



V SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, 07 a 09 de Novembro de 2012

ANÁLISE NUMÉRICA DA INTERAÇÃO ENTRE ESCOAMENTOS A BAIXOS NÚMEROS DE REYNOLDS E CILINDROS APOIADOS EM BASE ELÁSTICA

R.A.Gonçalves¹, P.R.F.Teixeira², E. Didier^{3,4}

¹ Universidade Federal do Rio Grande

^{1,2} Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
Avenida Itália, Km 8, Campus Carreiros, 96201-900, Rio Grande, RS, Brasil

¹ e-mail: rafa.a.g@ibest.com.br

² e-mail: pauloteixeira@furg.br

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Avenida do Brasil, 101,1700-066, Lisboa, Portugal

⁴ MARETEC, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

^{3,4} e-mail: edidier@lneec.pt

RESUMO

Neste artigo são apresentadas análises numéricas de fenômenos que ocorrem na interação entre escoamentos com baixos números de Reynolds e cilindros apoiados em base elástica. As simulações são realizadas através de um modelo numérico que usa o método semi-implícito de Taylor-Galerkin de dois passos para discretizar as equações de Navier-Stokes e a formulação Lagrangeana-Euleriana Arbitrária (ALE) para seguir o movimento do cilindro. A descrição de movimento do corpo rígido é determinada através do método de Newmark. Primeiramente, são analisadas as características do processo de geração de vórtice para o cilindro fixo. Neste caso, são obtidos os resultados do número de Strouhal e dos coeficientes de arrasto e de sustentação para números de Reynolds variando de 90 a 140. Posteriormente é realizada a análise do cilindro com suporte flexível (com uma mola e um amortecedor) na direção transversal ao escoamento. São estudados o deslocamento do cilindro e as frequências de vibração, assim como o fenômeno de sincronização (lock-in) entre o desprendimento de vórtices e a frequência de vibração. Os resultados numéricos são comparados com os obtidos experimentalmente por outros autores.

Palavras-chave: *Método dos elementos finitos, cilindro oscilante, interação fluido-estrutura.*

1. INTRODUÇÃO

A vibração induzida por vórtices (VIV) é um fenômeno encontrado em vários campos da engenharia. Destacam-se os seguintes exemplos: ventos causadores de oscilações em pontes, edifícios esbeltos, chaminés e cabos de transmissão de energia; escoamentos a altas velocidades que podem induzir movimento orbital em tubos internos de um trocador de calor; e as correntes e ondas que podem causar vibrações em tubulações.

A esteira a jusante de um cilindro circular causada por um escoamento uniforme conduz à uma variedade de fenômenos complexos, causando instabilidades que aumentam perto da esteira. Este caso foi estudado por várias décadas e, hoje em dia, o comportamento do escoamento é conhecido (Fredsoe e Sumer, 1997). Para número de

Reynolds (Re) até 49, são observadas duas zonas de recirculação estacionárias ligadas à parede do cilindro. De 49 a 190, a esteira ainda é laminar e é composta por duas linhas periódicas escalonadas de vórtices alternados (desprendimento de vórtices de von Kármán). Para números de Reynolds mais altos (de 190 a 260), a esteira torna-se tridimensional e progressivamente turbulenta. Este regime é seguido pela transição da camada de cisalhamento (até 1200), onde essas camadas separam-se e tornam-se instáveis e, por último, a transição da camada limite (Re de ordem 10^5), que está associada a uma grande diminuição do coeficiente de arrasto (*drag crisis*) (Zdravkovich, 1997). Quando os desprendimentos de vórtices de von Kármán não são claramente visíveis, a frequência relacionada a periodicidade do escoamento pode ser definida, por exemplo, como uma das flutuações da componente de velocidade conhecida (Placzek et al., 2009).

Em muitas aplicações, o cilindro oscila e interage com o desprendimento de vórtices. Para oscilações forçadas em uma faixa de frequência e amplitude, o movimento do cilindro é capaz de controlar o mecanismo de instabilidade gerado pelo desprendimento de vórtices. Uma das características mais interessantes desta interação fluido-estrutura é a sincronização (*lock-in*) entre o desprendimento de vórtices e a frequência de vibração. Fenômenos semelhantes são observados para VIV (vibração induzida por vórtices), onde o escoamento faz com que a oscilação do cilindro esteja próximo a sua frequência natural, a qual depende da massa, da rigidez e do amortecimento do cilindro. Neste fenômeno, que ocorre em uma faixa de velocidade de escoamento, a amplitude de vibração atinge um valor máximo.

Este tipo de problema ainda é objeto de muitos estudos, principalmente para a validação de modelos numéricos de interação fluido-estrutura. Várias análises numéricas podem ser encontradas na literatura para uma ampla faixa de números de Reynolds, incluindo aquelas baseadas nas Equações de Navier-Stokes pela média de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes* - RANS) (Saghafian et al, 2003; Guilmineau e Queutey, 2004), que usam a metodologia da simulação de grandes escalas (*Large Eddy Simulations* - LES) (Breuer, 2000; Pasquetti, 2005; Al-Jamal e Dalton, 2004), que apresentam a simulação numérica direta (*Direct Numerical Simulations* - DNS) e os métodos que usam volumes finitos ou aproximações de elementos finitos para resolver as equações de Navier-Stokes (Anagnostopoulos e Bearman, 1992; Nobari e Naredan, 2006; Mittal e Kumar, 2001).

Este trabalho apresenta a simulação numérica de um cilindro rígido, apoiado em uma mola e um amortecedor na direção transversal ao escoamento, sujeito a escoamentos com números de Reynolds variando entre 90 e 140. A simulação é realizada utilizando o modelo numérico que usa um método semi-implícito de dois passos de Taylor-Galerkin para discretizar as equações de Navier-Stokes e a formulação Lagrangeana-Euleriana Arbitrária (ALE) para seguir o movimento do cilindro. A descrição de movimento do corpo rígido é definida usando o método de Newmark. Nesta análise é estudado o processo de geração de vórtices, além das forças de sustentação e de arrasto. Os deslocamentos do cilindro e as frequências de vibração também são analisados, destacando-se a sincronização (*lock-in*) entre o desprendimento de vórtices e a vibração do cilindro.

2. MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico é baseado em um esquema particionado, no qual o escoamento do fluido e a estrutura são solucionados de forma acoplada. Basicamente, a interação fluido-estrutura adotada no código consiste nos seguintes passos: (a) atualizar as variáveis do escoamento do instante t para $t + \Delta t$, (b) aplicar pressão e tensão viscosa como carga na estrutura; (c) atualizar as variáveis da estrutura do instante t para $t + \Delta t$; (d) impor o movimento do corpo para o escoamento em termos de atualização do vetor de velocidade e da posição de contorno.

A atualização das variáveis do escoamento consiste das seguintes etapas (Teixeira, 2001; Teixeira e Awruch, 2005):

a) Calcular a velocidade não corrigida em $t + \Delta t/2$, onde o termo de pressão está no instante t , de acordo com a Eq. (1).

$$\tilde{U}_i^{n+1/2} - U_i^n - \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\partial f_{ij}^n}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^n}{\partial x_j} + \frac{\partial p^n}{\partial x_i} - \rho g_i - w_j^n \frac{\partial U_i^n}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

onde ρ é a massa específica, p é a pressão, g_i são as componentes da aceleração da gravidade, v_i são as componentes de velocidade do fluido, w_i são as componentes de velocidade de referência do sistema e τ_{ij} é o tensor de tensões viscosas, $U_i = \rho v_i$, $f_{ij} = v_j (\rho v_i) = v_j U_i$ ($i, j = 1, 2$).

b) Atualizar a pressão p em $t + \Delta t$, dada pela equação de Poisson:

$$\frac{1}{c^2} \Delta p = -\Delta t \left[\frac{\partial \tilde{U}_i^{n+1/2}}{\partial x_i} - \frac{\Delta t}{4} \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \Delta p}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

onde $\Delta p = p^{n+1} - p^n$ e $i = 1, 2$.

c) Corrigir a velocidade em $t+\Delta t/2$, adicionando o termo da variação de pressão de t para $t+\Delta t/2$, de acordo com a equação:

$$U_i^{n+1/2} = \tilde{U}_i^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{4} \frac{\partial \Delta p}{\partial x_i} \quad (3)$$

d) Calcular a velocidade em $t+\Delta t$ usando as variáveis atualizadas nas etapas anteriores, como segue:

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \Delta t \left(\frac{\partial f_{ij}^{n+1/2}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{n+1/2}}{\partial x_j} + \frac{\partial p^{n+1/2}}{\partial x_i} - w_j^{n+1/2} \frac{\partial U_i^{n+1/2}}{\partial x_i} - \rho g_i \right) \quad (4)$$

O método clássico dos resíduos ponderados de Galerkin é aplicado para a discretização espacial das Eq. (1), (2), (3) e (4), utilizado um elemento triangular. Para as variáveis nos instantes $t + \Delta t/2$ é usada uma função de forma constante, enquanto que para as variáveis em t e $t + \Delta t$ é usada uma função de forma linear (Teixeira e Awruch, 2001). As componentes de velocidade verticais da malha (w_z) são calculadas para cada nó a cada instante de tempo para diminuir as distorções dos elementos, mantendo as velocidades prescritas nas superfícies de contorno móveis e estacionárias. O algoritmo de movimento da malha adotado neste trabalho utiliza um procedimento de suavização para as velocidades com base nestas linhas de fronteira. A atualização da velocidade da malha em um nó i do domínio é baseada na velocidade da malha dos nós j que pertencem às linhas de contorno.

A modelagem dos movimentos de um corpo rígido implica no cálculo dos deslocamentos e rotações de uma massa hipotética concentrada em seu centro de gravidade. Neste estudo de caso, o movimento ocorre só na direção transversal (um grau de liberdade - GDL) e, conseqüentemente, as variáveis a serem determinadas em cada passo de tempo são o deslocamento, a velocidade e aceleração nesta direção. Portanto, para atualizar as variáveis da estrutura, o movimento rígido do cilindro é calculado a cada instante, após as variáveis do escoamento (pressão e tensão viscosa) ser conhecidas. Para este estudo de caso, é considerada a equação dinâmica de um GDL para a direção transversal, como se segue:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F \quad (5)$$

onde, \dot{y} , \ddot{y} e y são a velocidade, a aceleração e o deslocamento transversais, respectivamente; m é a massa; c é o coeficiente de amortecimento; k é a rigidez e F é a força dinâmica. Neste código, a Eq. (5) é discretizada no tempo, usando o método implícito de Newmark (Bathe, 1996).

3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

O estudo de caso consiste de um cilindro ($D = 1.6 \times 10^{-3}$ m e $m = 0.2979$ kg) sujeito a um escoamento uniforme da água (massa específica, ρ , e viscosidade, μ , iguais a 1000.0 kg/m^3 e 1×10^{-3} kg/(ms), respectivamente). O cilindro é montado sobre uma mola e um amortecedor na direção transversal e fixado na direção do escoamento. A rigidez da mola, k , é igual a 579 N/m , e o coeficiente de amortecimento, c , é igual a 3.25×10^{-2} kg/s, resultando em uma frequência natural do sistema igual a $f_n = 7.016 \text{ Hz}$.

Primeiramente, foi analisada a influência do tamanho do domínio computacional para um número de Reynolds igual a 135, uma vez que os resultados tem forte dependência com a distância do cilindro em relação aos contornos do domínio, como já foi constatado por outros autores (Didier, 2008; Baranyi e Lewis, 2006). Após essa análise de convergência, adotou-se um domínio retangular com 0.320 m de largura e 0.384 m de comprimento, como mostrado na Fig. 1. O centro do cilindro está localizado no centro do domínio na direção transversal em relação ao escoamento e a 0.160 m a partir do seu lado esquerdo na direção longitudinal. Após, foi realizada uma análise de independência de malha, chegando-se a conclusão de que o número de divisões do contorno do cilindro que proporciona a melhor relação entre o tempo computacional e a precisão é de 200. Os tamanhos dos elementos aumentam gradualmente para os limites do domínio. A malha não estruturada tem 298143 nós e 595526 elementos triangulares.

Como condições de contorno, é imposta velocidade constante no lado esquerdo; nas paredes superior e inferior, é imposta uma condição de não deslizamento; no contorno do lado direito é imposta a pressão nula. O passo de tempo usado para as simulações é de $5.0 \times 10^{-5} \text{ s}$.

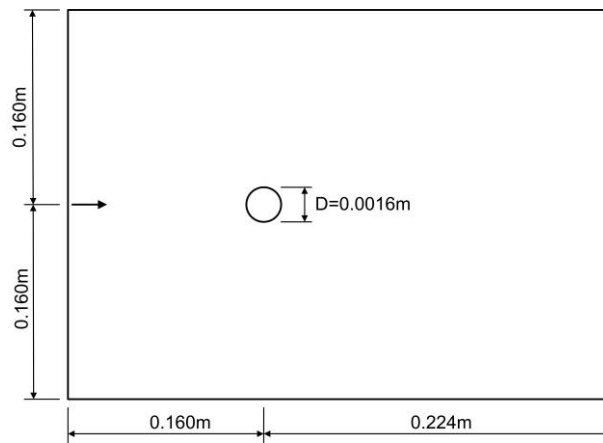


Figura 1. Domínio numérico.

Primeiramente, é analisado o comportamento do escoamento considerando o cilindro fixo. Especificamente, são apresentadas neste trabalho as características de escoamento em $Re = 105$ (velocidade do escoamento $U = 6.5625 \times 10^{-2}$ m/s). A Figura 4 mostra os vetores de velocidade em nove instantes, ao longo um período de formação de vórtice. A formação dos vórtices é claramente observada, mostrando duas regiões diferentes à jusante do cilindro, onde ocorre a separação do escoamento. Nota-se que, enquanto que o vórtice superior gira num sentido, o vórtice oposto gira em sentido oposto.

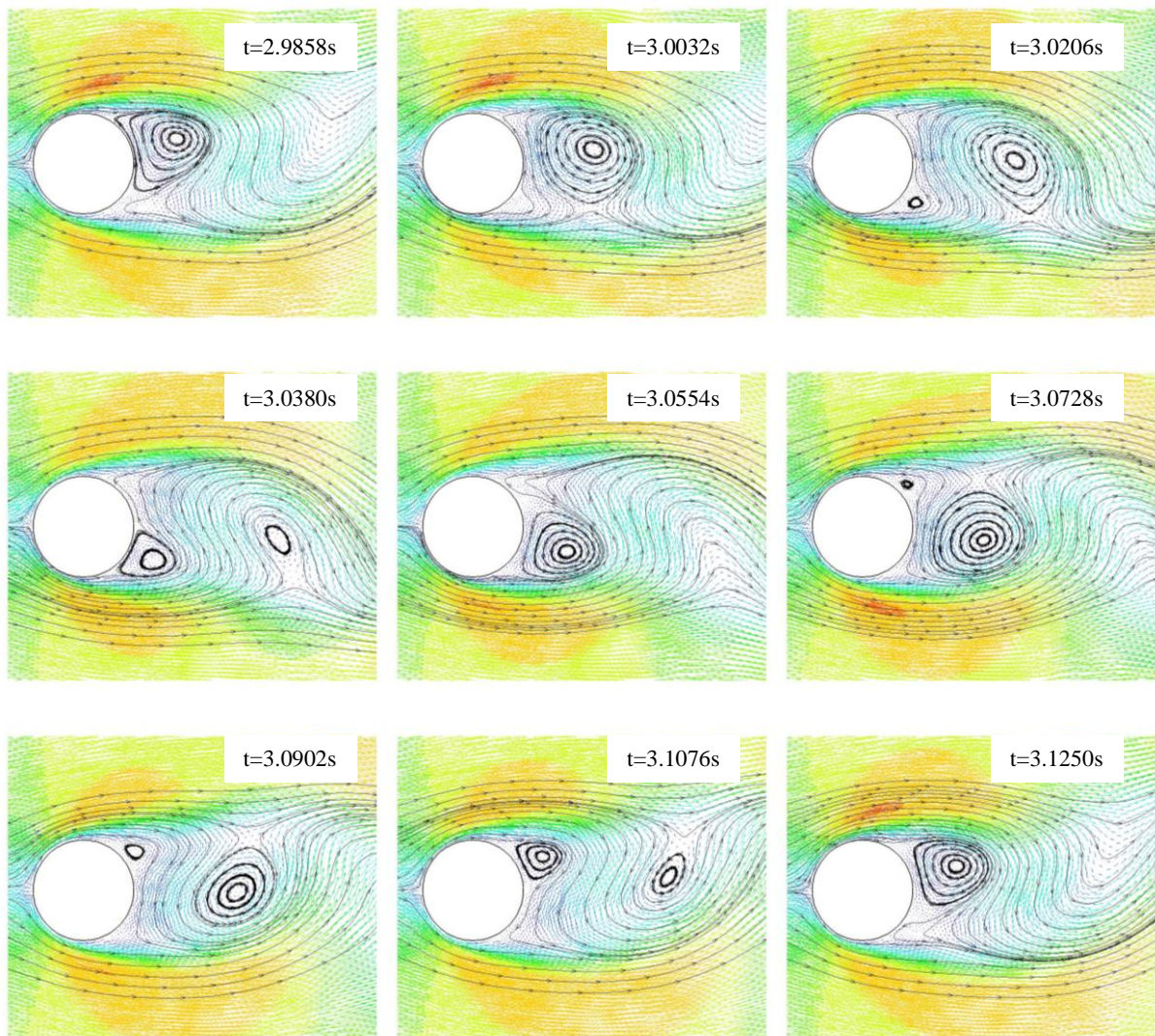
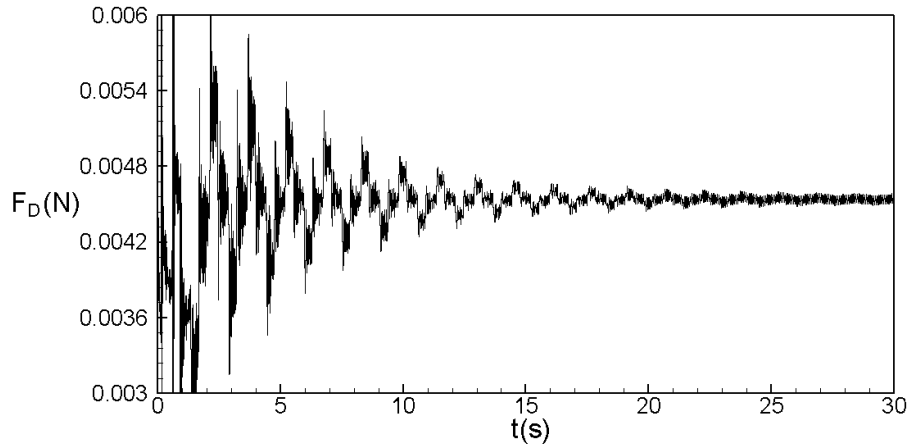
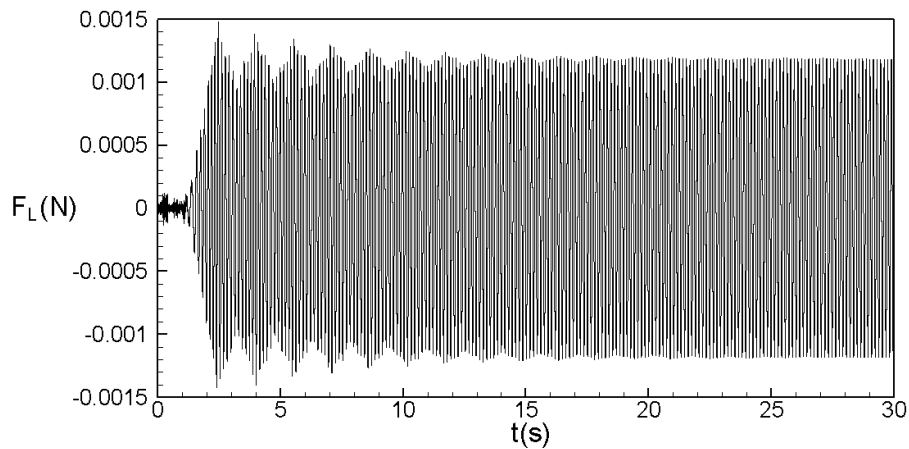


Figura 2. Vetores de velocidade em nove instantes ao longo de um período de formação de vórtices.

As forças de arrasto e de sustentação, obtidas pela simulação numérica, sobre o cilindro para $Re = 105$ são mostradas na Fig. 3. Observa-se que, após variações iniciais de grande magnitude, a força de arrasto (F_D) apresenta uma pequena variação em torno do valor médio de 4.5×10^{-3} N. A força de sustentação (F_L) mostra um comportamento periódico que estabiliza com amplitude igual a 1.2×10^{-3} N e frequência igual a $f = 6.828$ Hz, devido ao desprendimento de vórtices.



(a)



(b)

Figura 3. Forças de arrasto (a) e sustentação (b) para cilindro fixo com $Re = 105$.

A Figura 4 mostra uma comparação entre os números de Strouhal ($St = f D/U$) obtidos por resultados numéricos (onde f é igual à frequência de desprendimento de vórtices) e pelos resultados de Williamson (Williamson, 1989), baseados em dados experimentais para Re de 90 a 140. Os números de Strouhal obtidos numericamente tem boa concordância com os experimentais, pois a diferença média é de apenas 0.03%. A média do coeficiente de arrasto (C_D) e a média quadrática (*Root Mean Square* - RMS) do coeficiente de sustentação (C_L) para a mesma faixa de Re são mostrados nas Fig. 5 e 6, respectivamente. Estes valores são comparados com aqueles obtidos por Poldziech e Grundmann (2007) e Baranyi e Lewis (2006), respectivamente. Os primeiros autores usam um método de elemento espectral enquanto que os outros usam o método denominado de *Grid based*. A média das diferenças entre os resultados obtidos por este estudo e por esses autores são de 0.8% e 0.2% em relação ao C_D e C_L , respectivamente. É importante mencionar que a boa precisão dos valores obtidos para St e C_L mostra a capacidade do modelo em reproduzir adequadamente as forças impostas sobre a estrutura no processo de interação fluido-estrutura.

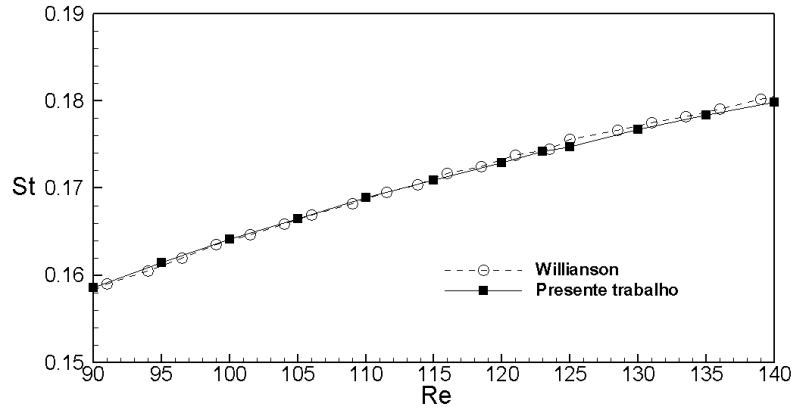


Figura 4. Relação entre o número de Strouhal e número de Reynolds.

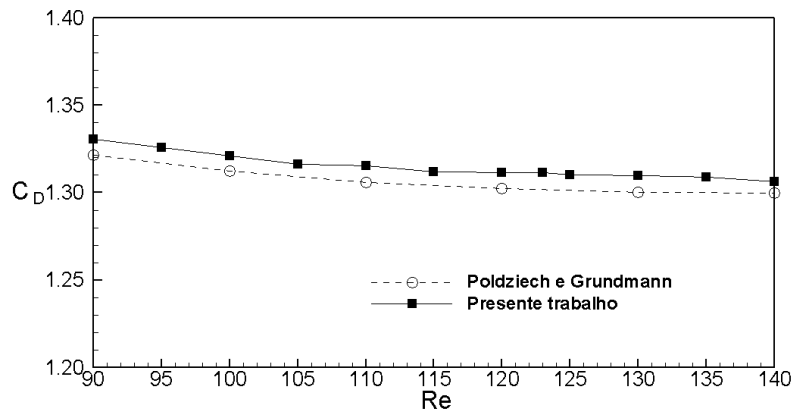


Figura 5. Relação entre o coeficiente de arrasto médio (C_D) e número de Reynolds.

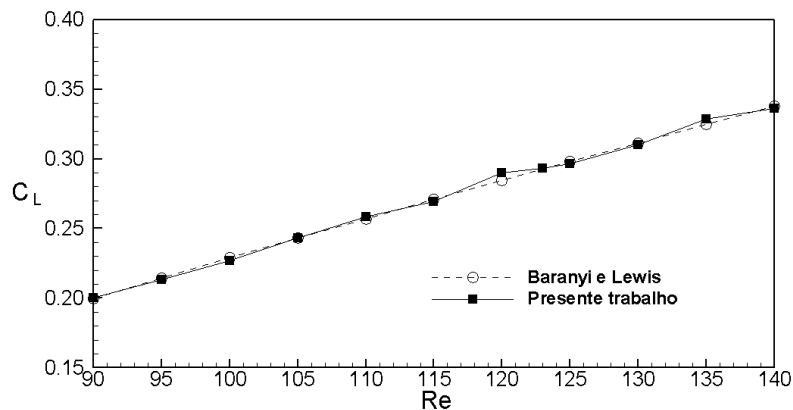


Figura 6. Relação entre coeficiente de sustentação RMS (C_L) e número de Reynolds.

Após a análise considerando o cilindro fixo, é estudada a interação entre o cilindro apoiado sobre uma fixação elástica na direção transversal e os escoamentos a vários números de Reynolds (de 90 a 140). A Figura 7 mostra a relação entre a amplitude (Y) da oscilação do cilindro e o seu diâmetro (D) em função do número de Reynolds (90 a 140). A Figura 8 mostra a relação entre a frequência de vibração e a frequência natural (f/f_n) em função do número de Reynolds. Os resultados numéricos mostram que o fenômeno de sincronização (*lock-in*) foi captado para números de Reynolds entre 102 e 113. Isto é observado devido ao aumento da amplitude e a igualdade entre as frequências de vibração e a frequência natural do sistema. Fora da região de sincronização, as amplitudes são muito pequenas e as frequências de vibração se afastam mais da frequência natural. As diferenças encontradas entre as amplitudes experimentais (Anagnostopoulos e Bearman, 1992) e as numéricas no intervalo de número de Reynolds da região de

sincronização, também foram observados por Dettmer e Peric (2006). Estes autores usaram um modelo que emprega a técnica dos elementos finitos com acoplamento pressão-velocidade estabilizado e de baixa ordem, uma formulação lagrangeana-euleriana e o método de discretização implícito α -generalizado para o movimento de corpo rígido. De acordo com os autores, essas diferenças podem ser explicadas comparando o domínio e as condições de contorno considerados na simulação numérica, com a situação real da experiência, desenvolvida por Anagnostopoulos e Berman (1992). Enquanto na modelagem computacional considera-se um domínio bidimensional, o experimento é realizado em um canal de 0.70m de profundidade e o cilindro circular é composto de uma barra submersa até 0.12m de profundidade. A falta de uma placa horizontal na extremidade do cilindro submerso e a influência da superfície livre contribui para o desenvolvimento de um escoamento tridimensional, ao contrário do que é suposto numericamente.

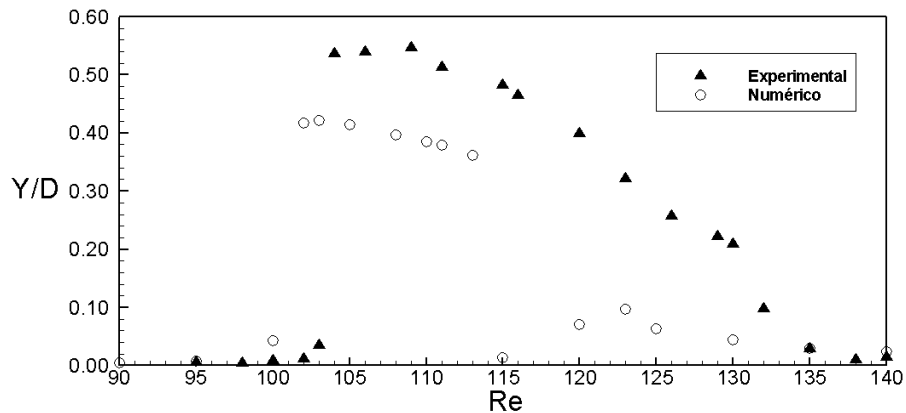


Figura 7. Relação entre amplitude (Y/D) e número de Reynolds.

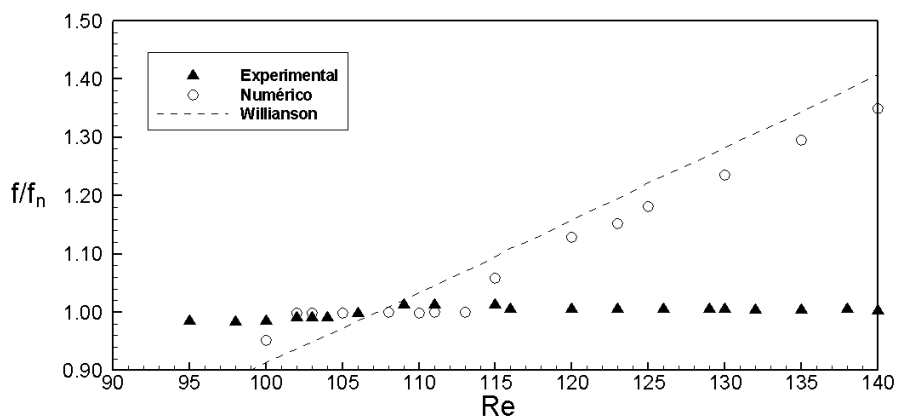


Figura 8. Relação entre frequência de vibração (f/f_n) o número de Reynolds.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram apresentadas análises numéricas de fenômenos que ocorrem na interação entre escoamentos a baixos números de Reynolds e cilindros apoiados sob base elástica. O modelo numérico usa o método implícito de Taylor-Galerkin de dois passos adotando um elemento triangular e uma formulação ALE. Após análises da influência do tamanho do domínio e do elemento, foi definida a malha de elementos finitos. Para o cilindro fixo, foi analisado o comportamento de formação de vórtice, observando-se que, enquanto um vórtice gira num sentido, o outro vórtice gira sentido oposto. Os números de Strouhal, os coeficientes de arrasto médio e de sustentação RMS para números de Reynolds variando de 90 a 140 foram comparados com os obtidos por outros autores, encontrando-se valores muito semelhantes. O fenômeno de sincronização foi observado para Reynolds de 102 a 113, caracterizado pelo aumento significativo da amplitude de vibração, justificado pela aproximação da frequência de vibração com a frequência natural do sistema. As amplitudes e as frequências de vibração foram comparadas com os resultados experimentais e algumas diferenças podem ser justificadas pela presença de efeitos tridimensionais existentes nos experimentos e que não são considerados na simulação numérica.

5. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a bolsa de pós-graduação da CAPES. O segundo autor agradece o suporte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq através do projeto 303308/2009-5.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Jamal, H., and Dalton, C. Vortex induced vibrations using large eddy simulation at a moderate Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 19(1): 73-92, 2004.
- Anagnostopoulos, P., and Bearman P.W. Response characteristics of a vortex-excited cylinder at low Reynolds numbers. *Journal of Fluids and Structures*, 14(6): 39-50, 1992.
- Baranyi, L., Lewis R.I., Comparison of grid-based and vortex dynamics predictions of low Reynolds number cylinder flows, *Aeronaut. J.*, 110, 63-71, 2006.
- Bathe, K.J. *Finite element procedures*. Prentice-Hall, 1996.
- Breuer M.. A challenging test case for large eddy simulation: high Reynolds number circular cylinder flow. *International Journal of Heat Fluid Flow*, 21(5): 648-654, 2000.
- Dettmer, W., and Peric, D. A computational framework for fluid-rigid body interaction: Finite element formulation and applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195: 1633-1666, 2006.
- Didier, E. Convergência assintótica das quantidades fundamentais na modelação numérica do escoamento em torno de um cilindro circular, II Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica. Lisboa (2008), Universidade de Aveiro.
- Fredsøe, Jorge; Sumer, B. Mutlu. *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*. Volume 12. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 1997. 530 p. ISBN 981-02-2898-8.
- Guilmineau, E., and Queutey, P. Numerical simulation of vortex-induced vibration of a circular cylinder with low mass-damping in a turbulent flow. *Journal of Fluids and Structures*, 19: 449-466, 2004.
- Mittal, S., and Kumar, V. Flow-induced vibrations of a light circular cylinder at Reynolds numbers, *J Sound Vibr.*, 5(245): 923-46, 2001.
- Nobari, M.R.H., and Naredan H. A numerical study of flow past a cylinder with cross flow and inline oscillation. *Computers of Fluids*, 35(4):393-415, 2006.
- Pasquetti R. High-order methods for the numerical simulation of vertical and turbulent flows – high-order LES modeling of turbulent incompressible flow. *Comptes Rendus Mécanique*, 333(1): 39-49, 2005.
- Placzek, A., Sigrist J-F. β ., and Hamdouni, A. Numerical simulation of an oscillating cylinder in a cross-flow at low Reynolds number: Forced and free oscillations. *Computer & Fluids*, 38:80-100, 2008.
- Poldziejch, O., Grundmann, R., A systematic approach to the numerical calculation of fundamental quantities of the two-dimensional flow over circular cylinder, *Journal of Fluids and Structures* 23 (2007) 479-499.
- Saghafian M., Stansby, P.K., Saidi, M.S., and Apsley, D.D. Simulation of turbulent flows around a circular cylinder using nonlinear eddy-viscosity modeling: steady and oscillatory ambient flows. *Journal of Fluids and Structures*, 15(1): 1213-1236, 2003.
- Teixeira, P.R.F. Simulação numérica da interação de escoamentos tridimensionais de fluidos compressíveis e incompressíveis e estruturas deformáveis usando o método de elementos finitos, Porto Alegre, Doctoral Thesis, PPGEC-UFRGS, 2001.
- Teixeira, P.R.F., and Awruch, A.M. Numerical simulation of fluid-structure interaction using the finite element method. *Computers & Fluids*, 34: 249-273, 2005.
- Teixeira, P.R.F., and Awruch, A.M. Three-dimensional simulation of high compressible flows using a multi-time-step integration technique with subcycles. *Applied Mathematical Modelling*, 25: 613-627, 2001.
- Williamson, C. H. K., Oblique and parallel models of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, 206, 579-627, 1989.
- Zdravkovich, M. M. *Flow around circular cylinders*. Volume 1. New York: Oxford university press. 1997. 672 p. ISBN 978-0-19-856396-9.

7. AVISO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluídos neste artigo.