

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO SOBRE DOIS CILINDROS DISPOSTOS LADO A LADO

AUTORES:

SANDI ITAMAR SCHAFFER DE SOUSA¹, ÍTALO RÉGIO ALVES DA NÓBREGA¹, JONATHAN JALLES SILVA BATISTA¹, ROMMEL SOARES DE ARAÚJO¹

INSTITUIÇÃO:

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8º PDPETRO.

ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO SOBRE DOIS CILINDROS DISPOSTOS LADO A LADO

Abstract

The perpendicular fluid flow through two cylinders arranged side by side with a narrow distance between them has interesting characteristics. A difference on the frequency of vortex shedding for each cylinder makes the two wakes formed interact between them randomly. The literature calls it a bistable phenomenon. The present work provides a numerical study of these flow patterns downstream the two cylinders, showing that the drag coefficient for each cylinder oscillates as the wakes move up and down. The commercial package ANSYS-CFX 13 is employed to approximate the equations of the URANS (Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) method applied to finite volumes using the SST (Shear Stress Transport) turbulence model. Velocity, pressure and vorticity fields and the shear stress on the cylinders are presented.

Introdução

Quando dois cilindros distantes entre si estão dispostos um acima do outro perpendicularmente ao escoamento de um fluido, um comportamento randômico começa a ocorrer à jusante dos cilindros. Quando ocorre o descolamento da camada limite nos cilindros, devido ao gradiente de pressão adverso gerado pelo corpo rombudo, vórtices começam a se desprender ao longo do escoamento. Para cada cilindro, ocorre uma diferente frequência de desprendimento desses vórtices. Dessa forma as duas esteiras formadas começam a interagir uma com a outra, desviando juntas de um lado para o outro.

Bearman e Wadcock, 1973, chamaram o fenômeno de biestabilidade. Zdravkovich, 1977, verificou que a biestabilidade provocava alterações também randômicas na distribuição da pressão em torno dos cilindros, alterando assim os coeficientes de arrasto para cada cilindro, de forma que sempre o valor da soma dos arrastos em cada cilindro nunca ultrapassava o valor de duas vezes o arrasto gerado por apenas um cilindro.

Há diversos exemplos na engenharia onde o desprendimento de vórtices pode causar oscilações nas forças de arrasto e de sustentação de algumas estruturas, como pontes, plataformas petrolíferas, *risers*, dentre outros, podendo leva-los ao colapso. Em trocadores de calor do tipo casco e tubos, ou em núcleos de reatores nucleares é muito comum encontrar estruturas como bancos de tubos cilíndricos equidistantes, ou seja, estruturas semelhantes à geometria estudada neste trabalho. O comportamento biestável pode gerar vibrações indesejadas nos equipamentos e também pode afetar a eficiência na troca de calor em alguns sistemas. Sendo assim, o conhecimento dos efeitos desse fenômeno é de vital importância na engenharia, de modo a evitar falhas nos equipamentos.

A ferramenta CFD (*Computational Fluid Dynamics*) vem se tornando cada vez mais poderosa. Ela auxilia os engenheiros a projetarem seus equipamentos

de maneira mais eficiente, permitindo aos estudiosos da mecânica dos fluidos compreenderem fenômenos importantes, muitas vezes bem complexos, que surgem em diferentes situações e configurações geométricas. Além disso, ela proporciona uma visualização clara e interativa das características do escoamento. Dessa forma, o presente trabalho visa identificar e caracterizar o fenômeno da biestabilidade a partir do estudo numérico, utilizando o pacote comercial ANSYS-CFX 13 como ferramenta para o estudo. Serão apresentados campos de velocidade e de pressão e os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação para os dois cilindros.

Metodologia

O modelo utilizado para a simulação numérica tem como base um parâmetro p/d , denominado razão de espaçamento. Onde “ p ” é a distância entre as linhas de centro dos cilindros e “ d ” o diâmetro dos cilindros. Os cilindros possuem diâmetro de 25,1 mm e a razão de espaçamento foi fixada em 1,3. A geometria do canal tem seção retangular com 193 mm de largura por 146 mm de altura e um comprimento de 500 mm. O centro geométrico dos dois cilindros coincide com o centro geométrico de um plano transversal distante 200 mm da parede de entrada do canal. Um canal primário com mesma altura e mesma largura, porém com cerca de 60 vezes o diâmetro hidráulico do canal principal é utilizado para o desenvolvimento do perfil de velocidade.

O canal primário foi utilizado para uma simulação preliminar com ar padrão escoando em regime permanente a 25 °C, com número de Reynolds de $5,3 \cdot 10^3$ e pressão de 1 atm. Os efeitos de compressibilidade foram desconsiderados. O modelo de turbulência adotado foi o *Shear Stress Transport* (SST). Foram adotadas condições de não deslizamento e parede lisa nas superfícies superior e inferior e condição de simetria nas paredes laterais do canal para considerar um escoamento bidimensional no ANSYS-CFX 13. O campo de velocidade desenvolvido na saída do canal primário foi usado como condição de entrada no canal principal.

Nessa segunda simulação, o escoamento foi tratado como transiente. Nas paredes laterais foram consideradas condições de simetria e nas paredes superior e inferior, assim como nas superfícies dos dois cilindros, foram consideradas condições de não deslizamento e superfície lisa. A saída tem uma pressão estática relativa de 0 Pa. Nas superfícies do cilindro superior e inferior foram considerados fluxos de calor de 5000 W/m². O mesmo modelo de turbulência e as mesmas condições do ar padrão foram utilizados. Foi considerado um tempo total de escoamento de 350 segundos, com passos de tempo de 0,005 segundos. O critério de convergência foi de $1 \cdot 10^{-6}$ RMS (*Root Mean Square*) para todas as velocidade e para a pressão.

Para a confecção da malha o software ICEM CFD 13 foi utilizado. A malha computacional possui 75.762 nós e 115.072 elementos. Para capturar os efeitos viscosos da camada limite, os primeiros elementos nas paredes superior e inferior, assim como nas superfícies dos dois cilindros, possuem $1 \cdot 10^{-3}$ mm, suficiente para manter $y^+ < 1$. As camadas de elementos subsequentes cresceram

a uma razão de 1,2. Garantiu-se no mínimo 15 camadas de elementos dentro da camada limite.

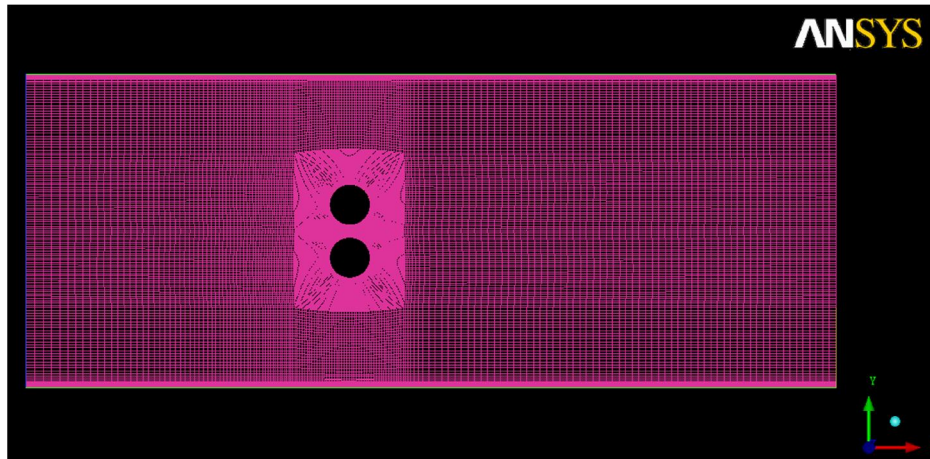


Figura 1 - Malha computacional.

Equações governantes

As equações governantes aproximadas pelo software ANSYS-CFX aos volumes finitos são as equações conhecidas como URANS (*Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes*) em sua forma conservativa. O modelo de turbulência utilizado foi o κ - ω SST. Esse modelo foi proposto por Menter, 2003, o qual uniu as qualidades do modelo k - ϵ no tratamento da zona do escoamento potencial e as qualidades do modelo κ - ω no tratamento da zona do escoamento próximo as paredes. As equações de transporte do modelo SST podem ser expressas a seguir, como:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \bar{\tau}_{i,j}}{\partial x_j} \quad (2)$$

Onde u_i são as componentes de velocidade, ρ é a massa específica, p é a pressão, e τ é o tensor das tensões viscosas de Reynolds. A viscosidade turbulenta deste modelo é definida como:

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 \kappa}{\max \left[a_1 \omega (S_{i,j} S_{i,j})^{\frac{1}{2}} \right] F_2} \quad (3)$$

Onde $(S_{i,j} S_{i,j})^{1/2}$ é uma medida invariante do tensor taxa de deformação, F_2 é uma das funções de combinação, κ a energia cinética turbulenta, ω é a dissipação específica. O modelo SST necessita também das soluções das equações de transporte de k (energia cinética turbulenta) e de ω (dissipação), mostradas a seguir:

$$\rho \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega \quad (4)$$

$$P_k = \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \Rightarrow P_k = \min(P_k, 10 \beta^* \rho k \omega) \quad (5)$$

$$\rho \bar{u}_i \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (6)$$

Onde o termo F_1 é definido como:

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{B^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{\kappa \omega} y^2} \right] \right\}^4 \quad (7)$$

Sendo:

$$CD_{\kappa \omega} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (8)$$

E a função de combinação F_2 :

$$F_2 = \tanh \left\{ \max \left(\frac{2 \sqrt{k}}{B^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \right\} \quad (9)$$

Na Eq. 9, y é a distância da superfície de não deslizamento e as outras constantes são oriundas dos modelos $k-\varepsilon$ e $k-\omega$ com alguns ajustes e são determinadas como descrito por Menter et al (2003): $\beta^* = 0,09$, $\alpha_1 = 5/9$, $\beta_1 = 0.075$, $\sigma_k = 0,85$, $\sigma_{\omega 1} = 0,5$, $\alpha_2 = 0,44$, $\beta_2 = 0,0828$, $\sigma_{k 2} = 1$ e $\sigma_{\omega 2} = 0,856$.

Resultados e Discussão

Para demonstrar o fenômeno biestável, dois pontos foram criados dentro da geometria do canal. O primeiro ponto, P1, está localizado na linha horizontal tangente ao ponto mais inferior do cilindro superior e distante 15 mm de seu centro ao longo do eixo "x". O segundo ponto, P2, está localizado logo abaixo de P1, na linha horizontal tangente ao ponto mais superior do cilindro inferior, como demonstra a **Fig. 2**.

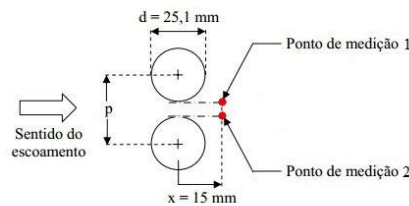


Figura 2 – Localização dos pontos para medição de dados.

A variação da velocidade média nesses dois pontos está representada na **Fig. 3** durante o período de tempo entre 97 e 103 segundos. Observa-se claramente o fenômeno biestável, uma vez que os valores máximos e mínimos das velocidades em cada ponto se alternam ao passar do tempo de maneira aleatória. Esse comportamento indica que as esteiras dos dois cilindros estão mudando de direção com o tempo. As esteiras podem se manter relativamente estáveis por até cerca de 0,5 segundos em uma posição até que haja uma nova inversão de direção.

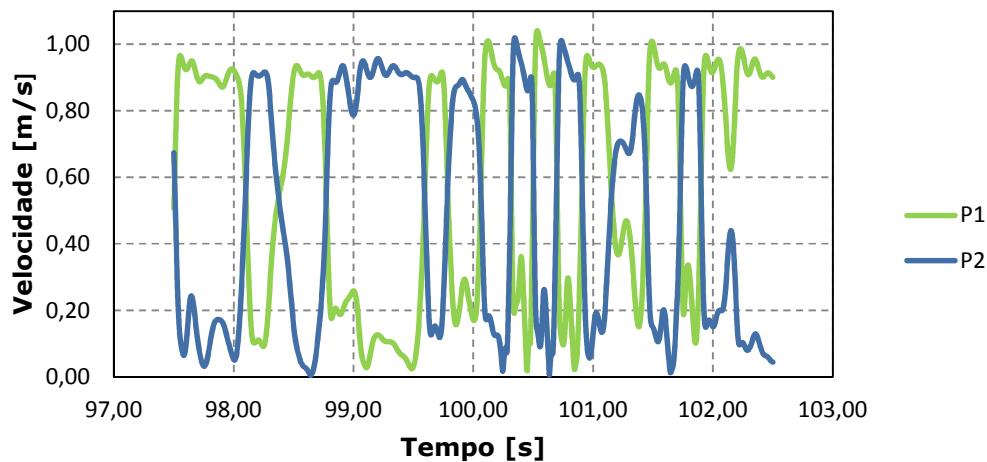


Figura 3 – Velocidades médias do ar ao longo do tempo nos pontos P1 e P2.

A **Fig. 4.a** mostra o contorno de velocidade para o escoamento no momento equivalente a 98,2 segundos, com as esteiras inclinadas para baixo ao longo do escoamento. A **Fig. 4.b** mostra o escoamento em 102,5 segundos, com as esteiras voltadas para cima. Os contornos de pressão para os mesmos períodos estão representados na **Fig. 5.a** e **5.b**.

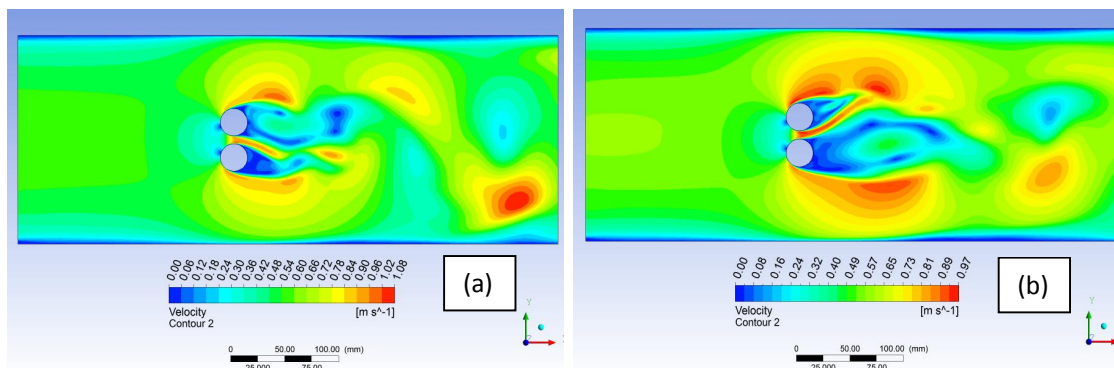


Figura 4 – Contornos de velocidade. (a) Em 98,2 seg.; (b) Em 102,5 seg.

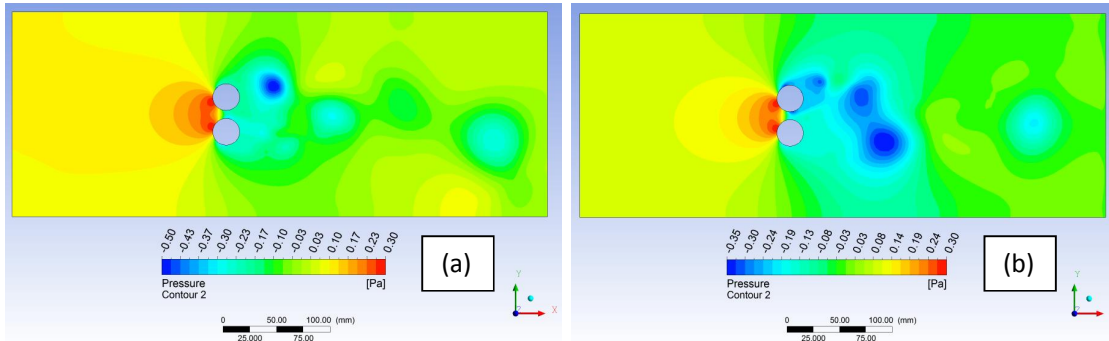


Figura 5 – Contornos de pressão. (a) Em 98,2 seg.; (b) Em 102,5 seg.

A biestabilidade provoca alterações de forma aleatória na direção e no módulo das forças resultantes atuantes nos dois cilindros. Essas alterações podem ser observadas na **Fig. 6** e na **Fig. 7**, as quais demonstram os coeficientes de arrasto (C_D) e os coeficientes de sustentação (C_L), respectivamente, ao longo do espaço de tempo entre 97 e 103 segundos. Nota-se que os valores de C_D para os cilindros superior e inferior se alternam de maneira similar aos valores das velocidades com relação ao tempo. Entretanto, os valores de C_L oscilam aleatoriamente em torno de um valor médio de 0,000611 para o cilindro superior e de -0,000565 para o cilindro inferior.

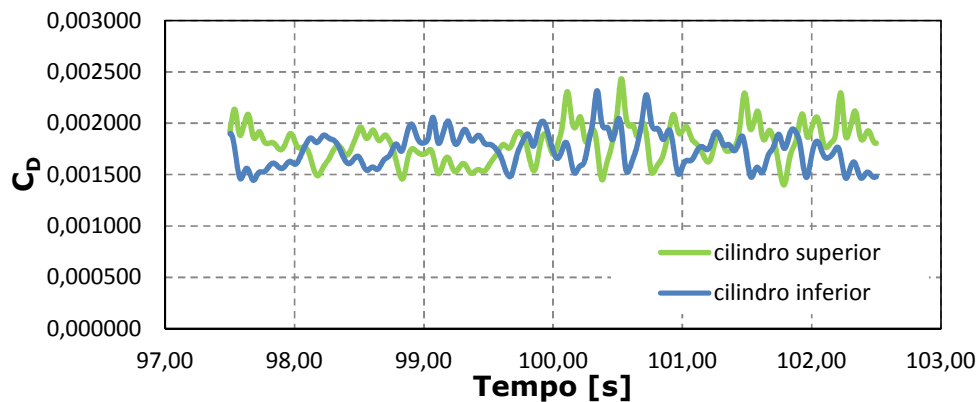


Figura 6 – Coeficientes de arrasto entre 97 e 103 segundos.

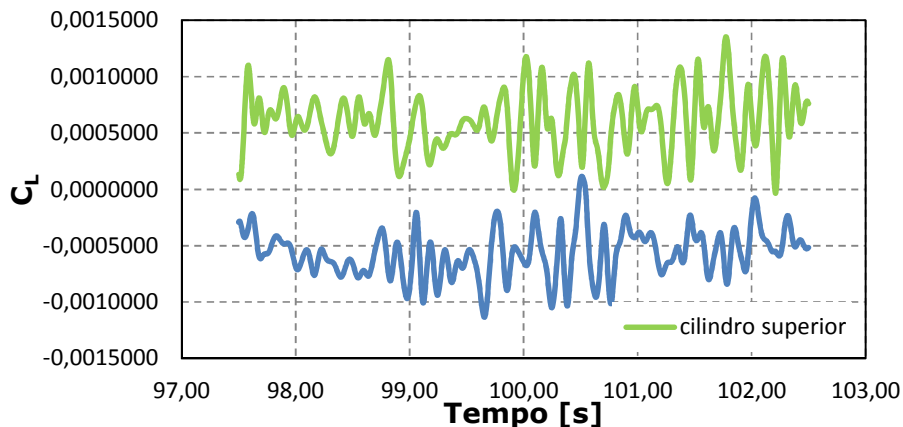


Figura 7 – Coeficientes de sustentação entre 97 e 103 segundos.

Conclusões

Vários estudos veem procurando caracterizar o fenômeno da biestabilidade. Saber o comportamento do fluido e as forças resultantes que atuam sobre determinados componentes estruturais, aqui representados pelos dois cilindros, é de vital importância para o dimensionamento de equipamentos como pontes, plataformas petrolíferas, *risers*, trocadores de calor ou até canais de refrigeração de núcleos de urânio em usinas nucleares. Foi demonstrado que as forças de arrasto e de sustentação alteram seus valores aleatoriamente com o tempo, podendo provocar vibrações capazes de atingir a frequência natural da estrutura, causando falhas estruturais ou redução de eficiência dos equipamentos em questão.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), especialmente ao Departamento de Engenharia Mecânica pelo espaço físico do Laboratório de Mecânica Computacional, cujas máquinas permitem que simulações numéricas como a deste artigo ocorram sem muitos problemas.

Referências Bibliográficas

Bearman, P. W.; Wadcock, A. J. The Interaction Between a Pair of Circular Cylinders Normal to a Stream, **Journal of Fluid Mechanics**, v. 61, Part 3, p. 499-511. 1973.

Zdravkovich, M. M. Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements, **Journal of Fluids Engineering**, v. 4, p. 618-633. 1977.

Menter, F.R.; Kuntz, M.; Langtry, R. (2003); "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model"; *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, v. 4.

VAGTINSKI, Alexandre de Paula. **Determinação de parâmetros que caracterizam o fenômeno da biestabilidades em escoamentos turbulentos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 158 pags. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Porto Alegre, 2013.

FOX, R. W.; MCDONALD A.T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7a Edição, Rio de Janeiro: LTC editora Guanabara Dois SA, 1998.