ANÁLISE POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO AO REDOR DE UM CILINDRO MOVENDO-SE EM TRAJETÓRIAS TRANSVERSAL E EM OITO

LEANDRO CONCEIÇÃO PINTO[1], LUCAS BOEIRA[2], JORGE HUGO SILVESTRINI[3], EDITH BEATRIZ CAMAÑO SCHETTINI[4]

RESUMO

Neste trabalho foi estudado o escoamento bidimensional de um fluido incompressível ao redor de um cilindro em movimento forçado. Foram analisados os fenômenos que ocorrem nos escoamentos em torno de estruturas cilíndricas submetidas a uma oscilação periódica utilizando a técnica de Simulação Numérica Direta. As equações que descrevem o escoamento são as equações de Navier-Stokes e a equação da continuidade, que são discretizadas em uma malha cartesiana. O Método de Runge-Kutta de terceira ordem, com armazenamento reduzido, foi usado para a discretização temporal, e um esquema de diferenças finitas de sexta ordem, na discretização espacial das equações. O cilindro é representado através do Método de Fronteiras Virtuais. Foram simuladas, para um número de Reynolds igual a 400, as trajetórias, transversal e em oito, variando as amplitudes, horizontal e vertical de movimento. O cálculo das médias temporais dos coeficientes de arrasto e sustentação bem como o estudo do padrão da esteira de vórtices permitiu a análise das variações no escoamento em função das amplitudes horizontal e vertical de deslocamento. Nas trajetórias transversais observou-se o padrão 2S, com exceção da amplitude de 0,55D, que apresentou padrão 2P. As simulações em oito apresentaram o padrão 2P na maioria dos casos e para algumas amplitudes não foi observado padrão periódico de desprendimento de vórtices.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação Numérica Direta, Desprendimento de vórtices, Movimento forçado, Esteira, cilindro.

[1]Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – UFRGS – leandroc_p@yahoo.com.br
[2]Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental – UFRGS – lucas.boeira@gmail.com
[3]Professor da Faculdade de Engenharia - PUCRS – jorgehs@pucrs.br
[4]Professora do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS - bcamano@iph.ufrgs.br

NUMERICAL SIMULATION FLOW ANALYSES AROUND A CYLINDER UNDER TRANSVERSAL AND EIGTH TRAJECTORIES

ABSTRACT

This work aims to study a two-dimensional incompressible flow around a cylinder in forced movement in order to understand the phenomena that occur in cylindrical structures under periodic oscillation using the Direct Numerical Simulation technique. The simulations were taken using the computational code named Incompact3d. It was used the Reynolds Number as 400 in all simulations. The trajectories transversal and eight shapes were simulated for a range of displacement amplitude. The Navier-Stokes and continuity equations were used to discretize the flow in a Cartesian mesh. It was used the third-order Runge-Kutta scheme with low-storage for the pass-time and the body was represented by the virtual boundary method. The temporal mean of the drag and lift coefficients and vortex shedding mode were computed. The results show large variations of the mean lift coefficient with the amplitude displacement for all trajectories, and so altering the vortex shedding mode. The 2S mode was observed for simulations with transversal trajectories, except for amplitude of 0.55D, which presented the 2P mode. Simulations with eight trajectory presented 2P mode in most cases, and for certain amplitudes the periodic shedding modes were not observed.

KEY WORDS: Direct Numerical Simulation, Vortex Shedding, Forced Movement, Trajectories, Wake, Cilinder.

1 - INTRODUÇÃO

O escoamento ao redor de corpos rombudos é um tema constantemente abordado em diversas áreas de conhecimento. Principalmente na Engenharia, este tema vem encontrando vasta aplicação. Exemplos podem ser citados, tais como o escoamento ao redor de veículos (aeronaves, automóveis e embarcações), construções submetidas à ação do vento (linhas de transmissão de energia, cabos de pontes estaiadas, torres e edifícios esbeltos), e a ação de correntes fluviais e marítimas sobre estruturas de pontes, risers, cabos de ancoragem e plataformas de captação de petróleo. Em tais estruturas, a vibração induzida por vórtices pode ocorrer com freqüência podendo provocar oscilações, causando danos e até acidentes.

Este trabalho tem por objetivo estudar o escoamento bidimensional ao redor de um cilindro em movimento forçado, com trajetórias transversal e em oito, bem como analisar as forças hidrodinâmicas e os padrões de esteira de vórtices que se formam atrás do cilindro. Para isto foi utilizada a técnica de Simulação Numérica Direta (*Direct Numerical Simulation* – DNS) que, em decorrência da evolução das ferramentas de cálculo, dos métodos numéricos e de computadores com alto poder de processamento, tem permitido resolver numericamente as equações que descrevem um escoamento de forma eficiente.

2 – METODOLOGIA NUMÉRICA

2.1 Configuração do escoamento

Para realizar as simulações foi usado o código fonte Incompact3d (LAMBALLAIS; SILVESTRINI, 1999), capaz de simular escoamentos turbulentos tridimensionais ao redor de obstáculos. O cilindro é forçado a percorrer dois tipos de trajetórias: uma transversal e a outra em forma do número “oito”, nas quais as amplitudes de movimento do cilindro são A_x (no sentido do escoamento principal) e A_y (transversal ao escoamento principal), mostradas na Figura 1. Ambas amplitudes são quantificadas em diâmetros de cilindro, ”D”.

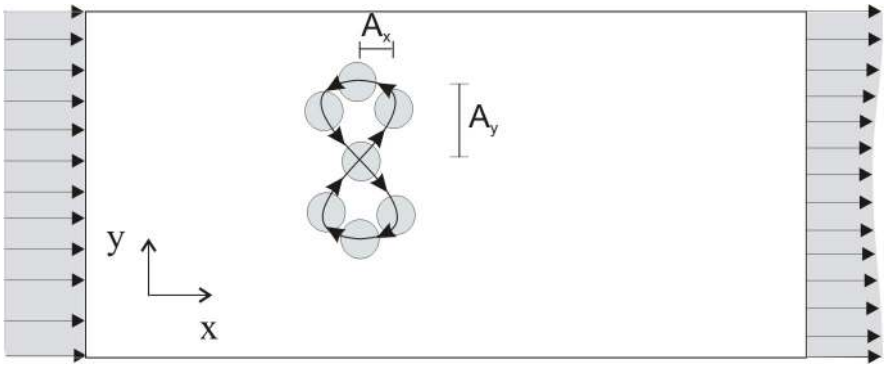


FIGURA 1: Trajetórias do movimento forçado do cilindro.

O escoamento é descrito pelas equações adimensionalizadas de Navier-Stokes e da conservação de massa, que são discretizadas em uma malha cartesiana retangular bidimensional.

As condições de contorno são de perfil uniforme e unitário de velocidade na entrada $(u = 1, v = 0)$, condição de deslizamento livre nas fronteiras laterais $(\partial u/\partial y = 0, v = 0)$, e perfil de velocidades de saída dado por uma equação de convecção $(\partial \vec{u}/\partial t + U_{conv}\, \partial \vec{u}/\partial x = 0)$.

2.2 Equações do Escoamento

Neste trabalho foi utilizada a equação da continuidade dada por

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0, \tag{1}$$

e a formulação adimensionalizada da equação de Navier-Stokes, com termo convectivo escrito na forma rotacional, sendo esta expressa por

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{\omega} \times \vec{u} = -\vec{\nabla} \prod + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{u} + \vec{F}, \tag{2}$$

em que $\vec{u}$ é o campo de velocidades, $\vec{\omega}$ o campo de vorticidade, $\prod$ o campo de pressão modificada, Re o número de Reynolds e $\vec{F}$ o campo de forças externas representando o cilindro.

A posição do cilindro em função do tempo, para as duas trajetórias, é descrita pelas equações:

$$X_c = X_o + A_x \text{sen}(2f\pi t) \tag{3}$$

$$Y_c = Y_o + A_y \text{sen}(2f\pi t), \tag{4}$$

onde:

X_c , Y_c : coordenadas do centro do cilindro;

X_o , Y_o : coordenadas do ponto onde inicia o movimento forçado;

A_x : amplitude horizontal de deslocamento;

A_y : amplitude vertical de deslocamento;

f : frequência de oscilação do movimento forçado;

t : tempo.

A derivada temporal das equações (3) e (4) fornece as duas componentes do vetor velocidade de deslocamento do cilindro, $\vec{V}_c = (u_c, v_c)$.

2.3 – Esquema Numérico

As equações são resolvidas pelo código utilizando o método de Runge-Kutta de terceira ordem, com armazenamento reduzido, para a discretização temporal, proposto por Williamson (1980), e um esquema de diferenças finitas de sexta ordem para a discretização espacial, proposto por Lele (1992).

2.4 – Método de Fronteira Virtual

O termo de força de campo $\vec{F}$ é distribuído sobre os nós da fronteira e seus pontos de malha vizinhos por uma função Gaussiana, cuja média é centrada sobre o traçado da fronteira. Este campo assume valores iguais e de sentido oposto às forças que o fluido exerce nas proximidades da superfície do cilindro.

Introduzindo a condição de deslocamento do cilindro com o vetor velocidade de deslocamento $\vec{V}_c$, a formulação do campo de forças $\vec{F}$ da fronteira imersa pode ser definida por:

$$\vec{F}(\vec{x}_s, t) = \left[\alpha \int_0^t \left[\vec{u}(\vec{x}_s, t) - \vec{V}_c \right] dt + \beta \left[\vec{u}(\vec{x}_s, t) - \vec{V}_c \right] \right] g_s(\vec{x}, t), \tag{5}$$

onde α e β são constantes de sinal negativo, com dimensões $M/(L^3T^2)$ e $M/(L^3T)$ respectivamente, e $g_s(\vec{x},t)$ é a função gaussiana que distribui o campo de força $\vec{F}$ nos nós da fronteira e seus vizinhos (Figura 2).

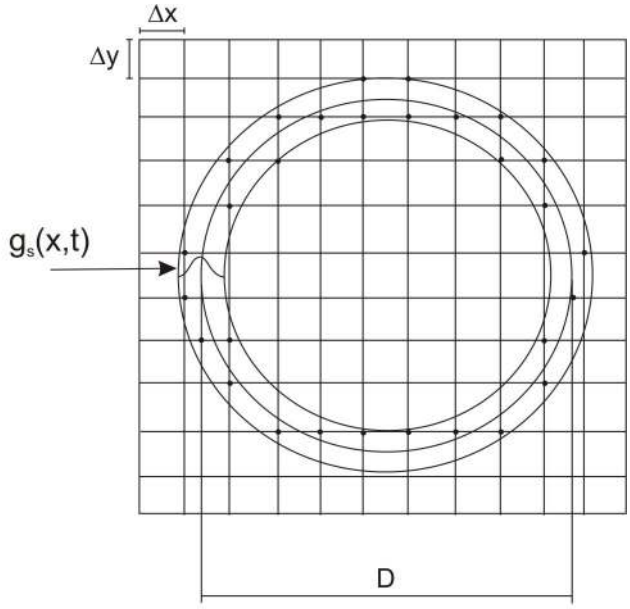


FIGURA 2 : Zona de influência da fronteira virtual.

A partir dos campos de velocidade, pressão e vorticidade do escoamento, são calculadas as forças de arrasto e de sustentação, utilizando a equação integral da quantidade de movimento, aplicada a um volume de controle, que inclui completamente a trajetória do cilindro. Os coeficientes de força são obtidos com a adimensionalização das forças de arrasto e sustentação, e tém por expressão:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U^2 A_v}, \tag{6}$$

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho U^2 A_h}, \tag{7}$$

onde:

C_D : coeficiente de arrasto;

C_L : coeficiente de sustentação;

F_D : força de arrasto;

F_L : força de sustentação;

ρ : massa específica do fluido;

A_v , A_h : projeções horizontal e vertical da área do cilindro.

U: velocidade de referência adimensionalizada na entrada do domínio;

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as simulações foram realizadas para uma frequência de oscilação f igual a 0,2 e número de Reynolds igual a 400. Do total de 39 simulações, 15 foram para trajetória transversal, na qual a amplitude vertical A_y variou de 0 a 0,7D, com uma simulação a cada 0,05D. Esta faixa de amplitudes foi escolhida com o intuito de estudar a zona de transição entre os modos 2S e 2P, identificados por Williamson e Roshko (1988). As 24 simulações restantes foram realizadas com a trajetória em oito, sendo que neste caso simulou-se para as amplitudes verticais A_y = 0,5D e 1,0D, na faixa de amplitude horizontal de A_x = 0,05D a 0,6D, com uma simulação a cada 0,05D. Nas trajetórias em oito, a parte superior da trajetória é sempre percorrida no sentido anti-horário. Em todas as simulações, o domínio de cálculo é de 24D x 24D, discretizado com 1201 x 1201 pontos. Os Trabalhos de Pinto et al. (2007) e Pinto (2008) serviram de base para os parâmetros usados no domínio. Os valores das constantes usadas na fronteira virtual, α e β, foram adotados de acordo com resultados de Vitola (2006), valendo, respectivamente, -10000 e -100.

3.1 Validação do código de cálculo

O código de cálculo Incompact3d foi amplamente testado para simulações em torno de cilindros fixos (por exemplo: Vitola et al. (2004), Vitola et al. (2005) e Lamballais e Silvestrini (2002)). Para o cilindro com oscilação transversal forçada, foram comparados os campos de vorticidade obtidos por Williamson e Govardhan (2004), Ponta e Aref (2006) e Huang et al. (2001) com os resultados de Pinto et al. (2007), que realizou simulações usando o código Incompact3d, representados na Figura 3 pelo ponto P1 (Re = 140; A_y = 1; λ/D = 7,5, sendo λ/D o comprimento de onda adimensional).

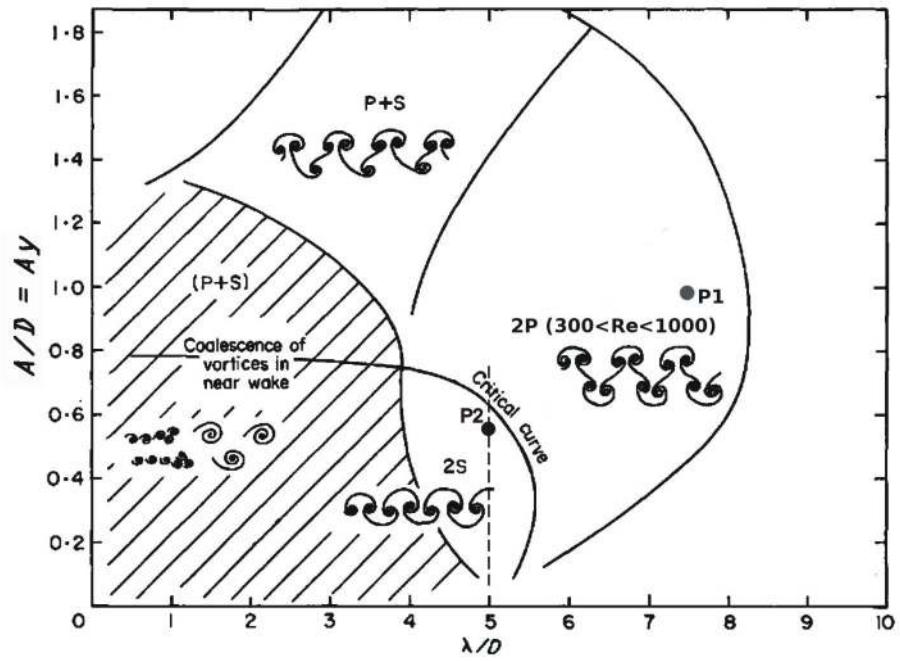


FIGURA 3: Modos de sincronização para um cilindro oscilando transversalmente para a faixa $300 \leq Re \leq 1000$ (adaptado de Williamson e Roshko (1988)).

Os parâmetros das simulações destes autores variaram nas seguintes faixas: $140 \leq Re \leq 200$; $6{,}07 \leq \lambda / D \leq 7{,}5$ e $0{,}33 \leq A_y \leq 1$. A Figura 4 mostra uma comparação dos campos de vorticidade, onde se observa claramente a formação de uma esteira do tipo P+S (um par e um vórtice simples a cada ciclo de oscilação).

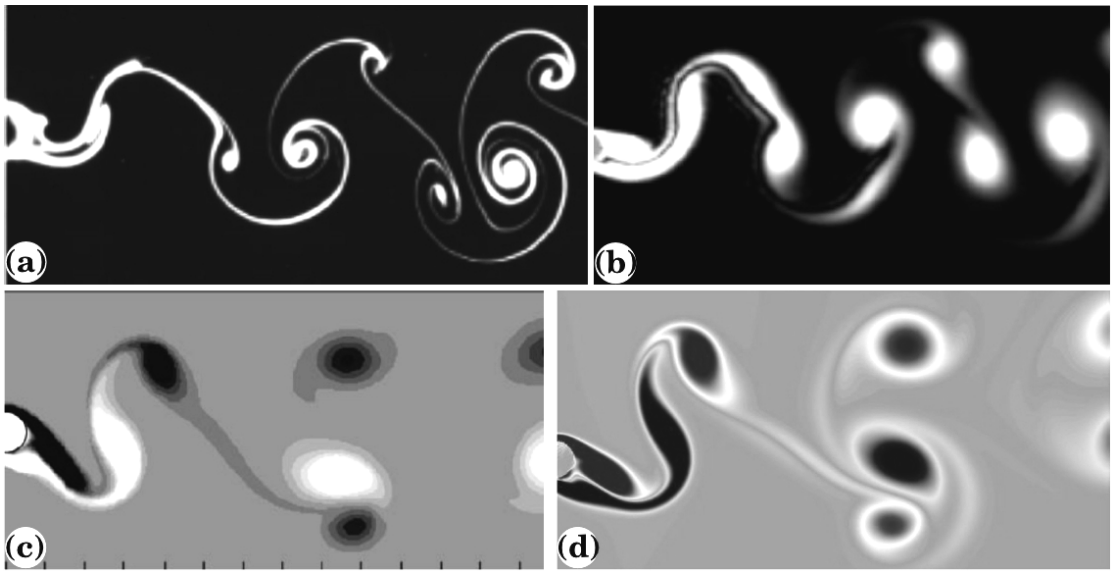


FIGURA 4: Comparação dos campos de vorticidade produzidos por: (a) trabalho experimental de Williamson e Govardhan (2004); (b) trabalho numérico de Ponta e Aref (2006); (c) trabalho numérico de Huang et al. 2001; (d) simulação numérica correspondente aos parâmetros do ponto P1, de Pinto et al. (2007).

A Figura 5 mostra a comparação entre os coeficientes obtidos em Pinto (2008), em que foi usado o código Incompact3D, e os obtidos por Guilmineau e Queutey (2002), onde os autores realizaram simulações numéricas para um cilindro oscilando na direção transversal ao escoamento, usando um método numérico de elementos finitos com segunda ordem de precisão. O coeficiente médio de arrasto, $<C_D>$, e a raiz quadrática média do coeficiente de sustentação, C_{Lrms}, variam em função da razão de freqüências f/f_s, em que $f = U/\lambda$ e f_s é a frequência adimensional de desprendimento de vórtices igual a 0,2, obtida por Benevenutti e Silvestrini (2006), para cilindro fixo, com o mesmo Re. Em relação às simulações realizadas neste trabalho, λ/D pode ser considerado como o inverso de f, uma vez que $U = 1$.

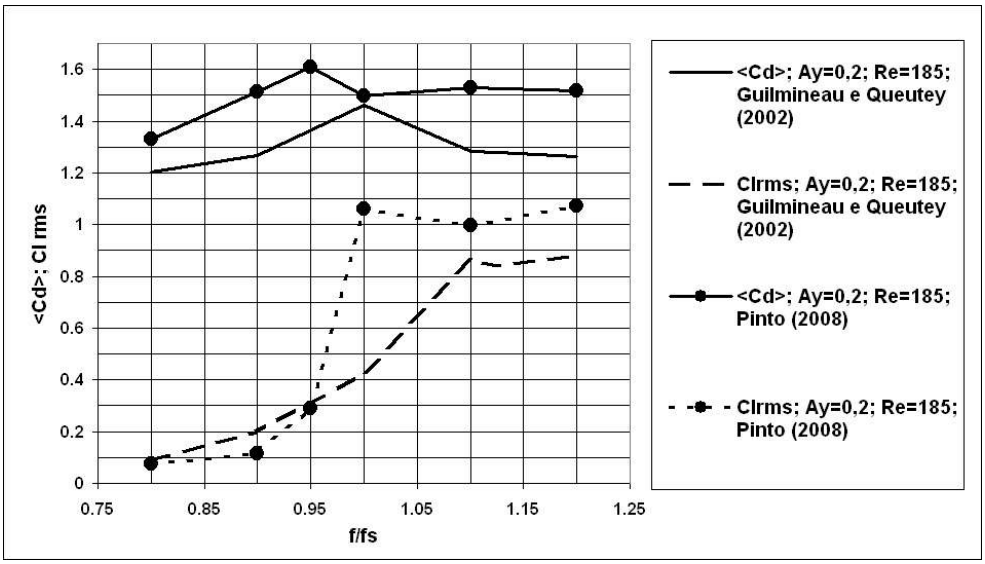


FIGURA 5: Comparação dos coeficientes hidrodinâmicos entre as simulações feitas com o código Incompact3d por Pinto (2008) e as simulações de Guilmineau e Queutey (2002).

Observa-se que, mesmo apresentando uma defasagem entre os resultados de diferentes autores, as simulações apresentaram as mesmas tendências e variações semelhantes nos valores de $< C_D >$ e C_{Lrms}, este último sofrendo aumento acentuado a partir de $f/f_s = 0{,}9$ e depois se estabilizando para $f/f_s \geq 0{,}9$. Esta variação nos coeficientes ocorre devido à entrada na região de lock-in primário (MENEGHINI E BEARMAN, 1995).

3.2 Trajetória Transversal

Nas simulações com trajetória transversal, a análise do coeficiente de sustentação médio $<C_L>$ do escoamento apontou uma descontinuidade na variação

deste, entre as amplitudes de deslocamento $A_y = 0{,}5D$, e $A_y = 0{,}6D$ (Figura 6). Verificou-se que esta variação ocorre devido à mudança na esteira de vórtices, que na amplitude $A_y = 0{,}55D$ apresenta uma configuração 2P (dois pares de vórtices por ciclo, Figura 7b), enquanto que no restante dos casos apresenta configuração 2S (dois vórtices simples por ciclo, Figura 7a e 7c).

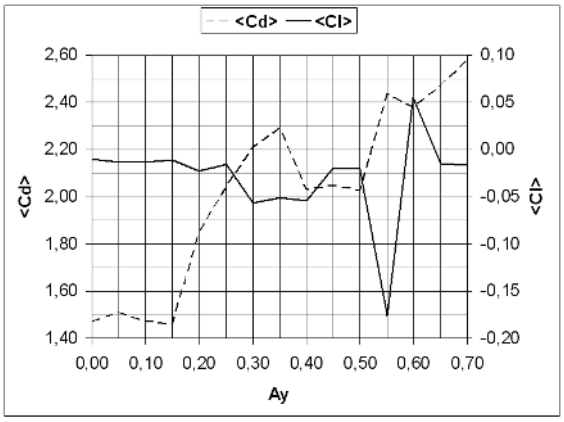
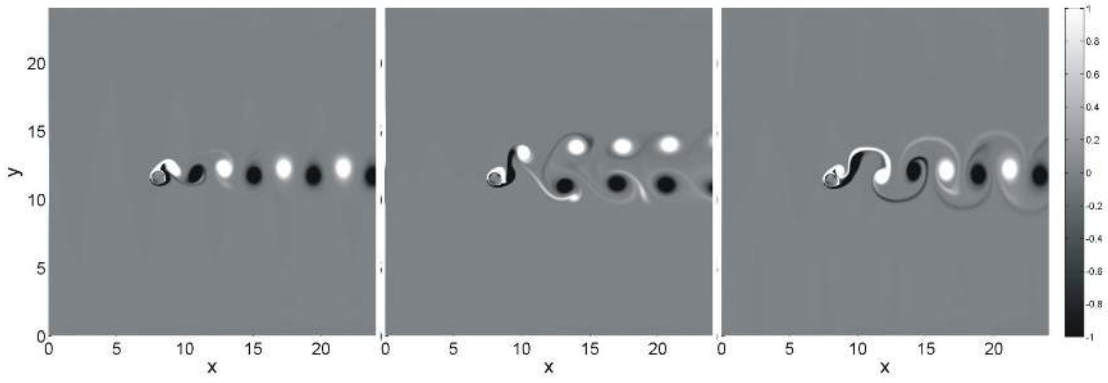


FIGURA 6: Coeficientes médios de sustentação (<C_L>) e de arrasto (<C_D>) para trajetória transversal.

Na Figura 7, são mostrados campos de vorticidade para trajetória transversal. Para a simulação com $A_y = 0{,}45D$ (Figura 7a), o padrão 2S foi identificado (dois vórtices simples por ciclo), e passando para $A_y = 0{,}55D$ (Figura 7b), o padrão muda, se tornando do tipo 2P (dois pares de vórtices por ciclo). Em $A_y = 0{,}65D$ (Figura 7c), novamente o padrão volta a ser 2S, porém com a presença de camadas cisalhantes bem definidas, entre os vórtices primários da esteira.



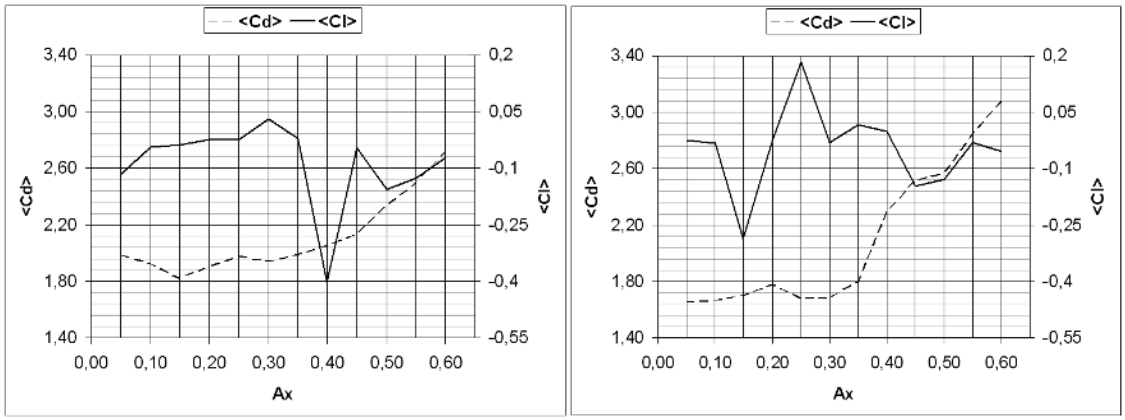
(a) A_y=0,45D (b) A_y=0,55D (c) A_y=0,65D

FIGURA 7: Campos de vorticidade mostrando a transição entre diferentes padrões de esteira, para trajetória transversal.

Estes resultados estão de acordo com o mapa experimental proposto por Williamson e Roshko (1988) (Figura 3). Em tal mapa as simulações se localizam na abscissa $1/f = \lambda/D = 5$ (linha tracejada). A região onde ocorre a transição do padrão 2S para o 2P é próxima a amplitude $A_y = 0{,}55D$, onde ocorreu o padrão 2P nas simulações transversais (ponto P2). Nota-se que os resultados das simulações identificam claramente a região de fronteira entre os dois padrões de desprendimento, como mostrado pelos experimentos de Williamson e Roshko, (1988).

3.3 Trajetória em oito

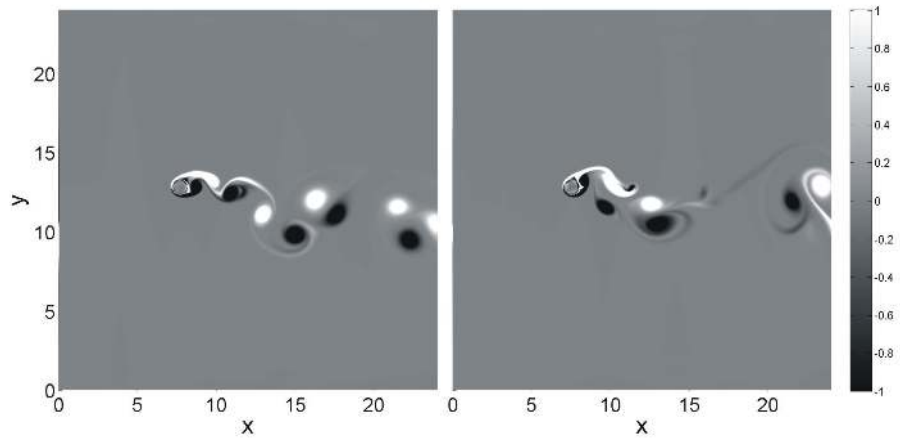
Para as simulações de trajetória em oito, com amplitude transversal $A_y = 1D$, verificou-se que há um decréscimo acentuado no coeficiente médio de sustentação, para a amplitude $A_x = 0{,}4D$ (Figura 8a).



(a) A_y=1D (b) A_y=0,5D

FIGURA 8: Coeficientes médios de sustentação (<C_L>) e de arrasto (<C_D>) para trajetória em oito.

Campos de vorticidade das simulações em oito com $A_y = 1D$ são mostrados na Figura 9. O padrão 2P foi observado nas simulações com A_x igual ou inferior a 0,4D (Figura 9a). Já para amplitudes horizontais maiores que 0,4D, não foi possível observar um padrão definido (Figura 9b).



(a) A_x=0.35D (b) A_x=0,5

FIGURA 9: Campos de vorticidade mostrando a transição entre padrões diferentes de esteira, para simulações em oito com A_y = 1D.

Da mesma forma que nas simulações com A_y = 1D, para as simulações em oito com A_y = 0,5D houveram variações acentuadas de $< C_L >$, para as amplitudes de A_x = 0,15D a 0,25D (Figura 8b). Apesar da grande variação nos coeficientes, a esteira de vórtices permaneceu no mesmo padrão 2P (Figura 10), para todas as amplitudes horizontais.

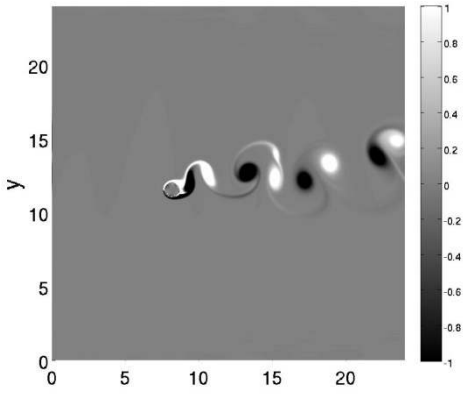


FIGURA 10: Campo de vorticidade mostrando o padrão para simulações em oito com A_y = 0,5D, A_x = 0,15D.

4 - CONCLUSÕES

A análise dos resultados deste estudo mostra que, para o caso de trajetória transversal, a esteira apresenta dois tipos de configurações: 2S e 2P, em função da amplitude de oscilação. Os coeficientes hidrodinâmicos apresentaram variações coerentes com resultados dos padrões apresentados nos campos de vorticidade.

Para a trajetória em oito, com $A_y = 1D$, a esteira apresenta diferentes configurações que dependem da amplitude A_x. Até $A_x = 0{,}4D$, as configurações são do tipo 2P. Para valores maiores de A_x não é possível identificar um padrão periódico definido. Nas simulações com $A_y = 0{,}5D$, o mesmo padrão de esteira foi observado para todas as amplitudes correspondendo a um 2P. Nas trajetórias em oito todas as simulações apresentaram padrão de vórtices assimétrico. Também se verificou que o coeficiente de arrasto médio $< C_D >$ tende a aumentar com a amplitude A_x, enquanto que a maioria dos coeficientes de sustentação médios apresentou valores em torno de zero. Observa-se, porém, que o coeficiente $<C_D>$ não apresentou variações que permitam identificar a mudança de padrão entre $A_x \leq 0{,}4D$ (padrão 2P) e $A_x > 0{,}4D$ (padrão não definido), como mostrado nos campos de vorticidade para $A_y = 1D$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

E. LAMBALLAIS and J. H. SILVESTRINI, “Documentacão do código Incompact3d”. Poitiers França, 1999.

J. H. WILLIAMSON, “Low-storage Runge-Kutta schemes,” J. Comp. Phys., vol. 35, pp. 48–56, 1980.

S. LELE, “Compact finite difference schemes with spectral-like resolution.” J. Comp. Phys., vol. 103, pp. 16–42, 1992.

D. GOLDSTEIN, R. HANDLER, and L. SIROVICH, “Modeling a no-slip flow boundary with an external force field.” J. Comp. Phys., vol. 105, pp. 354–366, 1993.

C. H. K. WILLIAMSON and A. ROSHKO, “Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder.” J. Fluids and Structures., vol. 2, pp. 355–381,
1988.

L. C. PINTO, “Análise por simulação numérica do desprendimento de vórtices de um cilindro circular em movimento forçado.” Master’s thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2008.

L. C. PINTO, D. C. BUARQUE, E. B. C. SHETTINI, and J. H. SILVESTRINI, “Numerical simulation of vortex wake from a cylinder in an elliptical trajectory.” in Fifth Conference on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations., Costa do Sauipe, 2007, pp. 117–120.

D. M. V. VITOLA, “Influência de um contorno plano sobre o desprendimento de vórtices ao redor de um cilindro circular.” Ph.D. dissertation, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2006.

M. A. VITOLA, E. B. C. SCHETTINI, and J. H. SILVESTRINI, “Vortex shedding from a cylinder in a constant-shear flow.” in 10th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences., Rio de Janeiro, 2004, pp. 11–21.

M. A. VITOLA, E. B. C. SCHETTINI, and J. H. SILVESTRINI, “Three dimensional wake structure of free planar shear flow around horizontal cylinder.” in ERCOFTAC Workshop on Direct and Large-Eddy Simulation-6., Poitiers, França, 2005, pp. 125–134.

E. LAMBALLAIS and J. H. SILVESTRINI, “Simulation of wakes with virtual cylinders.” Journal Comp. Fluid Dynamics, vol. 16 , pp. 305– 314, 2002.

C. H. K. WILLIAMSON and R. GOVARDHAN, “Vortex-induced vibrations,” Annu. Rev. Fluid Mech., vol. 36, pp. 413–455, 2004.

F. L. PONTA and H. AREF, “Numerical experiments on shedding from an oscillating cylinder.” J. Fluids and Structures., vol. 22, pp. 327–344, 2006.

H. S. HUANG, R. MITTAL, P. RAMPUNGGOON, and A. KHANNA, “A sharp interface cartesian grig method for simulating flows with complex moving boundaries,” J. Comp. Phys., vol. 174, pp. 345–380, 2001.

E. GUILMINEAU and P. QUEUTEY, “A numerical simulation of vortex shedding from an oscillating circular cylinder,” J. Fluids and Structures., vol. 16, pp. 773–794, 2002.

L. B. BENEVENUTTI and J. H. SILVESTRINI, “Estudo numérico do escoamento através de um cilindro oscilante utilizando o método de fronteiras imersas.” in XV Congresso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones., Santa Fé, Argentina, 2006, pp. 67–78.

J. R. MENEGHINI and P. W. BEARMAN, “Numerical simulation of high amplitude oscillatory flow about a circular cylinder.” J. Fluids and Structures., vol. 9, pp. 435–455, 1995.