

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

COMPUTATIONAL FLUIDODYNAMICS APPLIED TO THE STUDY OF FORCES AND MOVEMENTS INDUCED BY VORTICES IN DIFFERENT CROSS SECTIONS FORMATS OF THE COLUMNS OF SEMISUBMERSIBLE PLATFORMS

FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL APLICADA AL ESTUDIO DE FUERZAS Y MOVIMIENTOS INDUCIDOS POR VORTEXES EN DIFERENTES FORMATOS DE SECCIONES CRUZADAS DE COLUMNAS DE PLATAFORMAS SEMISUBERSERIBLES

1

Aline Peres Leal¹
André Luís Condino Fugarra²

Resumo: Neste trabalho, realizou-se a análise fluidodinâmica computacional de seções nos formatos circular, quadrada e diamante de uma coluna de plataformas offshore, nas condições fixa e com dois graus de liberdade (2GDL). O objetivo desse trabalho é avaliar as seções que amenizam o movimento induzido por vórtices, como base para simulações mais complexas, com número de Reynolds mais elevados e no domínio tridimensional, utilizando um programa gratuito e de código aberto. As simulações foram conduzidas em escoamento bidimensional no regime laminar ($Re=100$). As simulações com grau de liberdade foram feitas com razão de massa 10, sem consideração de amortecimento externo. Dos resultados obtidos, o menor valor de arrasto médio foi encontrado para a coluna circular fixa e o menor valor quadrático médio de sustentação ocorreu para a coluna de seção quadrada com 2GDL.

Palavras-chave: Análise numérica. Plataformas offshore. Seções. VIM. Grau de liberdade.

¹ Engenheira. UFSC. E-mail: aline.leal@grad.ufsc.br

² Prof. Dr. UFSC. E-mail: andre.fugarra@ufsc.br

Abstract: In this work, the computational fluid dynamics analysis of sections in the circular, square and diamond formats of an offshore platform column was performed, in fixed condition and with two degrees of freedom (2DOF). The objective of this work is to evaluate the sections that soften the vortex induced motion, as a basis for more complex simulations, with a higher Reynolds number and in the three-dimensional domain, using a free and open source program. The simulations were conducted in a two-dimensional laminar flow ($Re = 100$). The simulations with degree of freedom were performed with a mass ratio of 10, without considering external damping. From the results obtained, the lowest mean drag value was found for the fixed circular column and the lowest root mean square lift value occurred for the square section column with 2DOF.

Keywords: Numerical analysis. Offshore platforms. Sections. VIM. Degree of freedom.

Resumen: En este trabajo, se realizó el análisis de dinámica de fluidos computacional de secciones en los formatos circular, cuadrado y de diamante de una columna de plataforma costa afuera, en condiciones fijas y con dos grados de libertad (2GDL). El objetivo de este trabajo es evaluar las secciones que suavizan el movimiento inducido por los vórtices, como base para simulaciones más complejas, con un mayor número de Reynolds y en el dominio tridimensional, utilizando un programa gratuito y de código abierto. Las simulaciones se realizaron con flujo bidimensional en el régimen laminar ($Re = 100$). Las simulaciones con grado de libertad se realizaron con una relación de masa de 10, sin considerar la amortiguación externa. A partir de los resultados obtenidos, se encontró el valor de arrastre medio más bajo para la columna circular fija y el valor de soporte cuadrado cuadrado más bajo para la columna de sección cuadrada con 2GDL.

Palabras-clave: Análisis numérico. Plataformas marinas. Secciones. VIM. Grado de libertad.

Submetido 23/04/2020

Aceito 27/07/2020

Publicado 03/02/2021

2

Introdução

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 em alto mar. Tais plataformas podem ser definidas como construções utilizadas 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.

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 nessa área.

Plataformas semissubmersíveis operam em mar agitado, sofrem movimentações devido à ação das ondas, correntezas e ventos, com possibilidade de danificar equipamentos. 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.

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 à frequência natural do sistema em águas calmas, o acúmulo da energia vibracional aumenta rapidamente, produzindo grandes amplitudes de oscilação (ZHAO et al., 2018).

Testes com modelos têm sido utilizados por anos para o estudo e previsão de VIM de plataformas offshore, porém, são custosos e não conseguem reproduzir todos os aspectos de interesse simultaneamente. 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 (1GDL) utilizando o programa OpenFOAM, ao passo que Conceição (2016), Prasanth e Mittal

(2008) e Zhou, So e Lam (1999) realizaram a simulação numérica de um cilindro com 2GDL. Avaliando uma coluna com seção quadrada, os trabalhos de He, Zhou e Bao (2012) e Cui et al. (2015) estudaram diferentes direções de escoamento de uma coluna fixa.

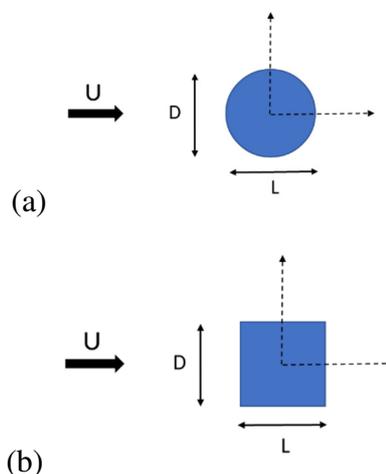
Nesse cenário, este trabalho está inserido em um projeto de Iniciação Científica, com pesquisas colaborativas entre Brasil e Japão, no qual o propósito é o estudo de diferentes formatos das colunas de plataformas offshore, a fim de identificar as características de escoamento que minimizam o VIM.

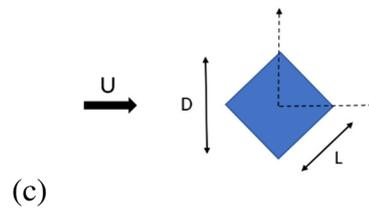
Aspectos da Simulação Numérica

Primeiramente foi realizada a simulação numérica de um cilindro (seção circular) fixo, para o qual já se tem resultados tanto numéricos como experimentais bem descritos na literatura, o que possibilita a etapa de validação do modelo numérico. Foi feito também o estudo de convergência de malha e incremento de tempo, para que fosse possível o processo de verificação. Após essas etapas, foi 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 1 mostra um esquema dos modelos analisados, onde o comprimento característico, D , é a dimensão vista pelo escoamento com velocidade U e L é a largura (ou lado) da coluna.

4

Figura 1 – Modelos de estudo: a) seção circular; b) seção quadrada e c) seção diamante.





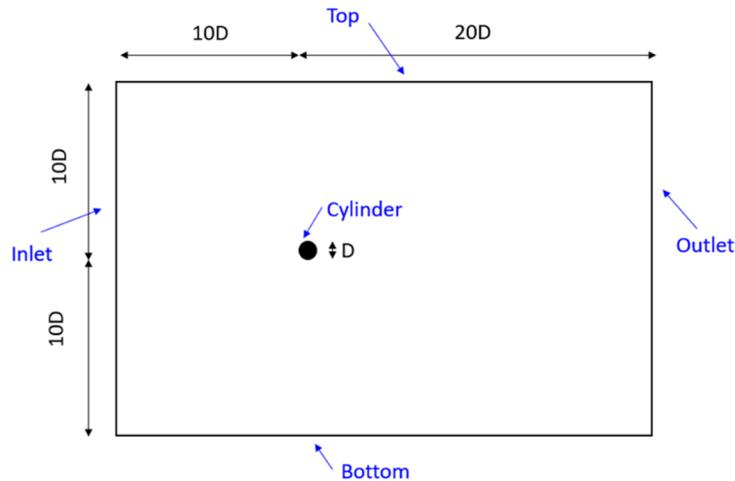
Fonte: Autores (2020).

O programa utilizado para realizar as simulações do presente trabalho foi o OpenFOAM, o qual faz uso do Método dos Volumes Finitos (MVF). Para o escoamento laminar em regime transiente com coluna fixa foi utilizado o algoritmo pisoFoam e para 2GDL o algoritmo pimpleDyMFoam. Estes algoritmos foram 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 foi necessário a adoção de modelos de turbulência.

Os limites do domínio computacional adotado são representados na Figura 2 e as condições de contorno utilizadas foram as seguintes:

- *Inlet*: Descreve a entrada do escoamento, velocidade foi 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*: Foi 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 foi considerada com condição de parede (a componente normal da velocidade é nula nessa região);
- *FrontAndBack*: Estes planos foram considerados como vazios pelo fato de ser um escoamento bidimensional.

Figura 2 – Domínio computacional e condições de contorno.



Fonte: Autores (2020).

Em um movimento bidimensional, o vetor de velocidade do fluido é \vec{V} . As componentes horizontal e vertical da velocidade são u e v , respectivamente (BLEVINS, 1977). No presente trabalho, a velocidade definida como condição de entrada possui apenas sua componente horizontal. Dentro de alguma distância além do limite do domínio computacional, a velocidade atinge um valor constante, U , chamado de velocidade de escoamento livre.

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 1, e as equações de Navier-Stokes, Equações 2 (BLEVINS, 1977):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

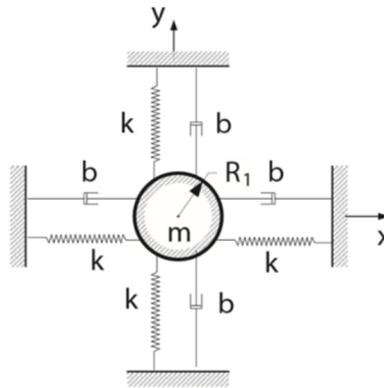
$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

onde \vec{V} é o vetor de velocidade do fluido, ρ é a massa específica do fluido, P é a pressão e ν é a viscosidade cinemática. Quando resolvido, o conjunto de equações diferenciais fornece detalhes de velocidade, pressão, massa específica (invariável para o escoamento incompressível), entre outras propriedades, em cada ponto de todo o domínio do escoamento.

Para a equação do movimento da coluna, 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 3, onde b é o coeficiente de amortecimento, k é a rigidez da mola, m é a massa do corpo e R_1 o raio do corpo.

Figura 3 – 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 (2GDL), utilizando o modelo harmônico, as equações adimensionais que determinam os deslocamentos do corpo nas direções dos eixos x (Equação 3) e y (Equação 4) são (BLEVINS, 1977):

$$My \ddot{y} + 2 M \zeta \omega_n \dot{y} + ky = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_L \sin \omega_s t \quad (3)$$

$$M\ddot{x} + 2 M \zeta \omega_n \dot{x} + kx = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_D \sin 2\omega_s t \quad (4)$$

onde y é o deslocamento do corpo no plano vertical, x é o deslocamento no plano horizontal, M é a massa do corpo, incluindo a massa adicional, $\zeta = \frac{b}{2\sqrt{k(m+m_A)}}$ é o fator de amortecimento da estrutura, ω_n é a frequência natural do corpo, D é a dimensão característica do corpo, ρ é a massa específica do fluido, U é a velocidade de escoamento livre, ω_s é a frequência de despreendimento de vórtices e; C_L e C_D são os coeficientes de sustentação e de arrasto, respectivamente.

Verificação e Validação

A verificação de código não foi tratada neste trabalho, sendo a verificação da solução o principal problema estudado. Primeiro foram realizados os estudos de verificação e as incertezas numéricas estimadas com base no método apresentado por Eça e Hoekstra (2009), Eça, Vaz e Hoekstra (2010) e Rosetti e Fugarra (2015). Posteriormente, os resultados numéricos com as menores incertezas foram comparados com os valores experimentais no processo de validação.

Na análise de incerteza, foram estudados três tamanhos de malha e três incrementos de tempo para o caso circular, resultando em 9 simulações. Essas variáveis podem ser representadas em valores adimensionais, que são definidos por discretização de espaço e tempo, como mostrado pela Equação 5 e Equação 6, respectivamente:

$$h_i = \sqrt{\frac{N_{cel,1}}{N_{cel,i}}} \quad (5)$$

$$t_i = \frac{\tau_i}{\tau_1} \quad (6)$$

Portanto, h_1 é a malha mais refinada e t_1 é o incremento de tempo mais refinado. A discretização de espaço e tempo para a seção circular isolada são mostradas na Tabelas 1 e Tabela 2, respectivamente.

Tabela 1 – Discretização de espaço.

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

Fonte: Autores (2020).

Tabela 2 – Discretização de tempo.

Incremento de Tempo	TS1	TS2	TS3
T	2,5	5	7,5
t _i	1	2	3

Fonte: Autores (2020).

Análise dos Resultados

Usualmente, os dados necessários para análise são as forças resultantes sobre o corpo. O OpenFOAM oferece os valores dos coeficientes de arrasto e de sustentação, representados pela Equação 7 e 8, respectivamente.

$$C_D = \frac{F_D}{0,5\rho U^2 A} \quad (7)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0,5\rho U^2 A}, \quad (8)$$

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

Além disso, para que os resultados sejam bem interpretados, é necessária a definição de algumas variáveis adimensionais importante. O número de Strouhal, St, relaciona o tempo característico com o período de oscilação. Ele é definido conforme (BLEVINS, 1977),

$$St = \frac{f_s D}{U}, \quad (9)$$

onde D é o comprimento característico do corpo, U é a velocidade livre de escoamento livre e f_s é a frequência de emissão de vórtices ou frequência 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 10.

$$m^* = \frac{m_{est}}{m_f} \quad (10)$$

A velocidade reduzida, V_r , é definida como razão entre a velocidade do escoamento livre pelo produto entre a frequência natural do sistema e a dimensão característica do corpo, Equação 11.

$$V_r = \frac{U}{f_n D} \quad (11)$$

A amplitude característica é a máxima amplitude de deslocamento transversal do corpo, Y_{max} , sobre seu comprimento característico, Equação 12.

$$A_y = \frac{Y_{max}}{D} \quad (12)$$

Para o deslocamento do corpo na direção do escoamento, utiliza-se o valor quadrático médio, X_{rms} , sobre seu comprimento característico, Equação 13.

$$A_x = \frac{X_{rms}}{D} \quad (13)$$

Os resultados foram analisados empregando-se o programa Octave 4.2.2 para que, a partir dos dados obtidos pelo OpenFOAM, fossem calculados o valor médio e valor quadrático médio (rms) dos dados. Também foi utilizada a Transformada Rápida de Fourier – *Fast Fourier Transform* (FFT), aplicada ao registro do coeficiente de sustentação e do deslocamento do corpo, para encontrar a frequência de liberação de vórtices e as frequências de vibração da seção, respectivamente.

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

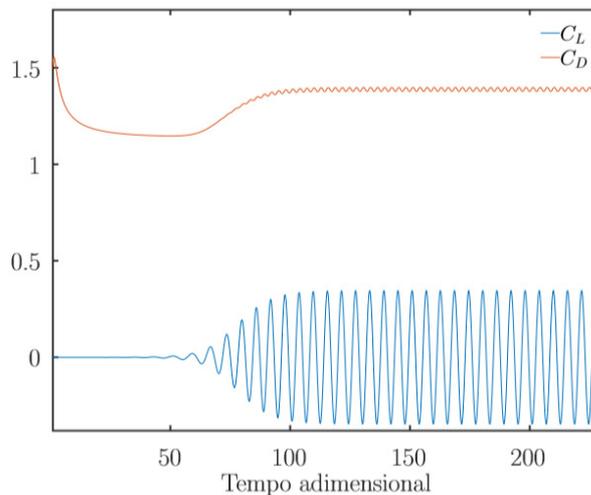
$$\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{U} \quad (14)$$

Resultados e Discussões

Seção Circular Fixa

Para o caso de uma coluna fixa com seção circular, com $Re = 100$, os resultados a seguir correspondem à malha mais refinada (h_1) e ao incremento de tempo mais refinado (t_1). A Figura 4 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, $C_{L,rms} = 0,244$.

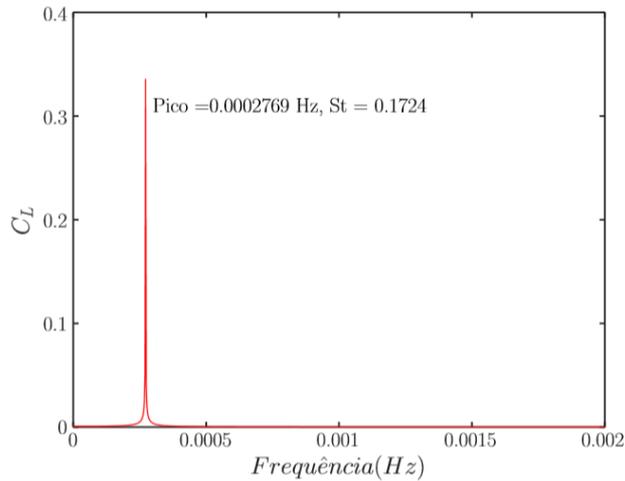
Figura 4 – Histórico de tempo de C_D e C_L para o caso circular.



Fonte: Autores (2020).

Após realizar a FFT da força de sustentação, gerou-se a Figura 5, 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 5 – Espectro de frequência para o caso circular.

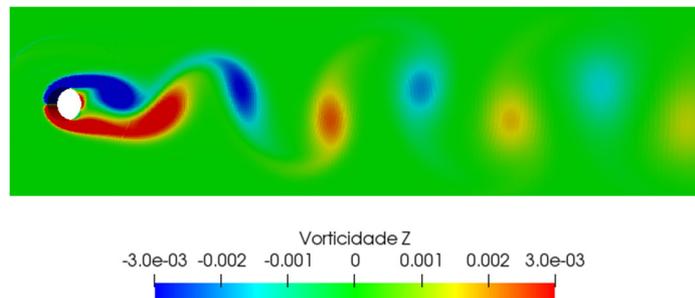


Fonte: Autores (2020).

Na Figura 6 é mostrada a vorticidade perpendicular ao plano do escoamento (rotação da velocidade no eixo z), onde 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.

12

Figura 6 – Vorticidade para o caso circular, tempo adimensional 148.



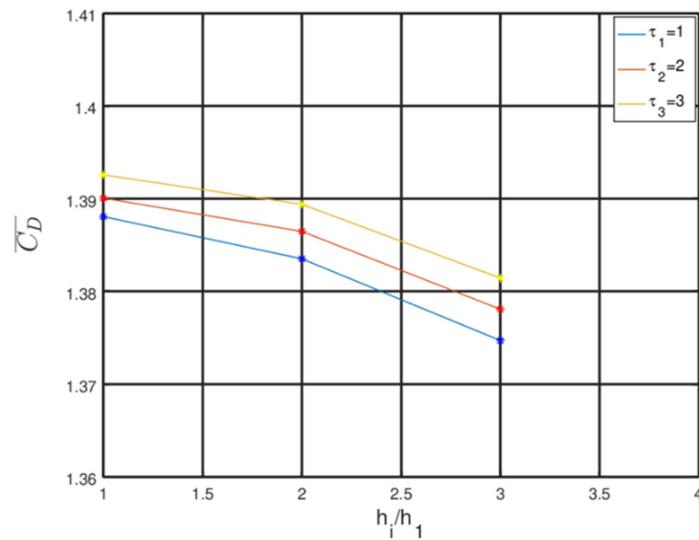
Fonte: Autores (2020).

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 ao longe.

Verificação e Validação para a Seção Circular Fixa

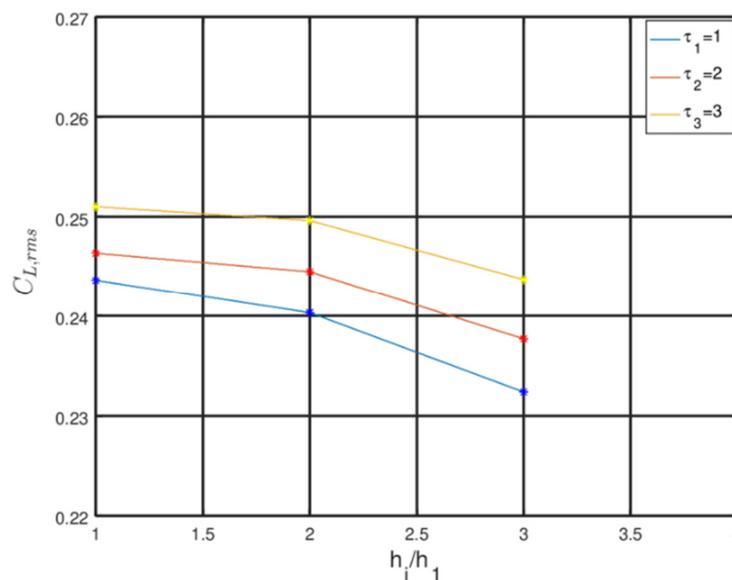
Continuando com o caso da seção circular fixa com $Re=100$, a sensibilidade dos resultados do coeficiente de arrasto e de sustentação à variação do número de células e incremento de tempo é mostrada nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

Figura 7 – Análise de convergência para o coeficiente médio de arrasto.



Fonte: Autores (2020).

Figura 8 – Análise de convergência para o coeficiente de sustentação rms.



Fonte: Autores (2020).

É possível observar que com a diminuição do incremento de tempo e do tamanho da malha a diferença entre os valores diminui, evidenciando a convergência dos resultados. Prosseguindo com o processo de verificação, foi encontrada uma incerteza numérica de $U(\overline{C_D}) = 0,0025$ e $C_{D\text{exact}} = 1,3881$. Para o $C_{L,\text{rms}}$ foi encontrada uma incerteza numérica de $U(C_{L,\text{rms}}) = 0,0030$ e um valor exato de $(C_{L,\text{rms}})_{\text{exact}} = 0,2415$. Finalmente, para o número de Strouhal, $U(St) = 0,000006597$ e $St_{\text{exact}} = 0,16897$. 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.

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

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

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

14

Os resultados são comparados com valores experimentais nas Figuras 9 e 10, nas quais o ícone 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.

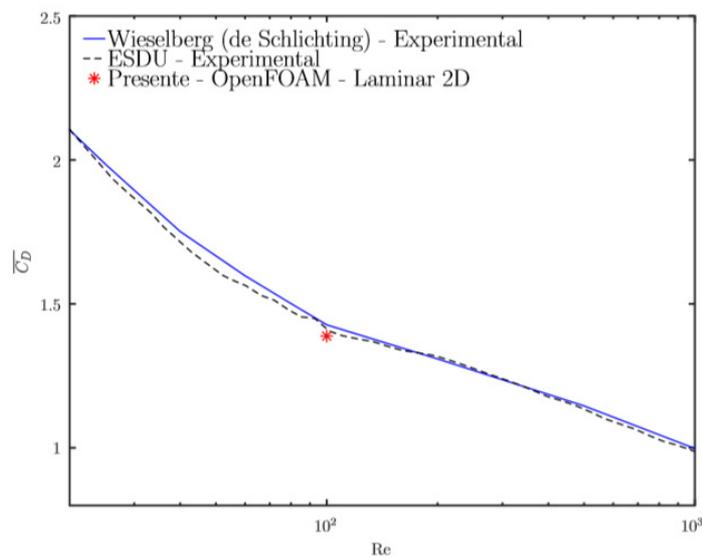
É esperada uma discrepância entre os valores experimentais e numéricos, uma vez que os efeitos tridimensionais, inevitáveis nos experimentos, não estão presentes nas simulações bidimensionais. Em relação aos valores experimentais, Rosetti (2015) encontrou uma incerteza experimental de $U_{\text{data}}(\overline{C_D})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

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

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

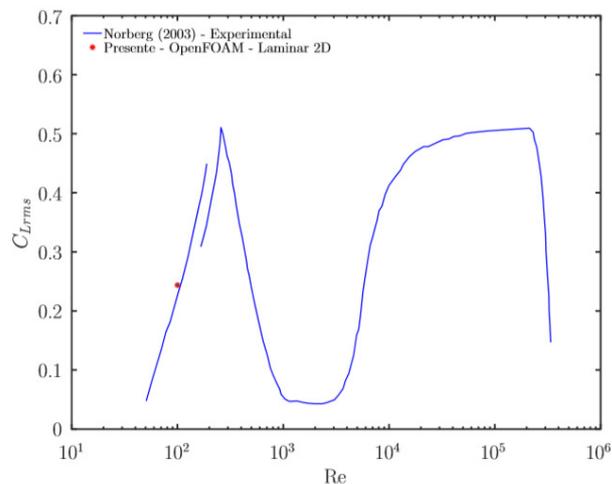
Como $|\epsilon| < U_{val}$, conclui-se que o resultado numérico para o coeficiente de arrasto médio é validado com o valor experimental.

Figura 9 – Resultados numérico e experimentais para o coeficiente de arrasto médio.



Fonte: Adaptado de Rosetti (2015).

Figura 10 – Resultados numérico e experimentais para o coeficiente de sustentação.



Fonte: Adaptado de Norberg (2003).

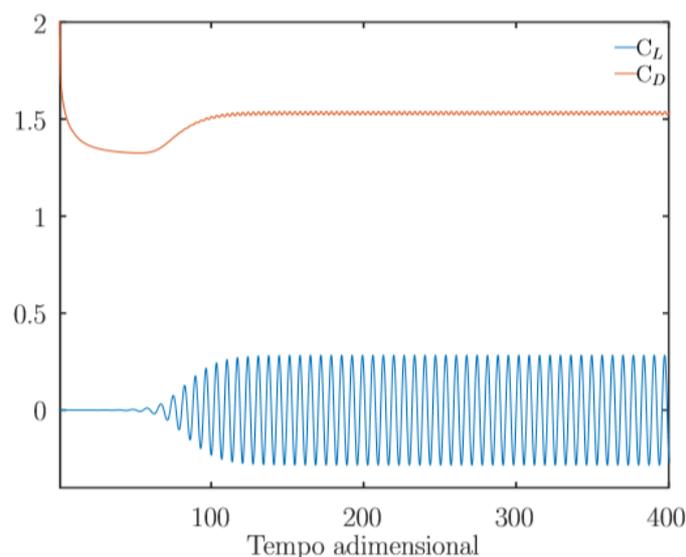
Para os valores do coeficiente de sustentação e do número de Strouhal não foram encontrados valores de incertezas experimentais que possibilitassem o processo de validação dos mesmos. Tendo verificado e validado as simulações da coluna circular fixa, o próximo passo é alterar o formato da seção.

Seção Quadrada Fixa

Para a coluna fixa com seção quadrada, $Re = 100$, as malhas utilizadas possuem a mesma ordem de h_1 e o mesmo incremento de tempo t_1 do caso circular, visto que os resultados foram validados e o tempo de simulação aceitável. Os coeficientes de arrasto e de sustentação e a frequência de desprendimento de vórtices foram coletados. O histórico de tempo é mostrado na Figuras 11, e o espectro de frequência possui novamente um pico bem definido. Novamente, as componentes de força possuem amplitude e frequência bem definidas, sendo que $\overline{C_D}=1,5309$, $C_{L,rms}=0,2001$ e $St=0,1445$.

16

Figura 11 – Histórico de tempo de C_D e C_L para a seção quadrada.

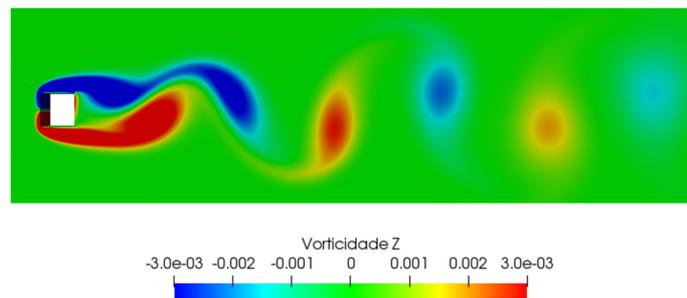


Fonte: Autores (2020).

Na Figura 12 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 12 – Vorticidade para a seção quadrada, tempo adimensional 168.

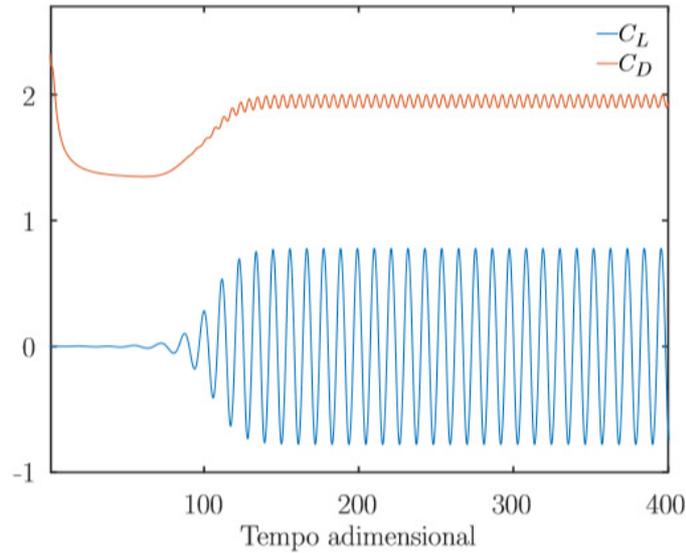


Fonte: Autores (2020).

Seção Diamante Fixa

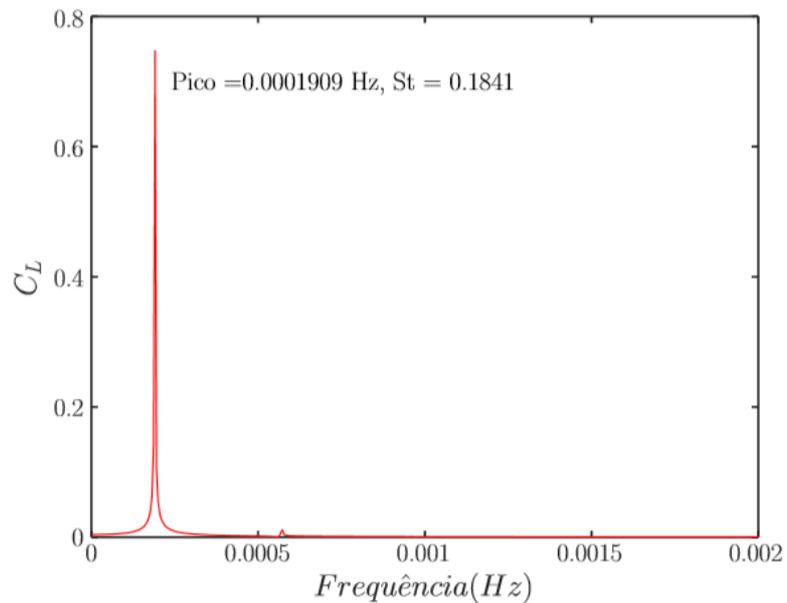
A seção quadrada com ângulo de aproximação do escoamento de 45° é chamada de seção diamante. Os históricos de tempo dos coeficientes de arrasto e sustentação e espectro de frequência da simulação com $Re = 100$ são ilustrados nas Figuras 13 e 14, respectivamente. Foram obtidos os valores $\overline{C_D}=1,9484$, $C_{L,rms}=0,5517$ e $St=0,1841$.

Figura 13 – Histórico de tempo de C_D e C_L para a seção diamante.



Fonte: Autores (2020).

Figura 14 – Espectro de frequência para a seção diamante.

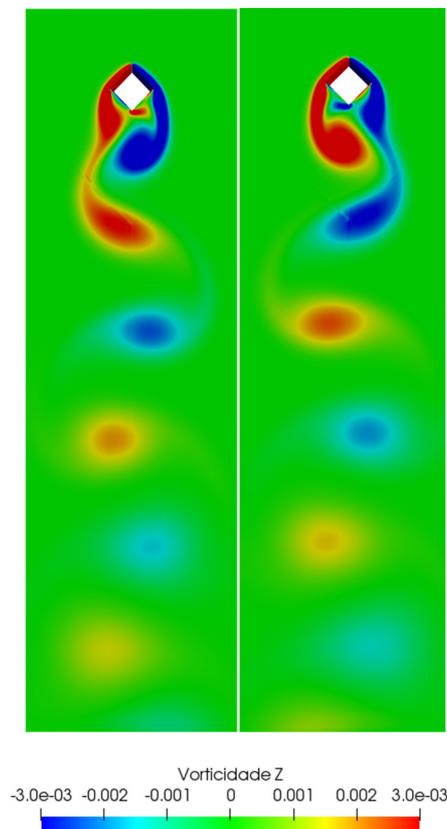


Fonte: Autores (2020).

Pode-se observar na Figura 14 o surgimento de um novo pico de frequência, de menor amplitude, com valor de $f_2 = 3 f_{\text{pico}} = 0,0005728$ Hz. A hipótese é de que essa frequência advém

dos vórtices liberados pela aresta de trás do diamante, Figura 15. Ao avaliar o espectro de frequência das componentes de velocidade em um ponto muito próximo ao da aresta a jusante, observou-se novamente a frequência mais baixa com maior amplitude e a frequência mais alta com menor amplitude, não sendo possível afirmar que essa segunda frequência esteja realmente relacionada aos vórtices de menor intensidade dessa aresta. Mas, ao observar a vorticidade da simulação realizada, não é possível identificar outra fonte de excitação para o surgimento dessa frequência maior. Pode-se cogitar o caso de essa frequência ser algum resultado de efeitos numéricos da simulação, porém, como a simulação com os mesmo parâmetros, apenas alterando-se a seção, pôde ser validada com dados experimentais, acredita-se que a justificativa numérica não seja segura e que, portanto, a alta frequência tenha mesmo fundamento nas escalas visíveis de vorticidade do problema.

Figura 15 – Vorticidade para a seção diamante, tempos adimensionais (a) 104 e (b) 108.



Fonte: Autores (2020).

A Tabela 3 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 ocorreu principalmente com os valores de Sen, Mittal e Biswas (2011). Para $\alpha = 45^\circ$, viu-se disparidades entre os valores, as quais podem ser decorrentes, entre outros fatores, da maneira como o comprimento característico do corpo é considerado.

Tabela 3 – Resultados para seção quadrada e diamante.

$\alpha [^\circ]$	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

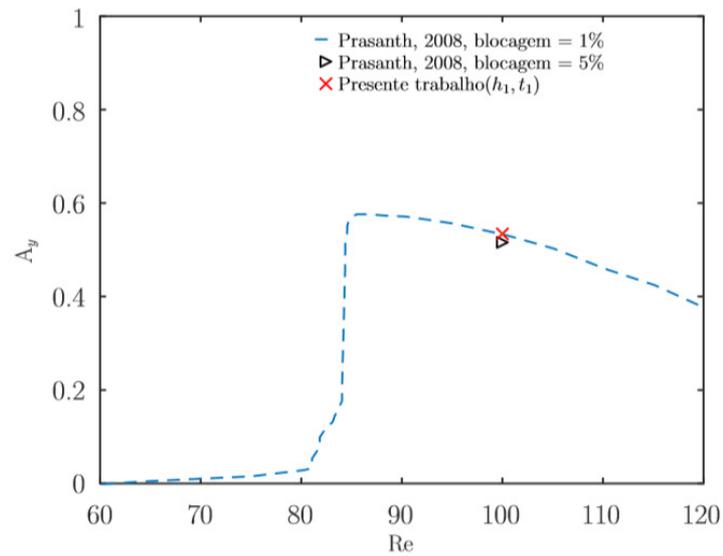
Fonte: Autores (2020).

Seção Circular com 2GDL

Como muitas são as variáveis aplicáveis ao estudo de simulação VIM, as simulações feitas nessa seção estão de acordo com as de Prasanth e Mittal (2008), possibilitando a validação dos resultados. Sendo assim, os parâmetros utilizados foram $m^* = 10$, $\zeta = 0$, $V_r = 6,024$ e $Re=100$. 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 16 e 17, respectivamente, sendo o X representativo do resultado obtido neste estudo e a linha pontilhada e o \triangleright 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 18 e 19, respectivamente, expostos da mesma maneira. A largura frontal do modelo sobre a largura do domínio computacional (transversal ao escoamento) é chamada de blocagem (B), no presente

trabalho $B = 0,05$ ou 5% e os dados de Prasanth e Mittal (2008) são relativos à blocagem de 1 e 5% .

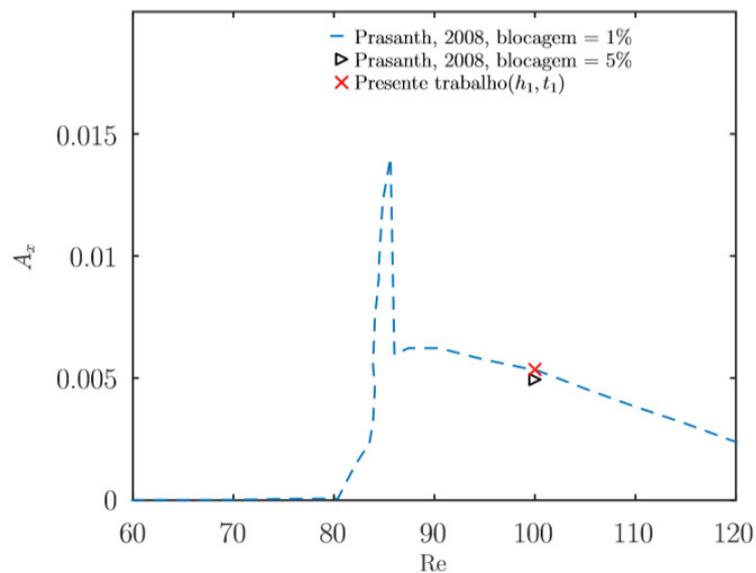
Figura 16 – Amplitude significativa transversal ao escoamento.



21

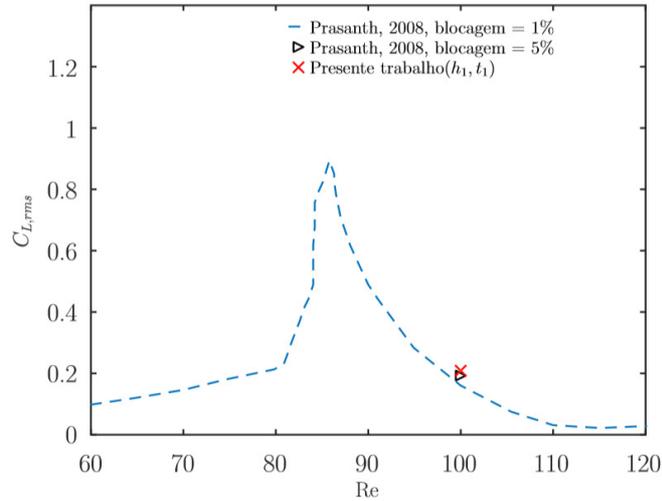
Fonte: Adaptado de Prasanth e Mittal (2008).

Figura 17 – Amplitude significativa na direção do escoamento.



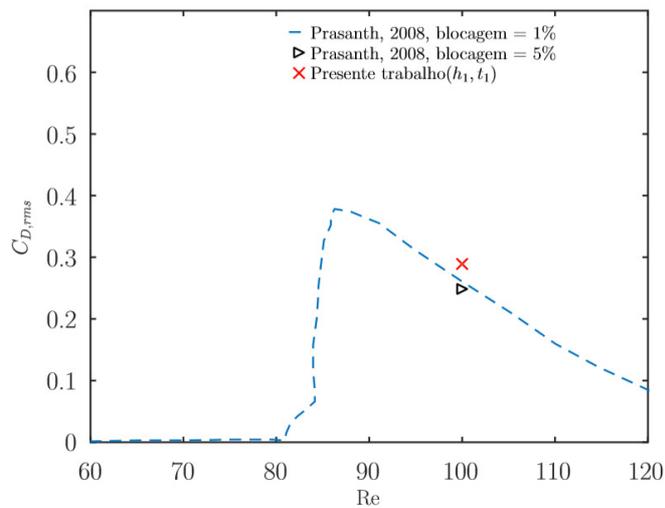
Fonte: Adaptado de Prasanth e Mittal (2008).

Figura 18 – Coeficiente de sustentação rms.



Fonte: Adaptado de Prasanth e Mittal (2008).

Figura 19 – 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.

Verificação e Validação para a Seção Circular com 2GDL

Prosseguindo com o processo de verificação, para a seção circular com 2GDI e $m^* = 10$, $\zeta = 0$, $V_r = 6,024$ e $Re = 100$, 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:

23

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

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

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

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

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

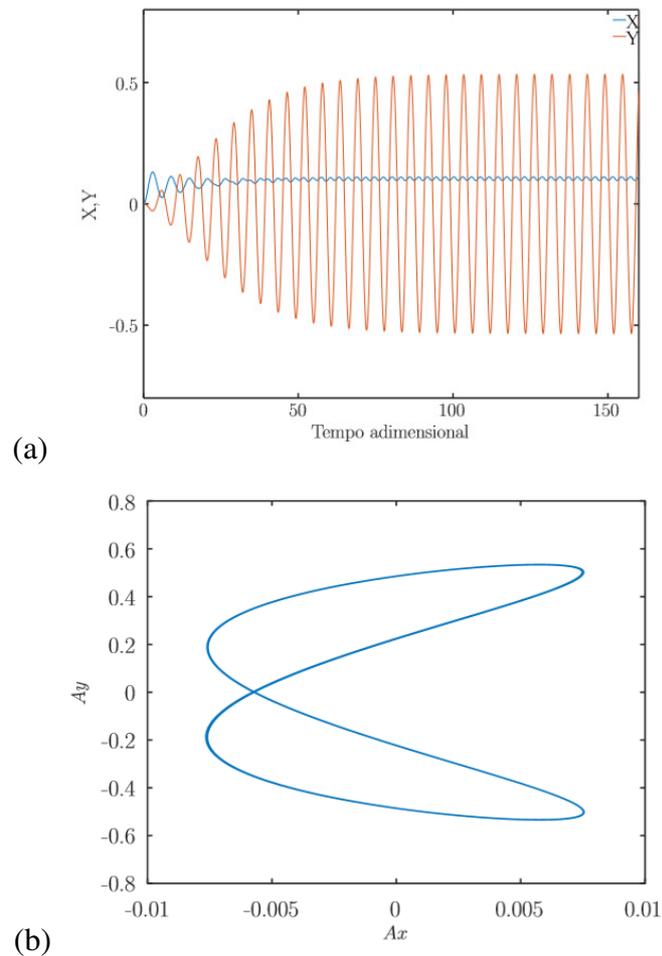
$$E(A_x) = 0,00030179$$

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

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

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 20 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 20 – (a) Histórico de tempo de deslocamento da coluna de seção circular e (b) seu movimento acoplado.

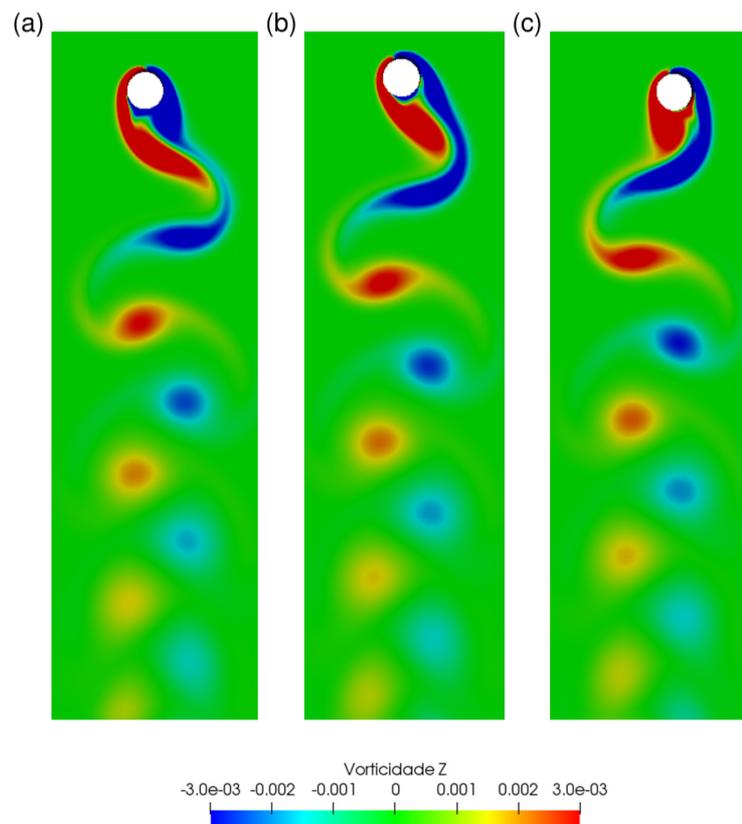


Fonte: Autores (2020).

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 2GDL 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. Os valores das frequências são baixos em razão do baixo valor de Re utilizado. Finalmente, é apresentada a vorticidade, Figura 21, 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 6.

Figura 21 – Vorticidade para o caso circular com 2GDL em três instantes subsequentes.

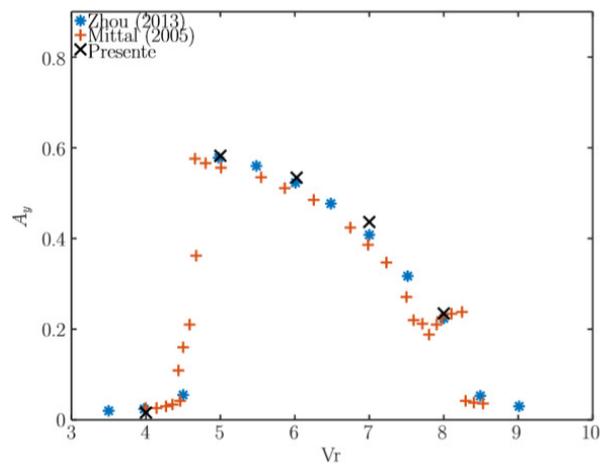


Fonte: Autores (2020).

Variação da Velocidade Reduzida para a Seção Circular com 2GDL

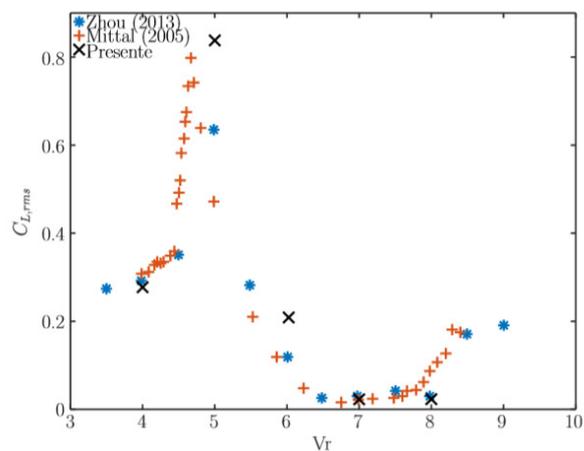
Foram realizadas também as simulações com 2GDL variando-se a velocidade reduzida, V_r , e mantendo-se os demais parâmetros $m^* = 10$, $\zeta = 0$ e $Re = 100$. Os estudos foram feitos para o caso circular em $Re = 100$ e os resultados foram comparados com os obtidos por Singh e Mittal (2005) e Zhao, Cheng e Zhou (2013). As Figuras 22 e 23 comparam os resultados numéricos obtidos para A_y e $C_{L,rms}$, 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 22 – A_y para diferentes V_r .



Fonte: Autores (2020).

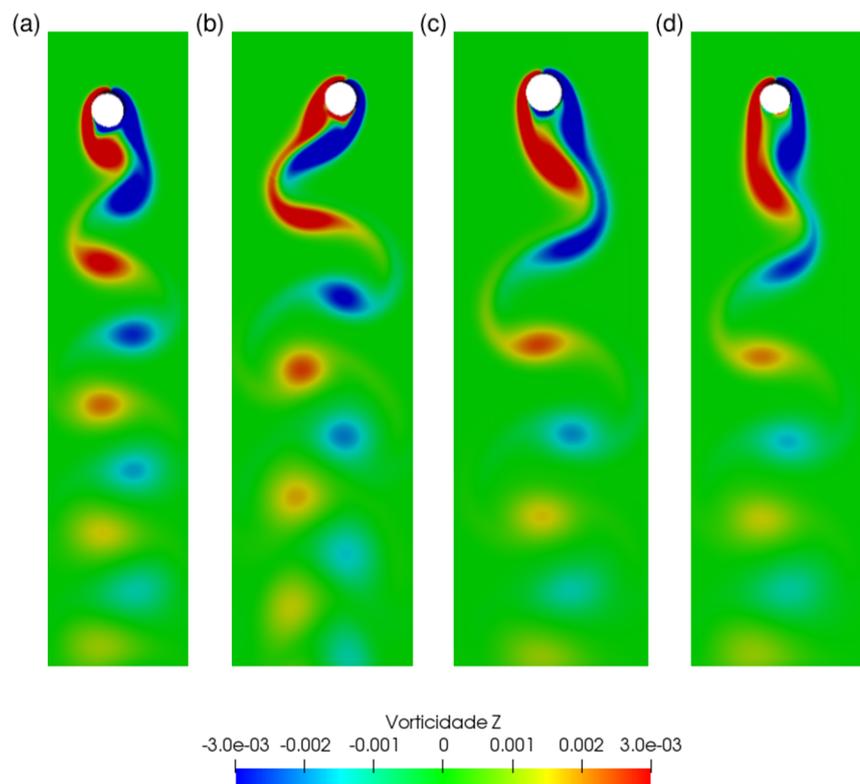
Figura 23 – $C_{L,rms}$ para diferentes V_r .



Fonte: Autores (2020).

As maiores amplitudes de movimento transversal ao escoamento ocorreram para a velocidade reduzida $V_r = 5$, 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 conduz à maior amplitude de vibração transversal. Analisando a vorticidade para cada velocidade reduzida, Figura 24, 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 24 – Vorticidade para as velocidades reduzidas (a) 5, (b) 6 (c) 7 e (d) 8, tempo adimensional 160.

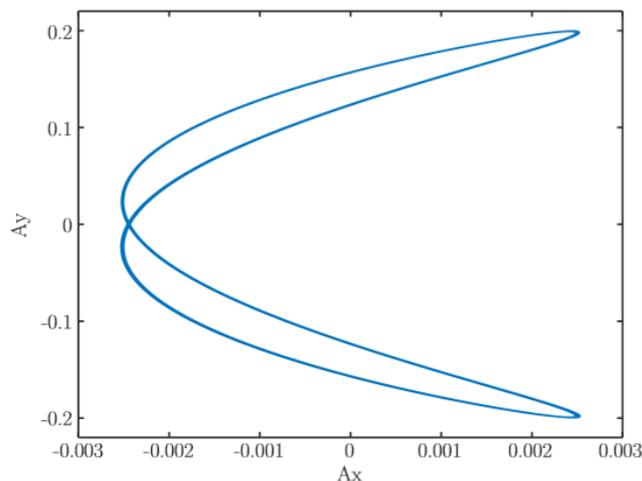


Fonte: Autores (2020).

Seção Quadrada com 2GDL

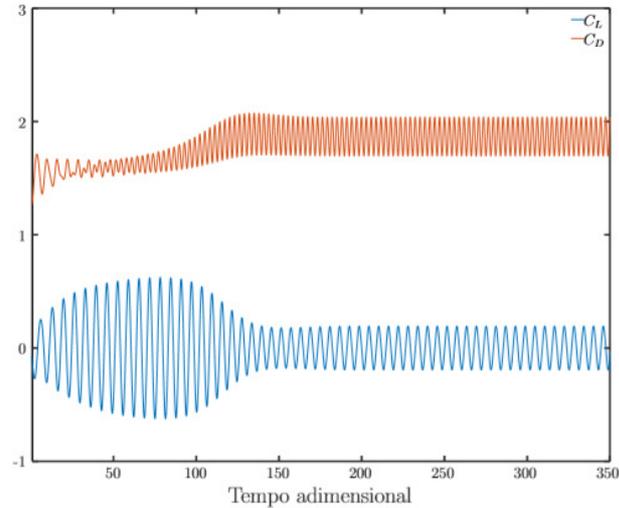
Para a análise do movimento da coluna de seção quadrada com razão de massa $m^* = 10$, não foram encontrados resultados numéricos ou experimentais na literatura. Todavia, as simulações seguem os mesmos parâmetros da seção circular, para que os resultados possam ser comparados entre si, portanto, $m^* = 10$, $\zeta = 0$, $V_r = 6,024$ 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 25. 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 26.

Figura 25 – Movimento acoplado da coluna com seção quadrada.



Fonte: Autores (2020).

Figura 26 – Histórico de tempo para CD e CL para $\alpha = 0^\circ$.

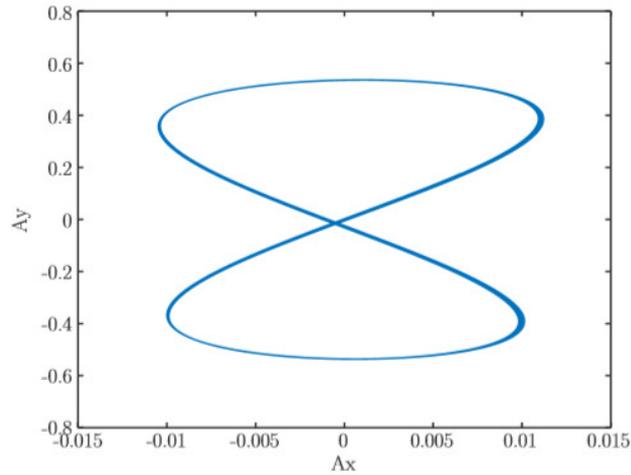


Fonte: Autores (2020).

Seção Diamante com 2GDL

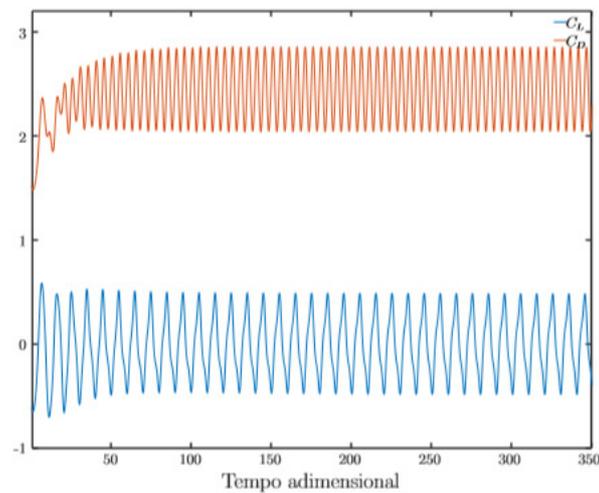
Para a seção diamante (45°), identificou-se $A_y = 0,536$ e $A_x = 0,007$, sendo que novamente surge o formato de oito no movimento acoplado, Figura 27. A amplitude de oscilação em x é muito menor que a amplitude em y e $f_x = 2f_y$, sendo $f_y = 2,00e^{-04}$ Hz. A razão de frequências é $f_y/f_n = 1,05$, 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 28. 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 27 – Movimento acoplado, $\alpha = 45^\circ$.



Fonte: Autores (2020).

Figura 28 – Histórico de tempo para C_D e C_L para $\alpha = 45^\circ$.



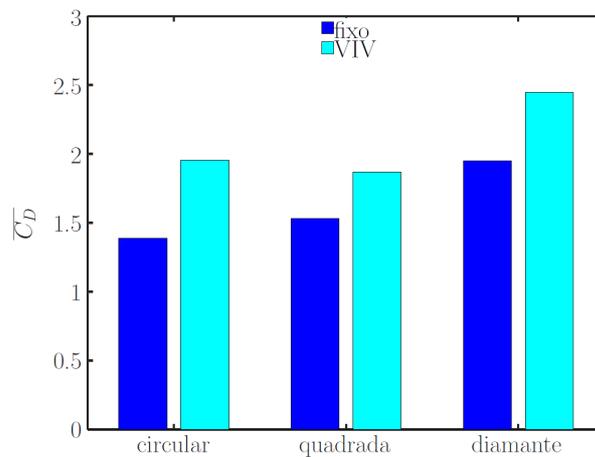
Fonte: Autores (2020).

Comparação entre Seções Fixas e entre Seções com 2GDL

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 29. 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.

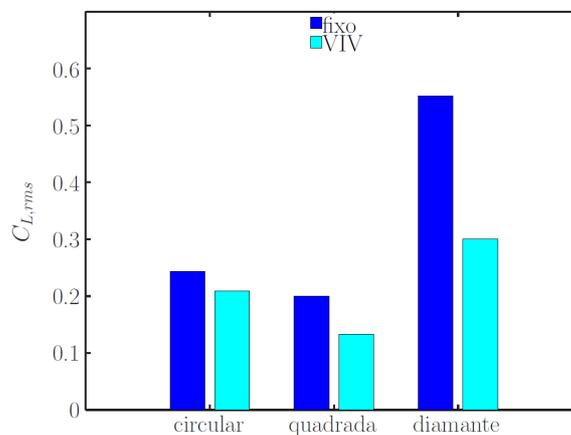
Figura 29 – Valores de $\overline{C_D}$ para as colunas isoladas.



Fonte: Autores (2020).

Para o valor rms do coeficiente de sustentação, o comportamento é contrário, Figura 30, indicando a diminuição da amplitude da força de sustentação quando o corpo possui dois graus de liberdade.

Figura 30 – Valores de $C_{L,rms}$ para as colunas isoladas.



Fonte: Autores (2020).

Dos casos apresentados, a coluna com 2GDL 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.

Conclusões

O presente trabalho apresentou a análise numérica do escoamento laminar bidimensional com $Re=100$ ao redor de seções típicas de colunas de plataformas offshore. As colunas consideradas possuem suas seções nos formatos circular, quadrada e diamante. As simulações foram feitas para uma seção fixa e também com dois graus de liberdade. Foram avaliadas diferentes velocidades reduzidas ($V_r = 4, 5, 6, 7$ e 8) para o caso de uma coluna circular. 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 uma seção circular fixa 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 despreendimento de vórtices também na aresta de trás da seção, os quais podem estar relacionados a uma frequência 3 vezes maior que a frequência de liberação de vórtices das arestas laterais, a qual surge no espectro de frequência. Dentre essas geometrias, 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 movimentos induzidos 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 VIM 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 diminuiu, indicando a diminuição da amplitude da força de sustentação quando o corpo possui grau de liberdade.

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 formatos e configurações das colunas de plataformas, a fim de identificar as características de escoamento que minimizam o VIM. Ademais, o trabalho abre campo para explorações na área offshore, mostrando as seções que levam aos menores deslocamentos das plataformas. Isso possibilita o descarte de casos menos adequados no momento de aplicar simulações mais avançadas, com número de Reynolds elevado e domínio tridimensional.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa PIBIC (UFSC-CNPq) concedida durante o período de 2018 a 2019 e a bolsa de produtividade em pesquisa (Nº 304600/2016-4).

Referências

- BLEVINS, R. D. **Flow-induced vibration**. New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1977. 377 p., 1977.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

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.

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.

ROSETTI, G. F. **Improvements in the numerical modeling of turbulence and fluid-structure interaction for the vortex-induced vibration of a rigid cylinder.** 251 p. Doutorado — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

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, 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.

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, 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.