



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

ANÁLISE DA ESTEIRA DE VÓRTICES DO ESCOAMENTO NAS PROXIMIDADES DE DOIS CILINDROS EM UMA CONFIGURAÇÃO LADO-A-LADO

Caroline T. Paulo^{*1}, Bianca H. Souza¹, Suelen M. Melo¹, Reginaldo R.C. Paula¹, Jamily F. Stocco¹

^{*1} Laboratório de Energia – Instituto Federal do Espírito Santo –
Av. Vitória, 1729 Vitória, Espírito Santo, Brasil
correo-e: carolinetpaulo@gmail.com

RESUMO

A interação entre as esteiras que se forma atrás de cilindros circulares é de grande importância nos estudos da dinâmica de fluidos, devido as suas várias aplicações práticas, tais como trocadores de calor, torres de resfriamento, estruturas de pontes, chaminés e *offshore* [1]. Quando dois cilindros encontram-se em uma configuração lado-a-lado, dependendo do espaçamento entre eles, o escoamento pode ser caracterizado por três regimes [2]. Primeiro para cilindros muito próximos, comportamento de um único corpo rombudo, o escoamento é periódico e a região de esteira é caracterizada por uma única esteira de vórtices de Kármán. Segundo: cilindros encontram-se mais afastados, tem-se a formação de uma esteira de vórtices *shedding* sincronizados e as esteiras dos cilindros apresentam a mesma frequência. Terceiro regime: fenômeno biestável, tem-se um espaçamento intermediário, que gera um padrão de transição complexo, com regime de esteira assimétrico com vórtices *shedding* sincronizados. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho foi analisar os diferentes padrões do escoamento que se formam na esteira de dois cilindros em uma configuração lado a lado. O padrão do escoamento foi determinado através de simulações numéricas considerando um regime laminar e um turbulento, na qual foi utilizado o modelo de turbulência κ - ϵ padrão. Resultados numéricos foram comparados com experimentos de túnel de vento na qual se utilizou a técnica direta de injeção de fumaça. Os números de Reynolds do escoamento foram de 70 e 879 e com razão de aspecto $1,25 \leq S/D \leq 3,5$, onde S é o espaçamento centro a centro dos cilindros e D é o seu diâmetro.

Palavras Chaves: *Cilindros lado-a-lado, modelagem numérica e física, vórtices shedding, formação de esteiras.*



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUÇÃO

O estudo do escoamento ao redor de cilindros é uma atividade extremamente importante devido às várias aplicações de interesse prático da engenharia, tais como, trocadores de calor, torres de resfriamento, estruturas de pontes, chaminés e *offshore* [1]. O grande interesse neste tipo de escoamento, aliado à sua importância tecnológica, é devido aos vários aspectos importantes que envolvem vários fenômenos da dinâmica de fluidos.

Dentre as características aerodinâmicas do escoamento ao redor de cilindros destacam-se a separação do escoamento, recirculação, vórtices quase-periódicos, frequência de desprendimento de vórtices (vórtices *shedding*) e vórtices induzindo vibrações [3,4]. Três regimes de escoamento nas proximidades de cilindros lado a lado foram propostas por [5,6] e recentemente apresentadas por [7], de acordo com a razão de aspecto na faixa de $1,0 < S/D < 6,0$ e número de Reynolds entre $500 < Re < 3000$: (i) $1,0 \leq S/D \leq 1,2$, os cilindros comportam-se como se fossem um único corpo rombudo; (ii) $1,2 \leq S/D \leq 2,2$, fenômeno do escoamento biestável e (iii) $2,2 \leq S/D \leq 4,5$, escoamento paralelo com vórtices *shedding* sincronizados.

No regime de escoamento $1,0 \leq S/D \leq 1,2$ não são formados vórtices *shedding* entre os cilindros e o desprendimento de vórtices ocorre somente nas camadas de cisalhamento externas dos dois cilindros e conseqüentemente é gerada somente uma esteira de vórtices de Von Kármán [8]. Segundo [9] a frequência de desprendimento de vórtices para este padrão de escoamento é aproximadamente a metade do que a de um único cilindro.

Quando se tem $1,2 \leq S/D \leq 2,2$ o regime de escoamento é caracterizado pela formação de uma esteira larga atrás de um dos cilindros e uma esteira estreita atrás do outro corpo. Devido à presença destas esteiras são geradas duas frequências dominantes de vórtices *shedding*, uma mais alta para a esteira estreita e uma mais baixa para a esteira mais larga. Este fenômeno é denominado de biestável, onde o escoamento que passa entre os cilindros é refletido na direção da esteira mais estreita, porém este desvio sofre uma mudança intermitente sendo orientado ora na direção de um cilindro, ora na direção do outro. Esta é uma propriedade intrínseca do escoamento, é independente do número de Reynolds e não está relacionada a desalinhamentos entre os cilindros ou influências externas [10].

Para $S/D > 2,2$ o padrão biestável desaparece e o escoamento ao redor dos cilindros lado a lado apresenta características do escoamento nas proximidades de dois corpos rombudos isolados, na qual uma interação sincronização é identificada na esteira, na forma de vórtices em oposição de fase [10].



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Na literatura encontram-se vários estudos do escoamento ao redor de cilindros lado a lado. [11] investigaram com o modelo LES (*Large Eddy Simulations*) a formação e convecção de vórtices na esteira para $Re = 750$ e $S/D = 1,7$ e 3 . Para $S/D = 3$ formou-se duas esteiras simétricas atrás dos cilindros. [12] realizaram simulações numéricas para analisarem o padrão do escoamento na esteira de cilindro lado a lado para baixos Reynolds, na faixa $18 \leq Re \leq 100$ e $1,2 \leq S/D \leq 3,0$. Os autores observaram que o padrão na esteira apresentou significativa dependência da razão de aspecto e foi menos sensível em relação ao número de Reynolds. [13] empregaram a técnica PIV para investigarem a formação vórtices *shedding* para o caso de dois cilindros em rotação para $S/D = 1,1$ e $425 \leq Re \leq 1130$. Os resultados mostraram a importância do espaçamento na formação da esteira e dos vórtices *shedding*. [14] apresentaram resultados de simulações numéricas com o modelo de turbulência $\kappa-\omega$ SST (*Shear Stress Transport*) das vibrações induzidas por vórtices no escoamento nas proximidades de dois cilindros lado a lado com diferentes diâmetros. O cilindro de menor diâmetro foi mais afetado pela formação dos vórtices *shedding* do que o cilindro de maior diâmetro.

Embora tenham sido realizados vários estudos do escoamento ao redor de cilindros lado a lado, este fenômeno continua a representar um grande desafio para a engenharia, sendo considerado um clássico problema da mecânica de fluidos [7]. Neste trabalho, o principal objetivo foi investigar experimentalmente e numericamente, respectivamente, os campos instantâneo e médio do escoamento nas proximidades de dois cilindros em uma configuração lado-a-lado. Para o estudo experimental foram utilizadas as técnicas de injeção direta de fumaça e plano de laser de luz verde. Na modelagem numérica foi utilizado o módulo de turbulência $\kappa-\epsilon$ padrão.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Experimentos no Túnel de Vento

A investigação do escoamento do ar ao redor de dois cilindros em configuração lado-a-lado neste trabalho foi realizada em um túnel de vento aerodinâmico de retorno aberto com seção de teste de $(2,0 \times 0,5 \times 0,5)$ m localizado no Laboratório de Energia do IFES, Vitória, Brasil. Foram utilizados dois cilindros idênticos de alumínio com diâmetro $D = 0,032$ m e altura $H = 0,070$ m. Na modelagem física do campo de escoamento considerou-se a seguinte faixa de razão de aspecto: $1,5 \leq S/D \leq 3,5$.

Para visualização do escoamento foi utilizada a técnica de injeção de fumaça com a formação de um plano de laser com auxílio de uma câmera digital (Fujifilm HS 10) usada para a filmagem do



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

escoamento em uma velocidade de 240 frames por segundo (fps). A câmera estava localizada na parte superior da seção de teste. Para mais detalhes desta técnica pesquisar o trabalho [15].

Para o cálculo do número de Reynolds considerou-se uma velocidade característica V_H , medida na altura do cilindro, escala de comprimento característico, a altura H do cilindro e massa específica e viscosidade dinâmica do ar, respectivamente iguais a $1,185 \text{ kg/m}^3$ e $1,82 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$. As velocidades características para $Re = 70$ e $Re = 879$, foram $0,047 \text{ m/s}$ e $0,43 \text{ m/s}$, respectivamente.

2.2 Modelagem e Métodos Numéricos

Neste trabalho foram simulados numericamente os escoamentos laminar e o turbulento com o uso do pacote comercial ANSYS CFX 14.5. Para a modelagem do escoamento turbulento tridimensional ao redor de dois cilindros lado a lado foi utilizado o modelo de turbulência κ - ϵ padrão. As equações governantes utilizadas neste trabalho para solucionar o campo de escoamento tridimensional (3-D) foram as equações da continuidade (Equação 1) e da quantidade de movimento (Equação 2). Considerou-se um escoamento em regime permanente incompressível de um fluido newtoniano com viscosidade constante.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_i} + \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[- \left(\frac{\bar{p}}{\rho} + \frac{2\mu}{3\rho} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} + \frac{\mu_{eff}}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, u'_i e \bar{u}_i são as velocidades turbulentas e médias na direção x_i ($i = 1, 2, 3$), μ_{eff} é a viscosidade efetiva, \bar{p} é a flutuação de pressão, $\overline{u'_i u'_j}$ são os tensores de Reynolds que representam os fluxos de quantidade de movimento.

Foi gerado um domínio computacional 3D com dimensões de dois cilindros imersos de forma simétrica em relação ao eixo central. Os centros dos cilindros estavam localizados a $10D$ do contorno de entrada e $20,25D$ do contorno de saída, conforme mostra a Figura 1.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

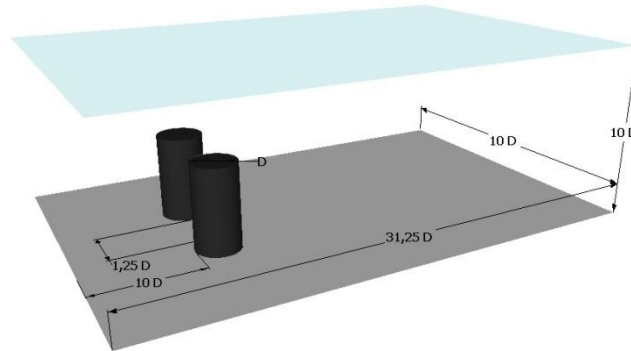


Figura 1 Representação esquemática da localização dos cilindros no domínio computacional 3-D.

2.3 Condições de Contorno

A condição de contorno de entrada foi velocidade normal ao plano ($u = U$, $v = 0$ e $w = 0$) sendo que para o regime laminar utilizou-se $U_l = 0,047$ m/s e no regime turbulento $U_t = 0,43$ m/s. Além disso, no regime turbulento considerou-se $\kappa = 0,000377$ m/s² e $\varepsilon = 0,0000225$ m/s³, onde κ é a energia cinética turbulenta e ε é sua taxa de dissipação. A base do domínio computacional e as superfícies do cilindro considerou-se a condição de contorno de parede com não deslizamento. As superfícies laterais paralelas à direção do escoamento principal e o topo do domínio computacional foram consideradas paredes com a condição de *free slip*. Na saída foi empregada a condição de gradiente nulo de pressão $\partial p / \partial n = 0$.

3. RESULTADOS

3.1 Escoamento laminar

As Figuras 2-6 mostram os resultados das simulações físicas e numéricas do escoamento laminar para $1,25 \leq S/D \leq 3,5$ e $Re = 70$. Na Figura 2, para $S/D = 1,25$, os resultados das simulações físicas e numéricas sugerem que o escoamento apresentou características de um escoamento ao redor de um único corpo rombudo, na qual ocorreu o desprendimento de vórtices nas camadas de cisalhamento mais externas. Não foi observada a geração de vórtices shedding nas camadas cisalhantes internas devido a proximidade dos cilindros. Na Figura 2, (a) observa-se a formação de uma região de esteira próxima assimétrica, entretanto os resultados das simulações numéricas



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

mostram a formação de uma única esteira que foi caracterizada por duas zonas de recirculações simétricas, Figura 2 (b).

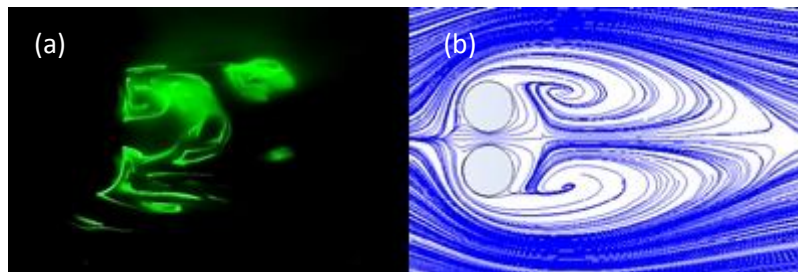


Figura 2 Visualização do escoamento ao redor de dois cilindros em configuração lado-a-lado para $Re=70$ e $S/D=1,25$: (a) simulação física e (b) simulação numérica.

Nas Figuras 3 (a) e 4 (a) para $1,5 \leq S/D \leq 2,0$ ocorreu a formação de duas esteiras imediatamente atrás de cada um dos cilindros. Os resultados dos experimentos de túnel de vento mostram a formação de uma esteira mais larga e uma esteira mais estreita, na qual o escoamento sofreu um desvio em direção a esteira mais estreita. Este comportamento é característico do escoamento biestável, na qual o escoamento desviado sofre deflexões intermitentes, ou seja, ora orienta-se na direção da esteira de um cilindro, ora na direção da esteira do outro corpo, conforme [7]. Os resultados das simulações numéricas mostraram a formação de duas regiões de esteiras próximas, que apresentaram duas zonas de recirculações aproximadamente simétricas, Figuras 3 (b) e 4 (b).

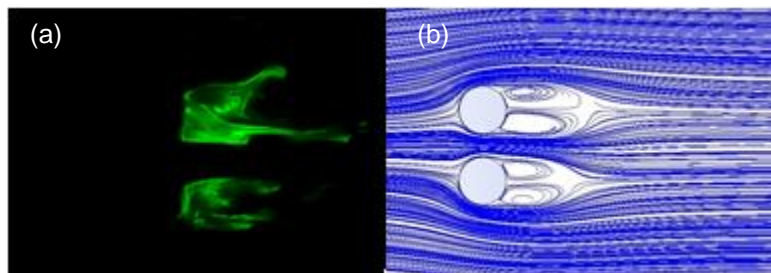


Figura 3 Visualização do escoamento ao redor de dois cilindros em configuração lado-a-lado para $Re=70$ e $S/D=1,5$: (a) simulação física e (b) simulação numérica.

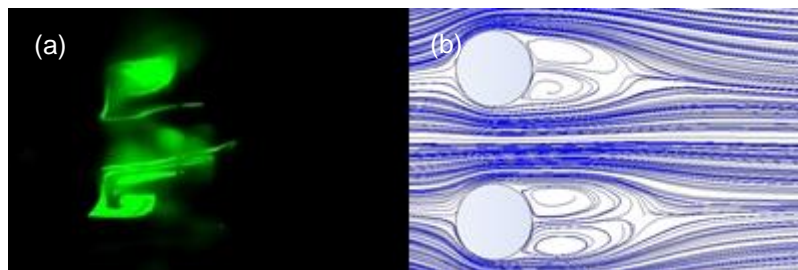


Figura 4 Visualização do escoamento ao redor de dois cilindros em configuração lado-a-lado para $Re=70$ e $S/D=2,0$: (a) simulação física e (b) simulação numérica.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Para $S/D \geq 3,0$ os resultados da visualização experimental mostram que o escoamento ocorreu na direção principal e apresentou características de escoamento ao redor de corpos rombudos isolados, conforme mostram as Figuras 5 (a) e 6 (a). Neste caso, ocorreu a formação de duas esteiras de Von Kármán paralelas e com o desprendimento de vórtices das superfícies internas e externas dos dois cilindros. Os resultados das simulações numéricas também mostram a formação de duas zonas de recirculação atrás de cada cilindro, veja Figuras 5 (b) e 6 (b).

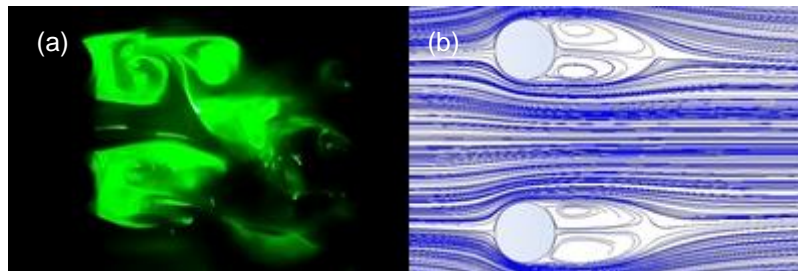


Figura 5 Visualização do escoamento ao redor de dois cilindros em configuração lado-a-lado para $Re=70$ e $S/D=3,0$: (a) simulação física e (b) simulação numérica.

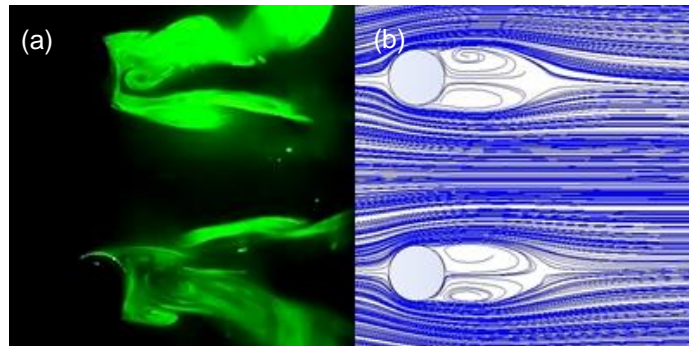


Figura 6 Visualização do escoamento ao redor de dois cilindros em configuração lado-a-lado para $Re=70$ e $S/D=3,5$: (a) simulação física e (b) simulação numérica.

3.2 Escoamento Turbulento

As Figuras 7-11 mostram os resultados das simulações físicas e numéricas do escoamento turbulento com o modelo de turbulência $\kappa\text{-}\epsilon$ padrão para $1,25 \leq S/D \leq 3,5$. Nas Figuras 7(a)-9(a), os resultados das simulações físicas do escoamento nas proximidades dos dois cilindros lado a lado apresentam características de um regime com significativa interferência entre as esteiras dos dois cilindros. Para $S/D=1,25$, os resultados experimentais sugerem que ocorreu a formação de uma única esteira, na qual pode ser observado um desprendimento de vórtices nas superfícies mais externas dos cilindros, veja Figura 7(a).



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

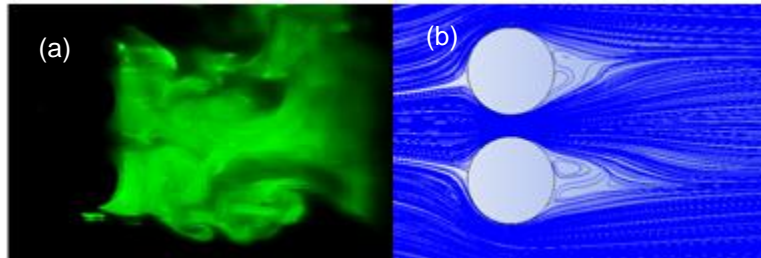


Figura 7 Visualização do escoamento ao redor de dois cilindros em configuração lado-a-lado para $Re=879$ e $S/D=1,25$: (a) simulação física e (b) simulação numérica.

Nas Figuras 8(a) e 9(a), os resultados da visualização experimental mostram a formação de uma esteira mais larga e uma esteira mais estreita, comportamento característico do escoamento biestável [7]. Neste caso ocorreu a formação de vórtices shedding com maior escala de comprimento na esteira mais estreita e menor escala de comprimento na esteira mais larga, veja Figuras 8(a) e 9(a).

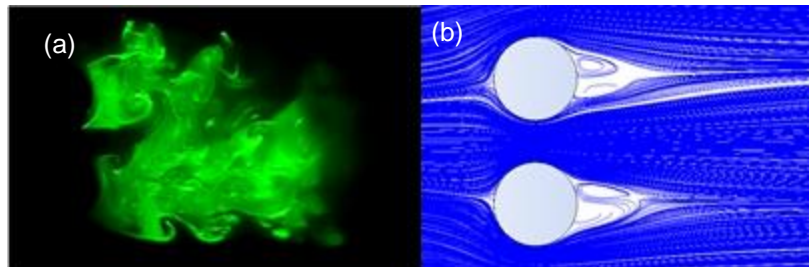


Figura 8 Visualização do escoamento ao redor de dois cilindros em configuração lado-a-lado para $Re=879$ e $S/D=1,5$: (a) simulação física e (b) simulação numérica.

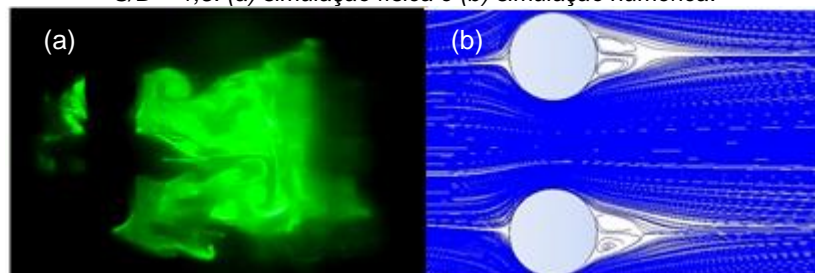


Figura 9 Visualização do escoamento ao redor de dois cilindros em configuração lado-a-lado para $Re=879$ e $S/D=2,0$: (a) simulação física e (b) simulação numérica.

Para razões de aspecto mais altas, $S/D > 3,0$, observou-se a formação de duas esteiras de Von Kármán paralelas e independentes resultantes da formação de vórtices *shedding* de cilindros que se comportam como corpos rombudos isolados, veja Figuras 10(a) e 11(b).



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

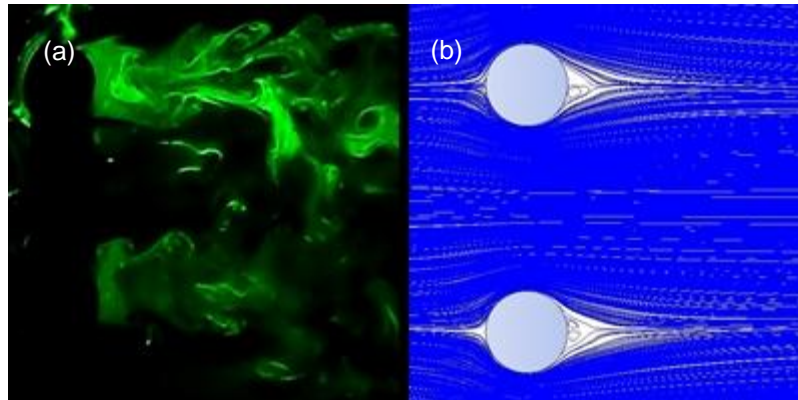


Figura 10 Visualización do escoamento ao redor de dois cilindros em configuração lado-a-lado para $Re=879$ e $S/D=3,0$: (a) simulação física e (b) simulação numérica.

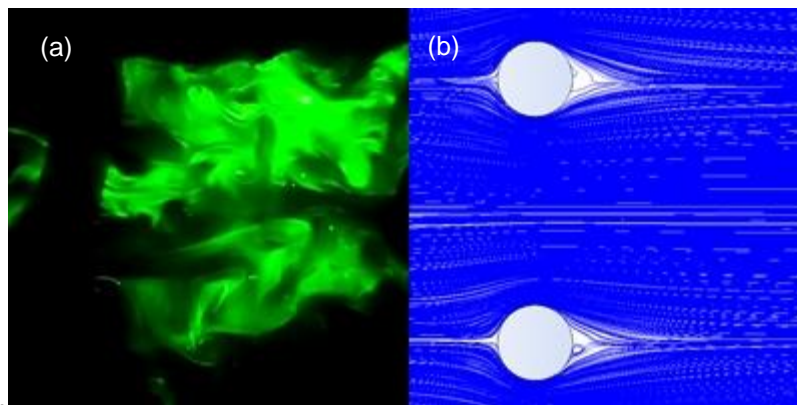


Figura 11 Visualização do escoamento ao redor de dois cilindros em configuração lado-a-lado para $Re=879$ e $S/D=3,5$: (a) simulação física e (b) simulação numérica.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados experimentos no túnel de vento e simulações numéricas dos regimes de escoamentos laminares e turbulentos nas proximidades de dois cilindros lado-a-lado. Resultados experimentais dos escoamentos laminar e turbulento para $S/D=1,25$ apresentaram características de um escoamento ao redor de um único corpo rombudo. Na faixa de $1,5 < S/D < 2,0$ foi observado o regime biestável e $S/D > 3,0$, foi observado a formação de duas esteiras paralelas e independentes. Nas simulações físicas, o desprendimento de vórtices das superfícies dos cilindros formando a esteira de vórtices de Kármán foi observado para $S/D \cong 2,0$. Os resultados das simulações numéricas com o modelo de turbulência $\kappa-\epsilon$ padrão não apresentaram concordância com os dados experimentais, pois este não capturou a frequência de vórtices *shedding*. Este resultado já era esperado, devido à escolha de um modelo RANS e ter considerado um regime permanente do escoamento. Portanto, a abordagem experimental permitiu uma melhor



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

compreensão da complexa estrutura do campo de escoamento ao redor de dois cilindros a lado a lado. Porém, em trabalhos futuros pretende-se realizar a modelagem com modelos de turbulência mais robustos e simular o escoamento em regime transiente a fim de se obter resultados numéricos mais exatos.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Oruç, V., Akar, A., Akilli, H., Sahin, B. Suppression of asymmetric flow behavior downstream of two side-by-side circular cylinders with a splitter plate in shallow water. *Measurement*, **Vol.** 46, 442-455, 2013.
- [2] Yoon, H.S e outros, Flow characteristics of two rotating side-by-side circular cylinder, *Computers & Fluids*, **Vol.** 38, 466-474, 2009.
- [3] Alam, M.M., Zhou, Y., Flow around two side-by-side closely spaced circular cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, **Vol.** 23, pp. 799-805, 2003.
- [4] Wang X.K., Gong, K., Liu H., Zhang J.-X., Tan, S.K. Flow around four cylinders arranged in a square configuration, *Journal of Fluids and Structures*, **Vol.** 43 pp. 179–199, 2013.
- [5] Ishigai, S., Nishikawa, E., Nishimura, E., Cho, K., Experimental study of structure of gas flow in tube banks axes normal to flow. *Bulletin of the Japan Society of Mechanic Engineering*, **Vol.** 15, pp. 949-956, 1972.
- [6] Zdravkovich, M.M., Flow around circular cylinders. *Fundamentals*, Vol. 1, Oxford Science Publications. 1977
- [7] D. Sumner, S.S.T. Wong, S.J. Price, M.P. Paidoussis, Fluid behavior of side-by-side circular cylinders in steady cross-flow, *Journal of Fluid Structures*, **Vol.** 13 pp. 309-338, 1999.
- [8] Oruç, V., Akar, M.A., Akili, H., Sahin, B., Suppression of asymmetric flow behavior downstream of two side-by-side circular cylinders with a splitter plate I shallow water, *Measurement*, **Vol.** 45, pp. 442-455, 2013.

[9] S.J. Xu, Y. Zhou, R.M.C. So, Reynolds number effects on the flow structure behind two side-by-side cylinders, *Phys. Fluids*, Vol. 15, pp. 1214-1219, 2003. .

[10] Paula, A.V., Horszczaruk, R.S.S., Möller, S.V., Analysis of the Bistability Phenomenon in two Cylinders Side-by-side by Means of Wavelet and Hilbert-Huang Transforms, *Anais da 8o Escola de Primavera de Transição e Turbulência*, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

[11] CHEN L., TU J. Y. and YEOH G. H. Numerical simulation of turbulent wake flows behind two side-by-side cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, **Vol.** 18(3-4): 387-403, 2003.

[12] LIU Kun, MA Dong-jun and SUN De-jun et al. Wake patterns of flow past a pair of circular cylinders in side-by-side arrangements at low Reynolds numbers. *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, **Vol.** 19(6): 690-697, 2007

[13] GUO Xiao-hui, LIN Jian-zhong and TU Cheng-xu et al. Flow past two rotating circular cylinders in a side-by-side arrangement. *Journal of Hydrodynamics*, **Vol.** 21(2), pp. 143-151, 2009

[14] Rahmanian, M., Cheng, L., Zhao, M., Zhou, T., Vortex induced vibration and vortex shedding characteristics of two side-by-side circular cylinders of different diameters in close proximity in steady flow. *Journal of Fluids and Structures*, **Vol.** 48, pp. 260-279, 2014.

[15] Queiroz, J.C.F., Souza, B.H, Matta, D.Z., Paula, R.R.C., Gomes, M.S.P., Flow visualization o the wind field in urban street canyons with different building architecture, *Anais do 22nd Internacional Congress of Mechanical Engineering (COBEM2013)*, Ribeirão Preto, SP, Brazil, 2013.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e do Instituto Federal do Espírito Santo, Ifes, Campus Vitória.