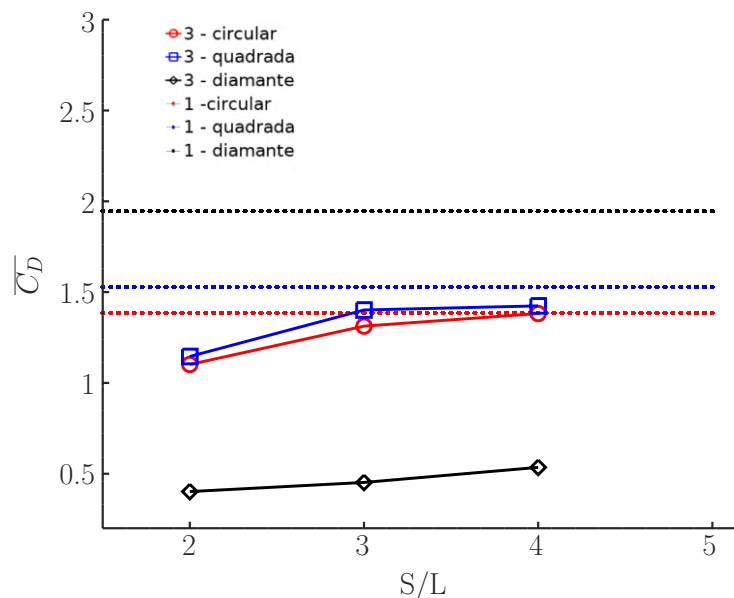
4.11 FORÇAS TOTAIS DOS DIFERENTES ARRANJOS

Tendo finalizado a análise dos diferentes formatos de seções, os resultados dos coeficientes de força serão agora examinados, afim de identificar o melhor arranjo para projeto em termos dos menores valores de força. Os resultados totais são essenciais para a compreensão do comportamento do sistema e podem ser mais facilmente relacionados às forças responsáveis pelo fenômeno VIM.

Nas Figuras 99, 100, 101, 102, 103 e 104, os marcadores em vermelho representam os resultados para a seção circular, os marcadores em azul os resultados para a seção quadrada e os marcadores em preto os resultados para a seção diamante.

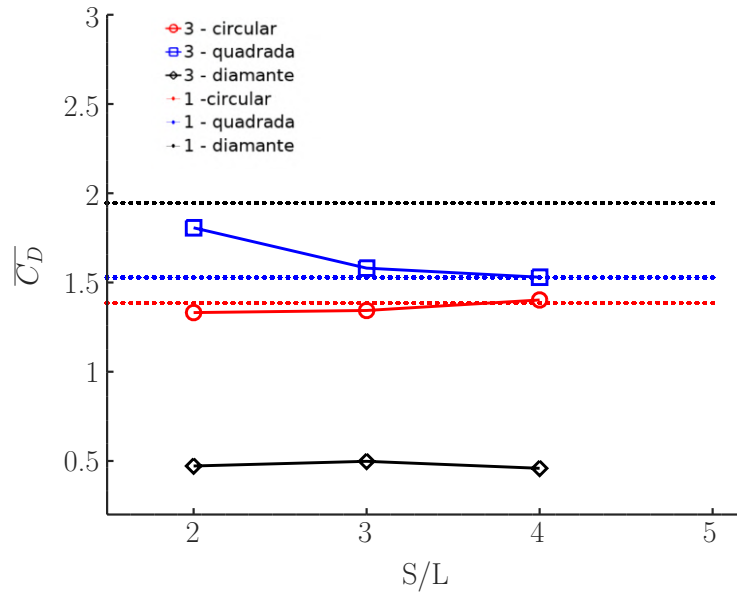
Para um valor considerável da razão de espaçamento, $S/L = 3$ e $S/L = 4$, a média do coeficiente de arrasto total deve atingir o mesmo valor para o caso de coluna isolada, nos casos em que interferência entre colunas não é mais observada, portanto, seções circular e quadrada nos ângulos de $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$. Para a seção diamante esse comportamento não ocorre e, devido a grande interação entre os vórtices gerados por esse arranjo, a média do coeficiente de arrasto é inferior aos outros casos.

Figura 99 – Variação de $\overline{C_D}$ para formato da seção e S/L , com $\alpha = 0^\circ$.



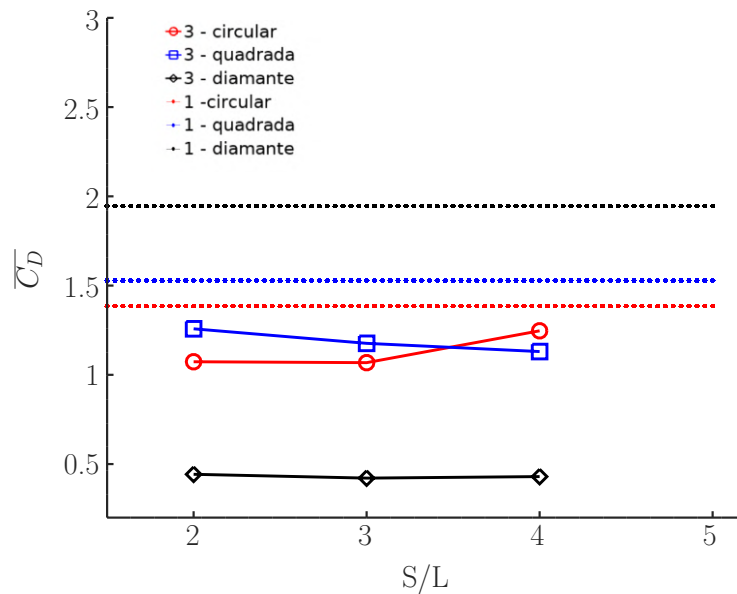
Fonte: Autora (2019).

Figura 100 – Variação de $\overline{C_D}$ para formato da seção e S/L , com $\alpha = 180^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

Figura 101 – Variação de $\overline{C_D}$ para formato da seção e S/L , com $\alpha = 90^\circ$.

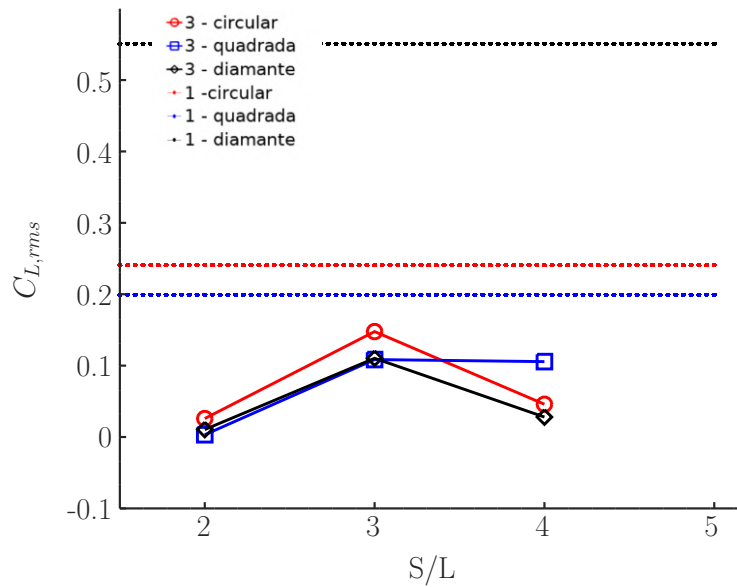


Fonte: Autora (2019).

O comportamento do valor rms do coeficiente de sustentação é similar para as três seções quando $\alpha = 0^\circ$, aumentando os valores em $S/L = 3$. Para os ângulos de $\alpha = 90^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$ não é possível identificar uma tendência nos resultados, mas em geral os valores total são inferiores aos das colunas isoladas. Para $S/L = 4$ e $\alpha = 90^\circ$, o valor de $C_{L,rms}$ da seção circular é muito maior que da coluna isolada, onde provavelmente ocorre interferência construtiva entre as forças de sustentação

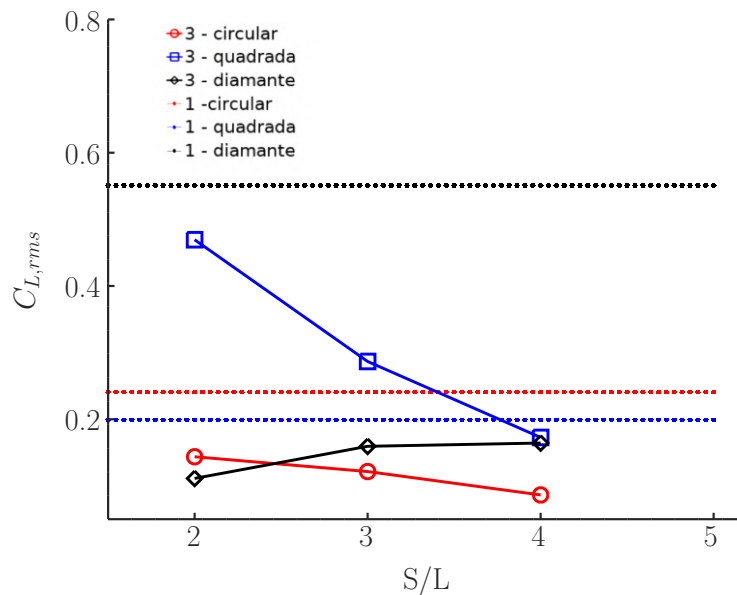
das colunas, resultado também encontrado por Gonçalves et al. (2019). Esse mesmo comportamento ocorre para a seção quadrada em $S/L = 2$ e $\alpha = 180^\circ$.

Figura 102 – Variação de $C_{L,rms}$ para formato da seção e S/L , com $\alpha = 0^\circ$.



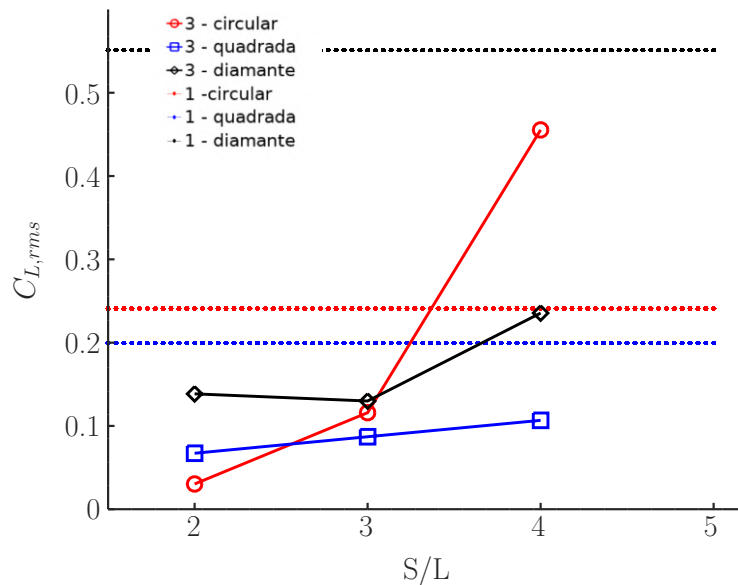
Fonte: Autora (2019).

Figura 103 – Variação de $C_{L,rms}$ para formato da seção e S/L , com $\alpha = 180^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

Figura 104 – Variação de $C_{L,rms}$ para formato da seção e S/L , com $\alpha = 90^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

Constatou-se que o maior valor de $\overline{C_D}$ ocorre para a seção diamante isolada, $\overline{C_D} = 1,948$. Já para os arranjos, ocorre para a seção quadrada em $S/L = 2$ e $\alpha = 180^\circ$, $\overline{C_D} = 1,807$. O menor valor, $\overline{C_D} = 0,402$, ocorre para o arranjo de colunas diamante em $S/L = 2$ e com ângulo de incidência do escoamento de $\alpha = 0^\circ$. O maior valor de $C_{L,rms}$ ocorre para a seção quadrada em $S/L = 2$ e $\alpha = 180^\circ$, sendo $C_{L,rms} = 0,469$. O menor valor ocorre para o arranjo de seção quadrada em $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$, sendo $C_{L,rms} = 0,0032$, o qual é próximo da seção diamante nessa mesma situação, $C_{L,rms} = 0,0105$.

Portanto, de maneira geral, o arranjo de seção quadrada na distância de $S/L = 2$ e no ângulo de incidência de escoamento de $\alpha = 180^\circ$ é a pior opção de arranjos em termos dos coeficientes de forças totais. O melhor arranjo, com os menores coeficientes de forças totais é o arranjo de seção diamante em $S/L = 2$ e no ângulo de incidência de escoamento de $\alpha = 180^\circ$.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a análise numérica do escoamento laminar bidimensional com $Re = 100$ ao redor de colunas de plataformas offshore. As colunas consideradas possuem suas seções nos formatos circular, quadrada e diamante. As simulações foram feitas para uma coluna fixa e também com dois graus de liberdade, além de arranjos de 3 colunas na situação fixa. Foram avaliadas diferentes velocidades reduzidas ($V_r = 4, 5, 6, 7$ e 8) para o caso de uma coluna circular e também diferentes distâncias relativas entre colunas ($S/L = 2, 3$ e 4) e ângulos de incidência do escoamento ($\alpha = 0^\circ, 180^\circ$ e 90°) no caso dos arranjos. Para tais simulações empregou-se a ferramenta gratuita e de código aberto OpenFOAM.

Para avaliar a credibilidade das simulações foram realizadas as etapas de verificação e validação, de acordo com o método apresentado por Eça e Hoekstra (2009), Eça, Vaz e Hoekstra (2010) e Rosetti e Fajarra (2015) para os casos de uma coluna circular fixa e com grau de liberdade. Desse modo, o erro de discretização de malha e tempo foi avaliado e os valores de incerteza foram determinados. Para os casos com valores experimentais ou valores numéricos disponíveis foi possível também realizar a etapa de validação.

Dos estudos apresentados no trabalho, o caso com um cilindro fixo foi verificado e validado com os resultados experimentais de Rosetti (2015). Já para a seção quadrada fixa, os resultados numéricos de Sen, Mittal e Biswas (2011) estão de acordo com os valores encontrados no presente trabalho. Para a seção diamante fixa, os resultados da literatura apresentam discrepâncias entre si, sendo que os valores do coeficiente de arrasto estão mais próximos dos resultados de Zhao, Cheng e Zhou (2013), o coeficiente de sustentação está entre os valores encontrados por Sohankar, Norberg e Davidson (1998) e Zhao, Cheng e Zhou (2013), e o número de Strouhal está em concordância com Sohankar, Norberg e Davidson (1998). Ao analisar a vorticidade da seção diamante observou-se o surgimento de um desprendimento de vórtices também na aresta de trás da seção, com frequência 3 vezes maior que a frequência de liberação de vórtices das arestas laterais. Dentre essas colunas, a seção diamante é a que apresenta o maior coeficiente de arrasto médio e também o maior valor rms do coeficiente de sustentação, já o menor valor do coeficiente de arrasto médio ocorre na seção circular e o menor valor rms do coeficiente de sustentação ocorre na seção quadrada.

Nas simulações de vibrações induzidas por vórtices, com 2GDL, para a seção

circular foi possível fazer a validação dos resultados do coeficiente de sustentação e da amplitude significativa transversal ao escoamento com os resultados numéricos de Prasanth e Mittal (2008). O estudo da variação da velocidade reduzida para a seção circular mostrou boa conformidade com os resultados de Singh e Mittal (2005) e Zhao, Cheng e Zhou (2013), e possibilitou avaliar que a maior amplitude do movimento transversal e o maior valor rms do coeficiente de sustentação ocorrem para $V_r = 5$ quando $Re = 100$. No caso de VIV para a seção quadrada e para a seção diamante, não foram encontrados resultados com razão de massa $m^* = 10$ que possibilitassem a comparação dos resultados, mas ao confrontar as diferentes seções, o menor coeficiente de arrasto médio e a menor amplitude de movimento transversal ocorreram para a seção quadrada sendo que os maiores valores ocorreram para a seção diamante.

Ao comparar os resultados das forças que atuam na coluna fixa e com 2 graus de liberdade, constatou-se o aumento do coeficiente de arrasto médio quando o corpo está livre para vibrar transversal e longitudinalmente ao escoamento. Esse comportamento é relatado no livro de Blevins (1977) como um dos resultados esperados pela vibração induzida por vórtices. Já o valor rms do coeficiente de sustentação diminui, indicando a diminuição da amplitude da força de sustentação quando o corpo possui grau de liberdade.

Nas simulações de arranjos de cilindros com seção circular, o comportamento das forças mostrou-se similar ao encontrado por Zheng, Zhang e Lv (2016) e por Bao, Zhou e Huang (2010) para o caso de $\alpha = 0^\circ$. Além disso, foram observadas particularidades nos escoamentos para cada distância relativa entre colunas. Para $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$, por exemplo, as forças não apresentaram amplitudes e frequências definidas e não foi encontrado um padrão na emissão de vórtices ao analisar a vorticidade do escoamento, observando-se um escoamento chamado biestável. Para o ângulo $\alpha = 180^\circ$, todos os espaçamentos levaram a forças periódicas. A configuração de $\alpha = 90^\circ$ para espaçamentos maiores conduz a duas esteiras, uma para a coluna superior e outra para o conjunto das colunas inferiores, mas o em $S/L = 2$ novamente as forças possuem flutuações. Percebeu-se que para $S/L = 4$ os valores de $\overline{C_D}$ são muito próximos para $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$ e similares ao valor da coluna isolada, mostrando que com uma maior distância entre colunas os efeitos da proximidade são menos significativos, assim como a influência dos ângulos $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$. Quanto ao St , para o maior espaçamento, tanto o ângulo $\alpha = 0^\circ$ como $\alpha = 90^\circ$ levam a valores muito próximos ao da coluna isolada.

Para os arranjos com seção quadrada, o caso de $S/L = 3$ com $\alpha = 0^\circ$ e $S/L = 2$ com $\alpha = 90^\circ$ também não se tornam periódicos, com flutuações nas forças de arrasto e de sustentação. Já com $S/L = 4$ e $\alpha = 180^\circ$, por exemplo, a interação entre os vórtices de cada coluna é tão grande que esses se dispersam rapidamente, diminuindo a força de arrasto. Percebe-se que com o aumento do espaçamento os

resultados tendem ao valor da coluna isolada de seção quadrada, o único valor que desvia desse resultado é o ângulo de $\alpha = 90^\circ$. Os resultados para $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 90^\circ$ não variam muito de $S/L = 3$ para $S/L = 4$ e o maior valor da média do coeficiente de arrasto ocorre para $S/L = 2$ em $\alpha = 180^\circ$. Praticamente todos os resultados de St tendem ao valor da coluna isolada, pois vórtices nessa mesma frequência começam a ser emitidos.

No caso dos arranjos com seção diamante, a interação entre as esteira de cada coluna faz com que os vórtices se discipem rapidamente, sendo o caso que leva aos menores valores de coeficiente de arrasto médio. Para $S/L = 2$ em $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$, o escoamento se comporta como se fosse para uma coluna isolada de maior largura. Ao aumentar a distância relativa o escoamento começa a ficar complexo devido a interação entre colunas e o surgimento do desprendimento de vórtices nas 4 arestas da seção diamante. Para $S/L = 3$ em $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$ as forças possuem flutuações. O valor do coeficiente de arrasto médio permanece praticamente constante para todos os espaçamentos e ângulos, sendo que seu maior valor ocorre para $S/L = 4$ e $\alpha = 0^\circ$. O valor rms do coeficiente de sustentação é inferior ao da coluna isolada, chegando a zero para $S/L = 2$ e $\alpha = 0^\circ$. O número de Strouhal é mais próximo ao valor da coluna isolada para os maiores espaçamentos e ângulos $\alpha = 180^\circ$ e $\alpha = 90^\circ$.

Ao analisar todas as seções em seus arranjos, constatou-se que o arranjo de seção quadrada na distância relativa de $S/L = 2$ e no ângulo de incidência de escoamento de $\alpha = 180^\circ$ é a pior opção de arranjos em termos dos coeficientes de forças totais. Os menores coeficientes de forças totais se encontram no arranjo de seção diamante em $S/L = 2$ e com ângulo de incidência de escoamento $\alpha = 180^\circ$, caracterizando a melhor opção de arranjo.

Pode-se concluir, desse modo, que este trabalho produziu resultados coerentes com aqueles publicados na literatura. Assim, o uso da ferramenta OpenFOAM com as configurações utilizadas se mostrou adequado. Ademais, este texto contribui num aspecto didático para a utilização do programa aberto OpenFOAM, uma vez que o mesmo possui documentação limitada com aplicação no cenário abordado. Além disso, criou-se uma base de dados para trabalhos futuros no que diz respeito ao estudo de diferentes configurações de plataformas, a fim de identificar as características de escoamento que minimizam o VIM.

Além disso, o trabalho abre campo para explorações na área offshore, mostrando os arranjos e seções que levam aos menores deslocamentos das plataformas. Isso possibilita o descarte de casos menos satisfatórios no momento de aplicar simulações mais avançadas, com número de Reynolds elevado e domínio tridimensional.

Como trabalhos futuros, sugere-se: estudo dos arranjos de 3 colunas com 2 GDL; simulações com diferentes números de Reynolds, aplicando modelos de

turbulência quando necessário; simulações no domínio tridimensional, considerando superfície livre; estudo de diferentes razões de massa; estudo com diferentes valores de amortecimento no VIV; comparações com resultados experimentais; estudo de arranjos com 4 colunas fixas e com grau de liberdade .

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J. D.; WENDT, J. **Computational fluid dynamics**. [S.l.]: Springer, 1995. v. 206.
- BAO, Y.; ZHOU, D.; HUANG, C. Numerical simulation of flow over three circular cylinders in equilateral arrangements at low reynolds number by a second-order characteristic-based split finite element method. **Computers & Fluids**, Elsevier, v. 39, n. 5, p. 882–899, 2010.
- BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G. **Random data: analysis and measurement procedures**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 729.
- BLEVINS, R. D. Flow-induced vibration. **New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1977. 377 p.**, 1977.
- BLEVINS, R. D.; COUGHRAN, C. S. Experimental investigation of vortex-induced vibration in one and two dimensions with variable mass, damping, and reynolds number. **Journal of Fluids Engineering**, American Society of Mechanical Engineers, v. 131, n. 10, p. 101202, 2009.
- CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos-3**. [S.l.]: AMGH Editora, 2015.
- CONCEIÇÃO, P. D. d. S. **Numerical simulation of two-degree-of-freedom vortex induced vibration in a circular cylinder with OpenFOAM**. Tese (Doutorado), 2016.
- CUI, Z. et al. Two-dimensional numerical study of vortex-induced vibration and galloping of square and rectangular cylinders in steady flow. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 106, p. 189–206, 2015.
- DAREKAR, R. M.; SHERWIN, S. J. Flow past a square-section cylinder with a wavy stagnation face. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge University Press, v. 426, p. 263–295, 2001.
- DOROGI, D.; BARANYI, L. Numerical simulation of a freely vibrating circular cylinder with different natural frequencies. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 158, p. 196–207, 2018.
- EÇA, L.; HOEKSTRA, M. Evaluation of numerical error estimation based on grid refinement studies with the method of the manufactured solutions. **Computers & Fluids**, Elsevier, v. 38, n. 8, p. 1580–1591, 2009.
- EÇA, L.; HOEKSTRA, M. A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of cfd calculations based on grid refinement studies. **Journal of Computational Physics**, Elsevier, v. 262, p. 104–130, 2014.
- EÇA, L.; VAZ, G.; HOEKSTRA, M. A verification and validation exercise for the flow over a backward facing step. In: **Proceedings of the ECCOMAS CFD**. [S.l.: s.n.], 2010.

ESCOLA POLITÉCNICA. **Tecnologia da Poli torna mais seguras plataformas de petróleo**. 2010. Disponível em: <<https://novo.poli.usp.br/noticias/892-tecnologia-da-poli-torna-mais-seguras-plataformas-de-petroleo.html>>. Acesso em: 17 set. 2018.

OLIVEIRA FORTUNA, A. de. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. [S.l.]: Edusp, 2000.

FUJARRA, A. L. et al. State-of-art on vortex-induced motion: A comprehensive survey after more than one decade of experimental investigation. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. [S.l.], 2012. p. 561–582.

GERRARD, J. 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.

GONÇALVES, R. T. et al. Force measurements of the flow around arrays of three and four columns with different geometry sections, spacing ratios and incidence angles. **J. Offshore Mech. Arctic Eng.(2020)**, 2019.

GONÇALVES, R. T. et al. Experimental study on vortex-induced motions (vim) of a large-volume semi-submersible platform. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. [S.l.], 2011. p. 1–9.

HE, T.; ZHOU, D.; BAO, Y. Combined interface boundary condition method for fluid–rigid body interaction. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, Elsevier, v. 223, p. 81–102, 2012.

ISI ENGENHARIA. **O mundo das plataformas de petróleo**. 2011. Disponível em: <<http://www.isiengenharia.com.br/wordpress/espaco-do-engenheiro/o-mundo-das-plataformas-de-petroleo-2>>. Acesso em: 17 set. 2018.

KHALAK, A.; WILLIAMSON, C. H. Motions, forces and mode transitions in vortex-induced vibrations at low mass-damping. **Journal of fluids and Structures**, Elsevier, v. 13, n. 7-8, p. 813–851, 1999.

KIM, J.-W.; MAGEE, A.; GUAN, K. Y. H. Cfd simulation of flow-induced motions of a multi-column floating platform. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. [S.l.], 2011. p. 319–326.

LACERDA, T. Â. G. de. **Estimativa dos Movimentos Induzidos por Vórtices em Plataformas Flutuantes através de um Oscilador do tipo Van der Pol**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

LAM, K.; CHEUNG, W. Phenomena of vortex shedding and flow interference of three cylinders in different equilateral arrangements. **Journal of fluid mechanics**, Cambridge University Press, v. 196, p. 1–26, 1988.

- LOPES, R. M. V. **Estudo numérico do fenômeno de vibração induzida por vórtices num cilindro com 1 grau de liberdade em OpenFoam**. Tese (Doutorado), 2015.
- MARCHI, C. H. et al. Verificação de soluções numéricas unidimensionais em dinâmica dos fluidos. Florianópolis, SC, 2001.
- MORAIS, J. M. d. Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da petrobras na exploração e produção offshore. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2013.
- NORBERG, C. Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. **Journal of Fluids and Structures**, Elsevier, v. 17, n. 1, p. 57–96, 2003.
- PAS, S. The influence of y^+ in wall functions applied in ship viscous flows. University of Twente, 2016.
- PRASANTH, T.; MITTAL, S. Vortex-induced vibrations of a circular cylinder at low reynolds numbers. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge University Press, v. 594, p. 463–491, 2008.
- QIAO, D. et al. Comparative analysis on fatigue damage of deepwater hybrid mooring line. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. [S.I.], 2010. p. 443–452.
- RAHMAN, H. et al. A numerical study for flow around three square cylinders in triangular arrangement. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering**, Springer, p. 1–18, 2019.
- RIBEIRO, P. A. R. Desprendimento de vórtices e controle em esteira de cilindros por simulação numérica direta. 2002.
- ROSETTI, G. F. **Improvements in the numerical modeling of turbulence and fluid-structure interaction for the vortex-induced vibration of a rigid cilinder**. 251 p. Doutorado — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- ROSETTI, G. F.; FUJARRA, A. L. C. **Improvements in the numerical modeling of turbulence and fluid-structure interaction for the vortex-induced vibrations of a rigid cylinder**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2015.
- ROSETTI, G. F. et al. Cfd calculations of the vortex-induced motions of a circular-column semi-submersible. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. [S.I.], 2016. p. V002T08A064–V002T08A064.
- ROSETTI, G. F.; VAZ, G.; FUJARRA, A. L. Urans calculations for smooth circular cylinder flow in a wide range of reynolds numbers: solution verification and validation. **Journal of Fluids Engineering**, American Society of Mechanical Engineers, v. 134, n. 12, p. 121103, 2012.
- SAHU, A. K.; CHHABRA, R.; ESWARAN, V. Two-dimensional unsteady laminar flow of a power law fluid across a square cylinder. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, Elsevier, v. 160, n. 2-3, p. 157–167, 2009.

SEN, S.; MITTAL, S.; BISWAS, G. Flow past a square cylinder at low reynolds numbers. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, Wiley Online Library, v. 67, n. 9, p. 1160–1174, 2011.

SHARMA, A.; ESWARAN, V. Heat and fluid flow across a square cylinder in the two-dimensional laminar flow regime. **Numerical Heat Transfer, Part A: Applications**, Taylor & Francis, v. 45, n. 3, p. 247–269, 2004.

SINGH, A. et al. Flow past a transversely oscillating square cylinder in free stream at low reynolds numbers. **International journal for numerical methods in fluids**, Wiley Online Library, v. 61, n. 6, p. 658–682, 2009.

SINGH, S.; MITTAL, S. Vortex-induced oscillations at low reynolds numbers: hysteresis and vortex-shedding modes. **Journal of Fluids and Structures**, Elsevier, v. 20, n. 8, p. 1085–1104, 2005.

SOHANKAR, A.; NORBERG, C.; DAVIDSON, L. Low-reynolds-number flow around a square cylinder at incidence: study of blockage, onset of vortex shedding and outlet boundary condition. **International journal for numerical methods in fluids**, Wiley Online Library, v. 26, n. 1, p. 39–56, 1998.

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

THACKER, B. et al. Concepts of model verification and validation (no. la-14167). **Los Alamos National Lab., Los Alamos, NM (US)**, 2004.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. [S.l.]: Pearson Education, 2007.

WHITE, F. **Fluid Mechanics**. McGraw Hill, 2011. (McGraw-Hill series in mechanical engineering). ISBN 9780073529349. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=egk8SQAACAAJ>>.

WINDCRETE. **Second offshore floating wind farm in Scotland, Kincardine, starts delivering energy**. 2019. Disponível em: <<https://www.windcrete.com/second-offshore-floating-wind-farm-in-scotland-kincardine-starts-delivering-energy/>>. Acesso em: 08 aug. 2019.

ZHAO, M.; CHENG, L.; ZHOU, T. Numerical simulation of vortex-induced vibration of a square cylinder at a low reynolds number. **Physics of Fluids**, AIP, v. 25, n. 2, p. 023603, 2013.

ZHAO, W. et al. Numerical investigation of vortex-induced motions of a paired-column semi-submersible in currents. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 164, p. 272–283, 2018.

ZHENG, S.; ZHANG, W.; LV, X. Numerical simulation of cross-flow around three equal diameter cylinders in an equilateral-triangular configuration at low reynolds numbers. **Computers & Fluids**, Elsevier, v. 130, p. 94–108, 2016.

ZHOU, C.; SO, R.; LAM, K. Vortex-induced vibrations of an elastic circular cylinder. **Journal of Fluids and Structures**, Elsevier, v. 13, n. 2, p. 165–189, 1999.

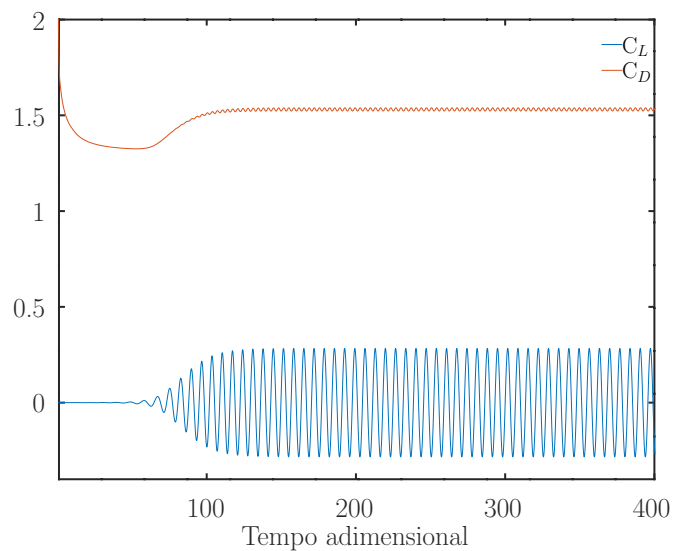
ÉPOCA NEGÓCIOS. **Plataformas offshore têm evolução constante**. 2014.
Disponível em: <<https://epocanegocios.globo.com/Caminhos-para-o-futuro/Energia/noticia/2014/11/plataformas-offshore-tem-evolucao-constante.html>>. Acesso em: 17 set. 2018.

APÊNDICE A - COLUNA FIXA COM SEÇÃO QUADRADA

Para a coluna fixa com seção quadrada, foram utilizados quatro ângulos de incidência do escoamento (α): 0° , 15° , 30° e 45° . As malhas utilizadas possuem a mesma ordem de h_1 e o mesmo incremento de tempo t_1 do caso circular.

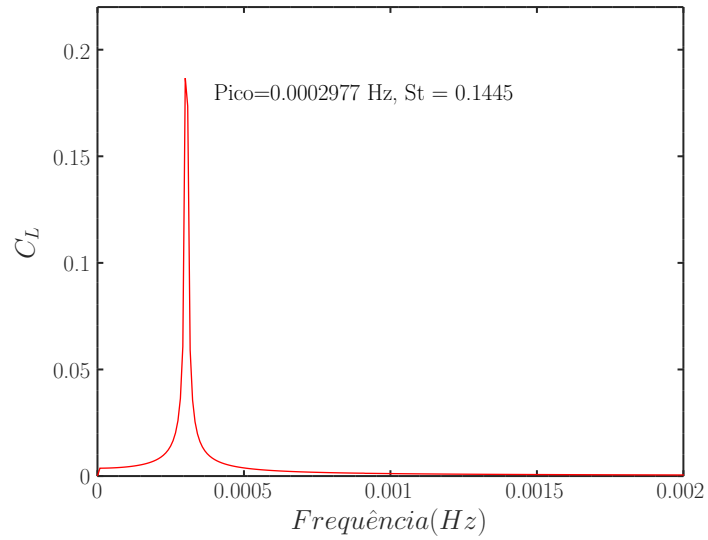
Os coeficientes de arrasto e sustentação e a frequência de desprendimento de vórtices foram coletados, sendo apresentados nas formas de histórico de tempo e densidade espectral, respectivamente, Figuras 105 e 106.

Figura 105 – Histórico de tempo de C_D e C_L para o caso quadrado com 0° .



Fonte: Autora (2019).

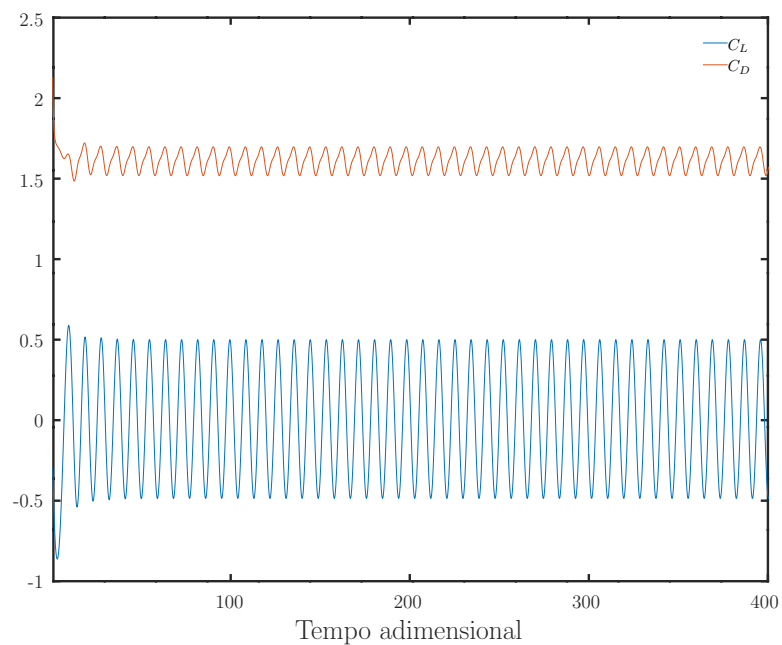
Figura 106 – Frequência para o caso quadrado com 0° .



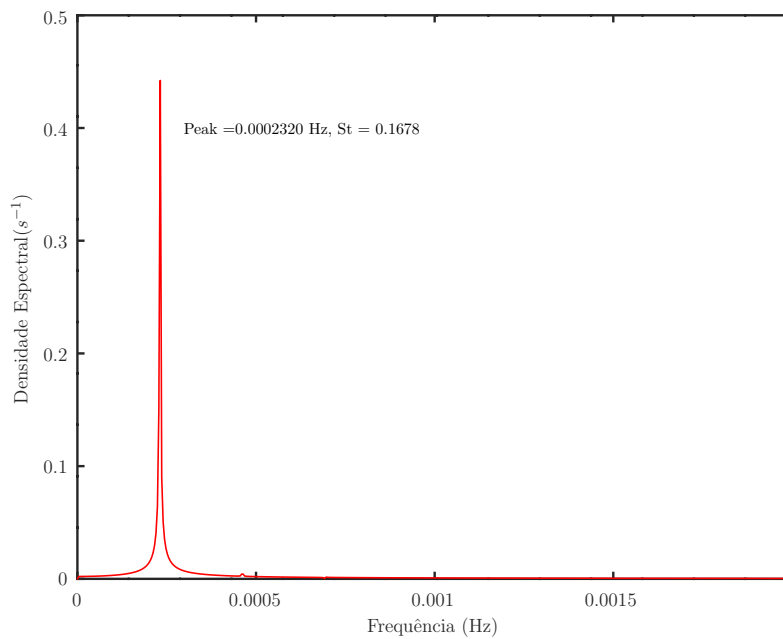
Fonte: Autora (2019).

Agora, aplicando os aproamentos, os seguintes históricos de tempo dos coeficientes de arrasto e sustentação, e densidade espectral foram obtidos:

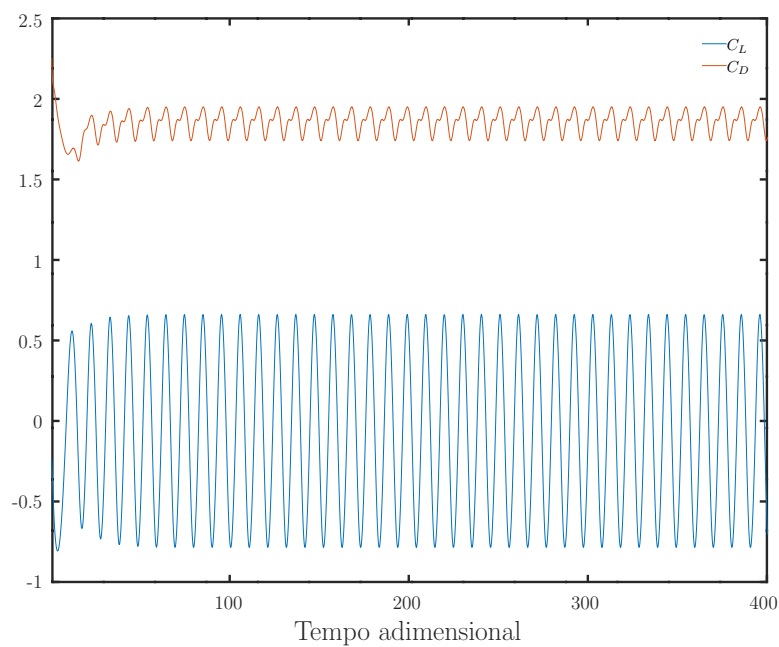
Figura 107 – Histórico de tempo de C_D e C_L para o caso com 15° .



Fonte: Autora (2019).

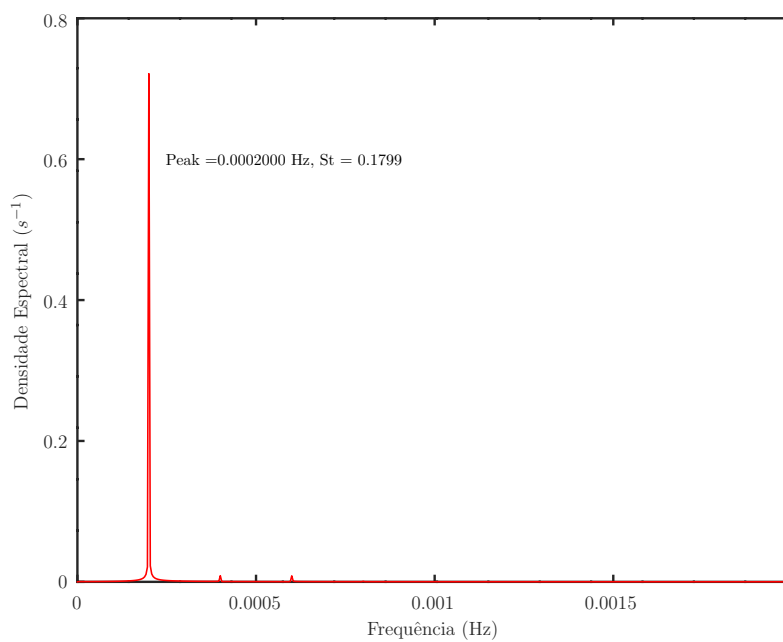
Figura 108 – Frequência para o caso com 15° 

Fonte: Autora (2019).

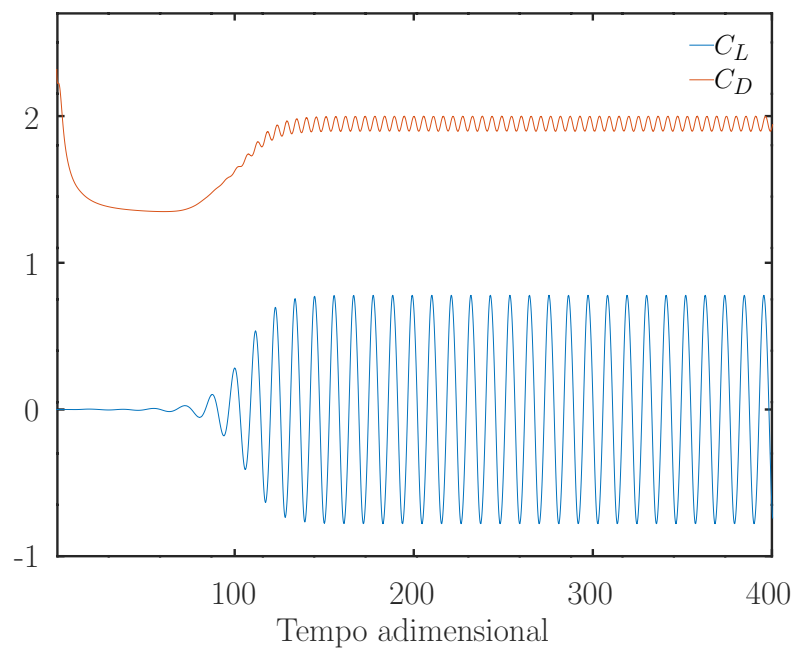
Figura 109 – Histórico de tempo de C_D e C_L para o caso com 30° .

Fonte: Autora (2019).

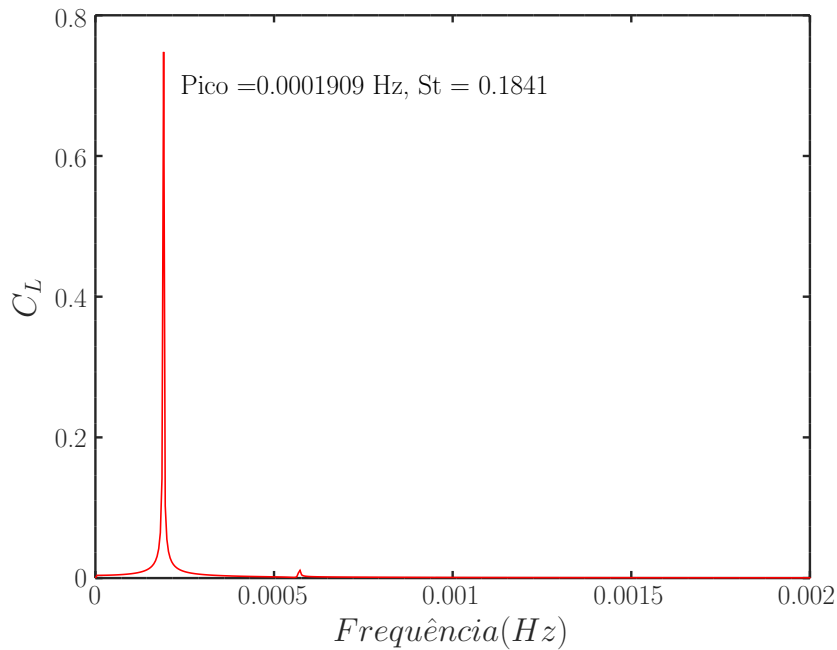
Figura 110 – Frequência para o caso com 30°.



Fonte: Autora (2019).

Figura 111 – Histórico de tempo de C_D e C_L para o caso com 45°.

Fonte: Autora (2019).

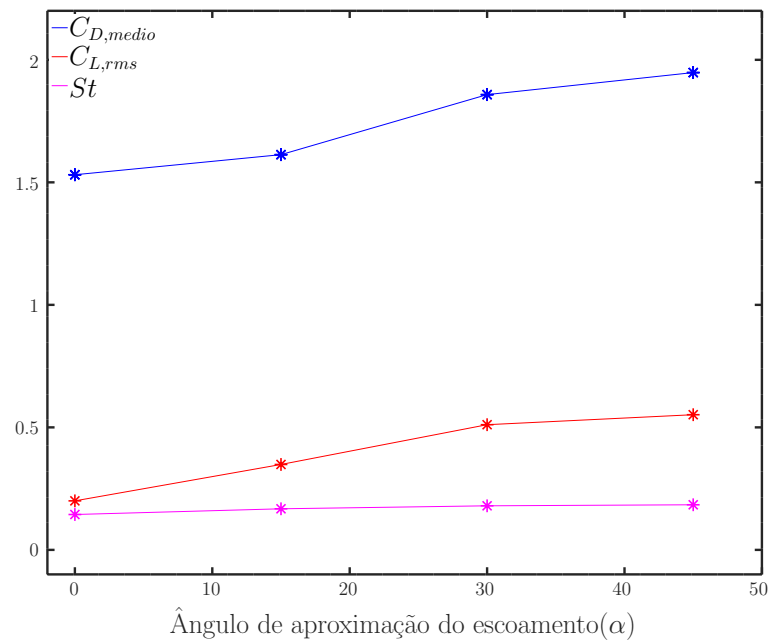
Figura 112 – Frequência para o caso com 45° .

Fonte: Autora (2019).

As seções quadradas têm um ponto fixo de separação da camada limite, permitindo um descolamento antecipado quando comparado com a seção circular. Além disso, é evidente que as geometrias assimétricas, como as de 15° e 30° graus, iniciam o desprendimento de vórtices antes das seções simétricas, 0° e 45° graus.

A Figura 113 mostra os efeitos dos ângulos de aproximação nos resultados dos coeficientes de arrasto (curva azul), sustentação (curva vermelha) e número de Strouhal (curva magenta). Pode-se observar que o ângulo de aproximação do escoamento tem efeito significativo sobre o $C_{L,rms}$. Os valores para $\alpha = 15^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$ são 1,74; 2,55 e 2,76 vezes o valor para $\alpha = 0^\circ$, respectivamente. Zhao, Cheng e Zhou (2013) teve as mesmas conclusões em seu trabalho, porém com valores um pouco diferentes. A frequência de liberação de vórtices também aumenta, o que reflete em um aumento no número de Strouhal.

Figura 113 – Variação de $\overline{C_D}$, $C_{L,rms}$ e St com α .



Fonte: Autora (2019).

A Tabela 6 mostra as comparações dos presentes resultados com aqueles encontrados na literatura para seções quadradas. Para $\alpha = 0^\circ$, os resultados para $\overline{C_D}$ e St do presente modelo comparam-se favoravelmente com outros resultados numéricos, os resultados dos valores de $C_{L,rms}$ de diferentes estudos, porém, estão dispersos. A concordância ocorre principalmente com os valores de Sen, Mittal e Biswas (2011). Para $\alpha = 15^\circ$ não foi encontrado nenhum valor na literatura. Para $\alpha = 30^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$ vê-se disparidades entre os valores, as quais podem ser decorrentes, entre outros fatores, da maneira como o comprimento característico do corpo é considerado.

Tabela 6 – Resultados para seção quadrada.

| α [°] | Estudos | B | $\overline{C_D}$ | $C_{L,rms}$ | St |
|--------------|-------------------------------------|-------|------------------|-------------|-------|
| 0 | (SOHANKAR; NORBERG; DAVIDSON, 1998) | 0,05 | 1,477 | 0,156 | 0,146 |
| 0 | (DAREKAR; SHERWIN, 2001) | 0,023 | 1,486 | 0,186 | 0,146 |
| 0 | (SHARMA; ESWARAN, 2004) | 0,05 | 1,494 | 0,192 | 0,149 |
| 0 | (SINGH et al., 2009) | 0,05 | 1,51 | 0,16 | 0,147 |
| 0 | (SINGH et al., 2009) | 0,1 | 1,605 | 0,171 | 0,154 |
| 0 | (SAHU; CHHABRA; ESWARAN, 2009) | 0,05 | 1,488 | 0,188 | 0,149 |
| 0 | (SEN; MITTAL; BISWAS, 2011) | 0,05 | 1,529 | 0,193 | 0,145 |
| 0 | (ZHAO; CHENG; ZHOU, 2013) | 0,025 | 1,452 | 0,198 | 0,145 |
| 0 | Presente | 0,05 | 1,531 | 0,200 | 0,144 |
| 15 | Presente | 0,061 | 1,613 | 0,349 | 0,168 |
| 22.5 | (ZHAO; CHENG; ZHOU, 2013) | 0,025 | 1,1660 | 0,544 | 0,141 |
| 30 | (SOHANKAR; NORBERG; DAVIDSON, 1998) | 0,05 | 1,620 | 0,928 | 0,172 |
| 30 | Presente | 0,068 | 1,858 | 0,511 | 0,180 |
| 45 | (SOHANKAR; NORBERG; DAVIDSON, 1998) | 0,05 | 1,720 | 0,450 | 0,175 |
| 45 | (ZHAO; CHENG; ZHOU, 2013) | 0,025 | 1,870 | 0,654 | 0,139 |
| 45 | Presente | 0,071 | 1,948 | 0,552 | 0,184 |

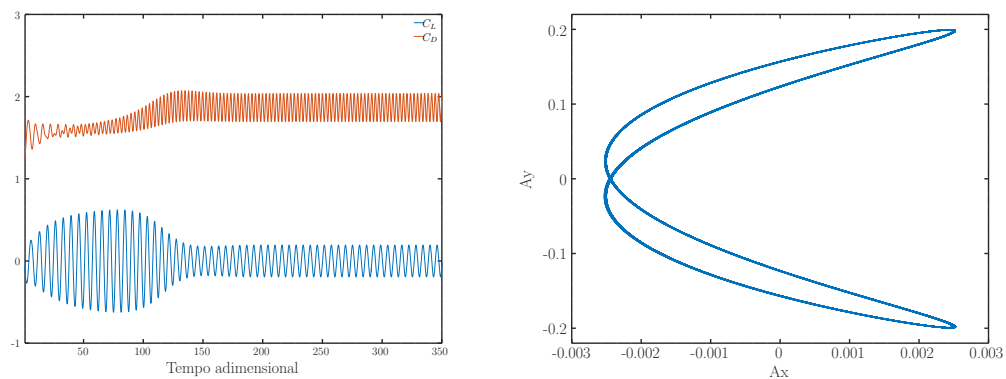
Fonte: Autora (2019).

APÊNDICE B - VIV COM 2 GDL PARA SEÇÃO QUADRADA

Para o VIV de uma seção quadrada com razão de massa $m^* = 10$, não foram encontrados resultados numéricos ou experimentais na literatura. Todavia, as simulações seguem o mesmo padrão da seção circular, para que os resultados possam ser comparados entre si, portanto, $m^* = 10$, $\zeta = 0$, $Vr = 6,024$ e $Re = 100$.

Para o ângulo de incidência de $\alpha = 0^\circ$, foram obtidas as amplitudes $A_y = 0,199$ e $A_x = 0,002$, sendo que o movimento acoplado apresenta um formato de oito, Figura 114. Os resultados dos coeficiente foram $\overline{C_D} = 1,868$, $C_{L,rms} = 0,133$ e $C_{D,rms} = 0,121$.

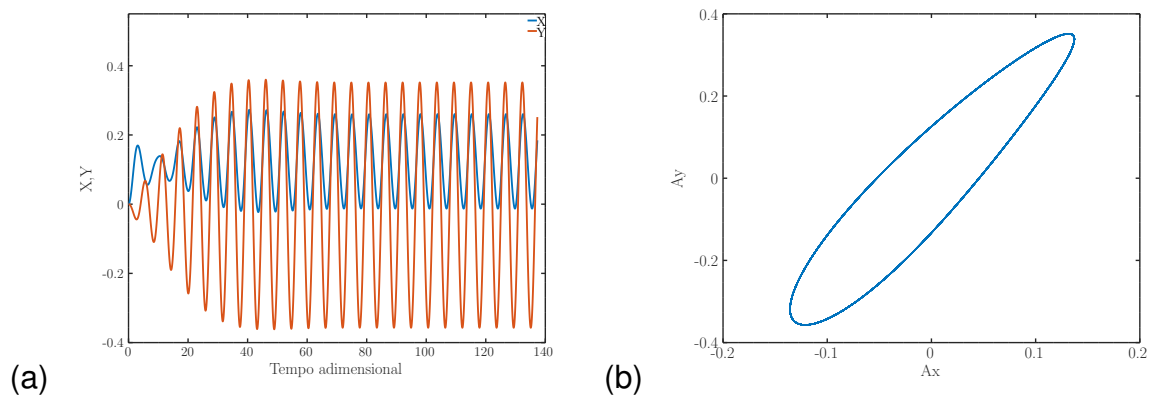
Figura 114 – Histórico de tempo para C_D e C_L para $\alpha = 0^\circ$ e seu movimento acoplado.



Fonte: Autora (2019).

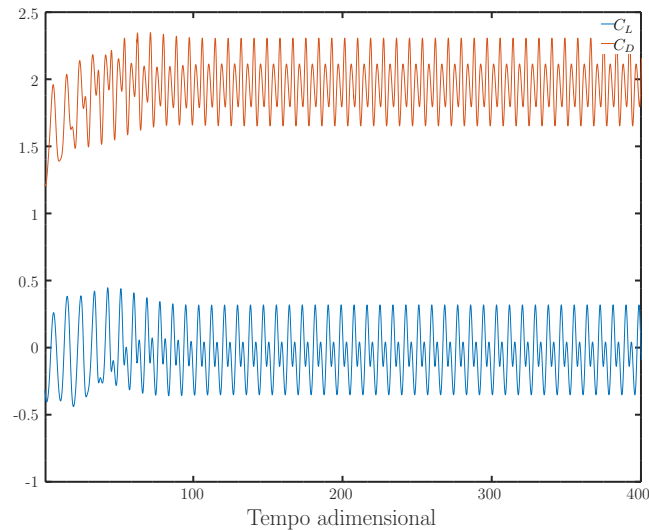
Para o ângulo de incidência de $\alpha = 15^\circ$, foram obtidos $A_y = 0,357$ and $A_x = 0,096$ e nesse caso, o movimento acoplado forma uma elipse. Pode-se observar na Figura 115 que a frequência de oscilação tanto no sentido longitudinal como transversal são iguais e seu valor é de $f_y = 2,40e^{-04}Hz$, muito próximo ao da frequência de emissão de vórtices calculada pelo caso fixo, equivalente a $f_s = 2,32e^{-04}Hz$. Os resultados dos coeficiente foram $\overline{C_D} = 1,964$, $C_L^{rms} = 0,194$ e $C_D^{rms} = 0,182$, Figura 116.

Figura 115 – Histórico de tempo para deslocamento da coluna e seu movimento acoplado.



Fonte: Autora (2019).

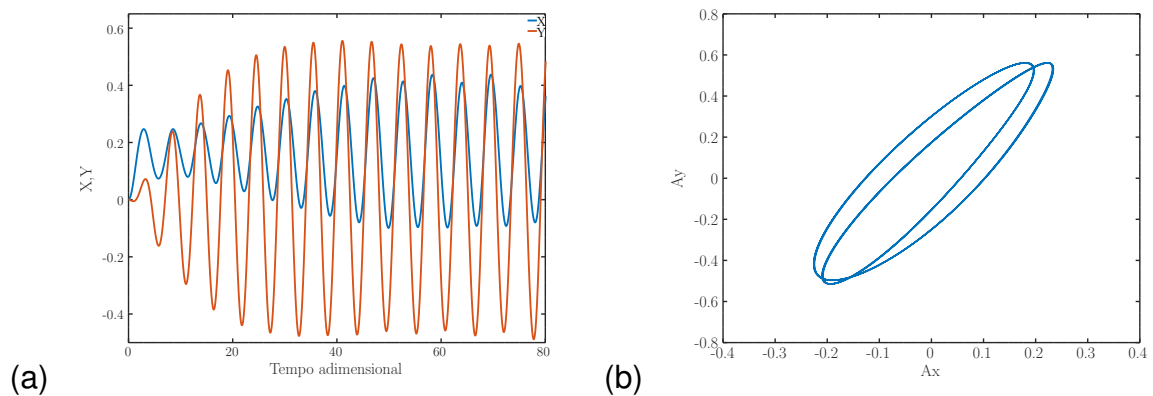
Figura 116 – Histórico de tempo para C_D e C_L para $\alpha = 15^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

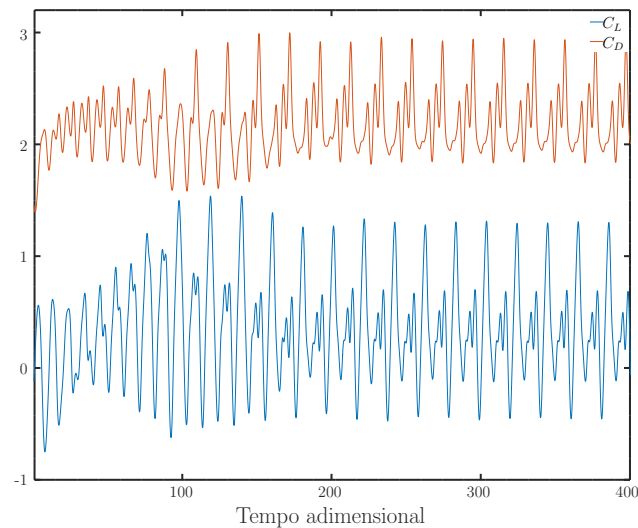
Com $\alpha = 30^\circ$ identificou-se amplitudes com $A_y = 0,562$ e $A_x = 0,153$, e o movimento acoplado gera dois laços de elipse. As amplitudes variam ao longo do tempo e a frequência oscilação é igual a $f_y = 2,00e^{-04}$, Figura 117. Os coeficientes obtidos foram $\overline{C_D} = 2,205$, $C_L^{rms} = 0,424$ e $C_D^{rms} = 0,270$, Figura 118.

Figura 117 – Histórico de tempo para deslocamento da coluna e seu movimento acoplado, $\alpha = 30^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

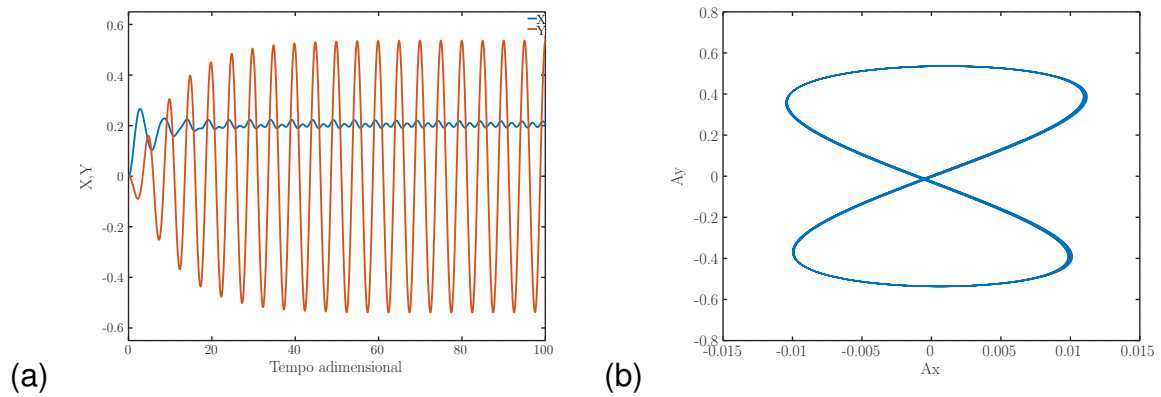
Figura 118 – Histórico de tempo para C_D e C_L para $\alpha = 30^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

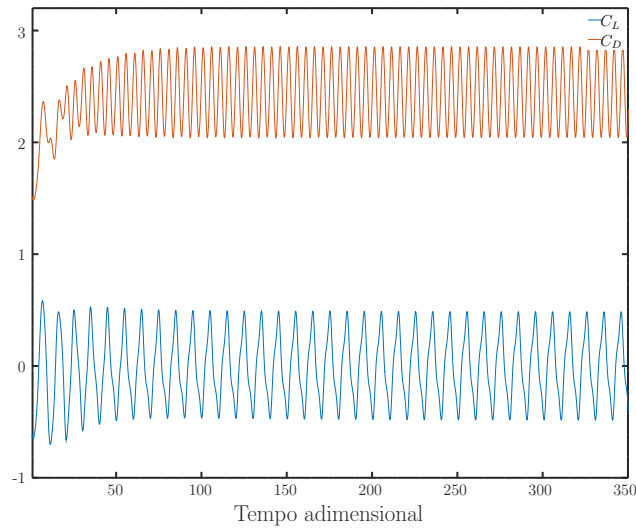
Para a seção diamante (45°), identificou-se $A_y = 0,536$ e $A_x = 0,007$, sendo que novamente surge o formato de oito no movimento acoplado, Figura 119. A amplitude de oscilação em x é muito menor que a amplitude em y , e $f_x = 2f_y$, sendo essa última igual a $f_y = 2,00e - 04Hz$. Os coeficientes obtidos foram $\overline{C_D} = 2,445$, $C_L^{rms} = 0,301$, $C_D^{rms} = 0,286$, Figura 120.

Figura 119 – Histórico de tempo para o deslocamento da coluna e seu movimento acoplado, $\alpha = 45^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

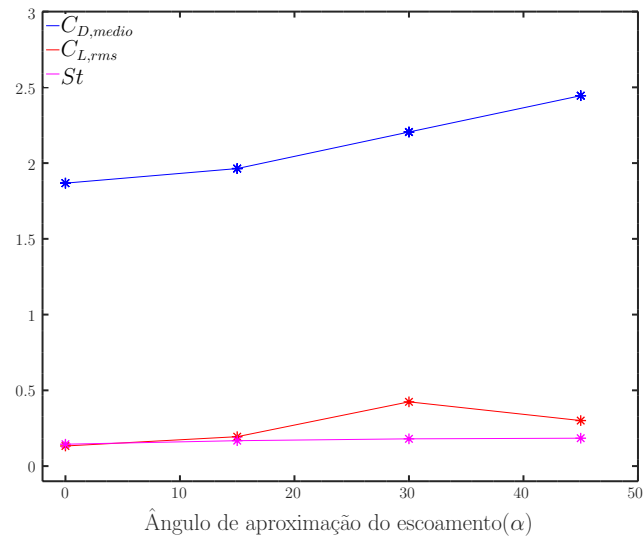
Figura 120 – Histórico de tempo para C_D e C_L para $\alpha = 45^\circ$.



Fonte: Autora (2019).

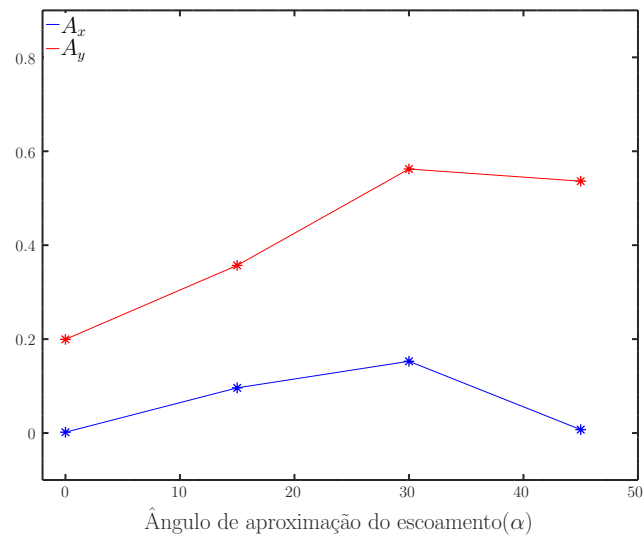
Portanto, nota-se diferentes formas de movimento acoplado para cada aprumo. A seguir, são comparados os resultados dos coeficientes e do número de Strouhal para cada ângulo de incidência do escoamento, Figura 121, também é mostrada a variação das amplitudes, Figura 122.

Figura 121 – Variação de $\overline{C_D}$, $C_{L,rms}$ e St com α .



Fonte: Autora (2019).

Figura 122 – Variação de A_x e A_y com α .



Fonte: Autora (2019).

Os valores de $\overline{C_D}$, $C_{L,rms}$, A_y e A_x crescem com o aumento do ângulo de incidência do escoamento. Porém, para a seção diamante, ângulo de 45° , os valores de A_x e de $C_{L,rms}$ diminuem.

APÊNDICE C - TRANSFORMAÇÃO DA MALHA DO FLUENT PARA O OPENFOAM

Para simular os arranjos de seções foi utilizado o programa Ansys para construir as malhas. Assim, de modo a verificar os resultados, foi simulado um único cilindro, utilizando a mesma ordem de células de h_1 e o incremento de tempo t_1 . Os resultados são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados obtidos das diferentes malhas.

| | Malha openFOAM | Malha Fluent | Diferença relativa entre malhas |
|------------------|-----------------------|---------------------|--|
| $\overline{C_D}$ | 1,388 | 1,397 | 0,67% |
| $C_{L,rms}$ | 0,244 | 0,249 | 2,34% |
| f_s | $2,72e^{-04}$ | $2,75e^{-04}$ | 1,08% |

Fonte: Autora (2019).

Com esses resultados, concluiu-se que a conversão da malha Fluent para a malha OpenFOAM funciona bem, então as malhas dos arranjos podem ser geradas no programa Ansys.