



# 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 NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO PADRÃO DO ESCOAMENTO NA ESTEIRA DE DOIS CILINDROS EM UMA CONFIGURAÇÃO EM LINHA

Bianca H. Souza<sup>\*1</sup>, João C. F. Queiroz<sup>1</sup>, Caroline. T. Paulo<sup>1</sup>, Reginaldo R.C. Paula<sup>1</sup> e Carolina L. Guimarães<sup>1</sup>

<sup>\*1</sup> Laboratório de Energia – Instituto Federal do Espírito Santo  
Av. Vitória, 1729 Vitória, Espírito Santo, Brasil  
correo-e: biancahulles@hotmail.com

### RESUMO

O escoamento cruzado sobre cilindros tem recebido muita atenção devido a sua importância em varias aplicações da engenharia, tais como escoamento nas proximidades de estruturas de pontes, chaminés, edifícios, plataformas *offshore*, trocadores de calor e linhas de transmissão de energia [1]. O escoamento nas vizinhanças de dois cilindros em uma configuração em linha é caracterizado por seis diferentes regimes de interferência no espaçamento entre eles, na qual se tem a geração de uma camada cisalhante livre, separação do escoamento no cilindro a montante e possível recolamento do escoamento nas superfícies do cilindro a jusante, recirculação com vórtices simétricos e formação de vórtices *shedding* [2]. O objetivo deste trabalho foi investigar numericamente e experimentalmente o padrão do escoamento nas proximidades de dois cilindros em uma configuração em linha. Os efeitos de interação entre esteiras foram investigados com o uso do pacote comercial CFX 14.5. Foi analisado o regime de escoamento laminar para baixos Reynolds. Além disso, utilizo-se modelo de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  padrão para o escoamento turbulento. Os resultados numéricos do campo médio numéricos foram comparados com simulações físicas em túnel de vento do campo instantâneo na qual foram utilizadas as técnicas de injeção de fumaça e iluminação com um plano de laser. Ambas as simulações ocorreram para números de Reynolds igual a 70 e 879 e razões de aspecto  $S/D = 1,5; 2,0; 3,0; 4,0$  e  $5,0$  onde  $S$  é a distância centro a centro e  $D$  é o diâmetro dos cilindros. No regime laminar os resultados das predições numéricas apresentaram boa concordância com a visualização experimental. Os resultados do campo instantâneo do escoamento turbulento mostraram que para  $S/D < 4,0$  uma separação do escoamento no cilindro a montante e o mesmo recolou nas superfícies do cilindro a jusante. A formação de vórtices *shedding* ocorreu somente para  $S/D \geq 4,0$ .

**Palavras chaves:** *escoamento nas proximidades de cilindros, modelagem física e numérica, cilindros em configuração em linha.*



# 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 escoamento ao redor de corpos cilíndricos alinhados vem despertando a atenção de engenheiros por várias décadas [1]. Esse mecanismo tem sido muito estudado devido a sua larga aplicação nos campos da engenharia, tais como linhas e torres de transmissão de energia, trocadores de calor, chaminés, plataformas de prospecção de petróleo (*offshore*) e equipamentos de usinas nucleares [2,3].

Uma excelente revisão dos seis regimes de escoamento ao redor de cilindros alinhados foi apresentada por [4] com base nos padrões propostos por [5,6]. Estes seis regimes podem ser identificados de acordo com o número de Reynolds e o espaçamento,  $S/D$ , entre eles: (a) uma camada cisalhante livre originada pela separação do escoamento na superfície do cilindro a montante sem que haja recolamento na superfície do cilindro a jusante. Apenas uma esteira é formada; (b) a camada cisalhante gerada pelo cilindro a montante recola na superfície do cilindro a jusante, porém sem formação de vórtices entre os cilindros. Também somente uma esteira é formada; (c) no espaço entre os cilindros pode ocorrer uma recirculação com vórtices simétricos; (d) os vórtices simétricos podem tornar-se instáveis e perturbar a região incidente próxima ao cilindro a jusante; (e) a camada cisalhante originada pelo cilindro a montante pode terminar muito próxima à superfície do cilindro a jusante. Esse regime é um estado entre os regimes (d) e (f), por isso pode ser chamado de bi-estável e (f) a região de esteira próxima do primeiro cilindro termina sem interagir com a região incidente do cilindro a jusante. Neste caso, há a formação dos vórtices *shedding* no espaçamento entre os cilindros.

Um completo entendimento do campo de escoamento ao redor de cilindros envolve a separação do escoamento, formação de camada limite, camada limite cisalhante e interferência entre esteiras, bem como a dinâmica de estruturas vorticosas, tais como os vórtices *shedding* de Von Kármán [7]. A fim de obter uma melhor compreensão do comportamento do escoamento ao redor de cilindros alinhados, na literatura encontram-se vários estudos que utilizaram experimentos de túnel de vento, tanques de água e modelagem numérica [8-11].

Realizaram experimentos de túnel de vento para investigarem o controle vórtices *shedding* nas proximidades de dois cilindros alinhados. O objetivo foi reduzir os vórtices *shedding* e excitações turbulentas a jusante dos cilindros [12]. Realizaram simulações numéricas e análise de estabilidade para investigarem a estabilidade do escoamento permanente e transição para escoamento periódico transiente bidimensional para dois cilindros alinhados [13].



# 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

Estudaram os vórtices *shedding* e interferência do escoamento bidimensional nas proximidades de cilindros alinhados e lado a lado com o uso de métodos de elementos finitos para números de Reynolds na faixa de 100 e 200 e  $1,5 < S/D < 4$  [14]. Simularam o escoamento nas proximidades de dois cilindros alinhados com número de Reynolds igual a 1500 e  $S/D = 2$  com o uso de Simulações de Grandes Escalas. Os resultados foram comparados com medições em um túnel de água com a técnica de Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV por *particle image velocimetry*). Os resultados para este espaçamento entre os cilindros não mostrou a formação de vórtices *shedding* e apresentaram boa concordância com os dados experimentais [15].

O objetivo principal deste trabalho foi investigar os campos instantâneo e médio do padrão do escoamento nas proximidades de dois cilindros alinhados. Foram realizadas simulações físicas em túnel de vento e numéricas com o uso do pacote comercial ANSYS CFX 14.5. Analisaram-se diferentes razões de aspecto,  $1,5 < S/D < 5,0$  e considerou-se um escoamento laminar para  $Re = 70$  e turbulento para  $Re = 879$ .

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 – Experimentos de túnel de vento

Os estudos experimentais do escoamento do ar ao redor de cilindros em configuração linha deste trabalho foram realizados em um túnel de vento aerodinâmico de retorno aberto com seção de teste de (2,0 x 0,5 x 0,5) m localizado no Laboratório de Energia do IFES, Vitória, Brasil. Foram utilizados dois cilindros idênticos feitos de alumínio com diâmetro,  $D = 0,032$  m e altura  $H = 0,070$  m. As razões de aspecto analisadas foram as seguintes:  $S/D = 1,5; 2,0; 3,0; 4,0$  e  $5,0$ .

Para visualização do escoamento foram utilizadas as técnicas de injeção direta de fumaça e plano de luz laser verde (500 mW,  $\lambda = 532$  nm). Os registros das imagens foram obtidos com uma câmera digital operando com velocidade de 240 fps (*frames per second*), maiores detalhes dos procedimentos experimentais podem ser encontrados em [16].

Para o cálculo do número de Reynolds considerou-se como velocidade característica,  $U$ , a velocidade medida na altura do cilindro e como escala de comprimento característico, o diâmetro  $D$  do cilindro. A massa específica e viscosidade dinâmica do ar foram respectivamente iguais a  $1,185$  kg/m<sup>3</sup> e  $1,82 \times 10^{-5}$  kg/m<sup>2</sup>.s. A velocidade característica para  $Re = 70$  e  $Re = 879$  foi respectivamente de  $0,047$  m/s e  $0,430$  m/s, aproximadamente.



# 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

## 2.1 – Modelagem Numérica

No presente trabalho, considerou-se um escoamento de fluido incompressível, viscosidade constante e em regime permanente. As equações governantes do escoamento consideradas foram, as equações da continuidade (Equação 1) e conservação da quantidade de movimento (Equação 2), dadas, respectivamente por:

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

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

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

## 2.2 Métodos numéricos

O pacote comercial da dinâmica dos fluidos computacional ANSYS CFX 14.5 foi usado para calcular o perfil de escoamento tridimensional, 3-D, ao redor do par de cilindros. Para o caso do escoamento turbulento utilizou-se o modelo de turbulência de duas equações  $\kappa$ - $\epsilon$  padrão. A Figura 1 apresenta as dimensões do domínio computacional 3-D implementado neste trabalho, as quais foram  $30D$  (comprimento)  $\times$   $10D$  (largura)  $\times$   $10D$  (altura), onde  $D$  é o diâmetro do cilindro. Foram realizados procedimentos de validação e testes de convergência de malhas com o programa CFX Mesh e a malha final tinha um total de 515 693 elementos e 866 422 número de nós. A Figura 1 apresenta também uma das malhas utilizadas nas simulações numéricas do campo de escoamento.

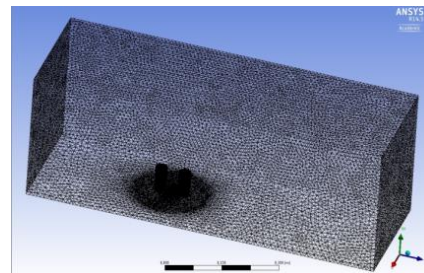
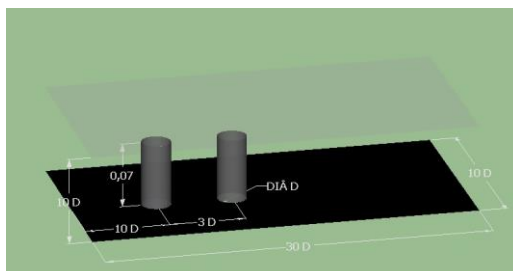


Figura 1 – Representação esquemática do domínio computacional 3-D e suas dimensões.

### 2.3 Condições de contorno

Na entrada do domínio computacional foram inseridas as condições de contorno de Dirichlet. Para o escoamento laminar adotou-se:  $u = U$ ,  $v = w = 0$  e para o escoamento turbulento:  $u = U$ ,  $v = w = 0$ ;  $\kappa_{ent} = (3/2) \rho U^2$  e  $\varepsilon = \rho C_\mu (\kappa^2 / \mu_t)$  com  $\mu_t = 1000 l \cdot \mu$ , onde,  $C_\mu = 0,09$  é uma constante,  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta e  $l = 0,037$  é a intensidade da turbulência. As velocidades de entrada para os regimes laminar e turbulento foram respectivamente,  $U_l = 0,05$  m/s e  $U_t = 0,43$  m/s.

Na saída foram adotadas as condições de contorno de Neumann, isto é,  $\partial p / \partial n = 0$ , onde  $p$  é a pressão. No topo e nas superfícies laterais do domínio computacional aplicou-se a condição de contorno de parede livre. Nas superfícies dos cilindros e no plano horizontal  $xy$  com  $z = 0$  utilizou-se a condição de contorno de parede com não deslizamento.

## 3. RESULTADOS

Neste trabalho foram realizadas simulações físicas do campo instantâneo e numéricas do campo médio com o uso de experimentos de túnel de vento e da dinâmica dos fluidos computacional, para  $Re = 70$  e  $870$  e  $1,5 < S/D < 5,0$ .

### 3.1 Escoamento laminar

As Figuras 2-5 apresentam os resultados da visualização do campo instantâneo (experimental) e médio (predições numéricas) o escoamento laminar com  $Re = 70$  e  $S/D = 1,5; 2,0; 3,0; 4,0$  e  $5,0$ . Na Figura 2, para  $S/D = 1,5$ , entre os cilindros a camada limite cisalhante do cilindro a montante foi capturada pelo cilindro a jusante e que também não ocorreu à formação de vórtices. Os resultados da Figura 3 mostram que a camada cisalhante do primeiro cilindro se enrolou bem próxima da superfície do segundo cilindro, caracterizado como um regime de interferência bi-estável [3-5]. Nas Figuras 4-6 para  $S/D \geq 3,0$  os resultados mostram que a região de esteira próxima do cilindro a montante termina antes da região frontal do cilindro a jusante. Os regimes de interferência esteira devido os cilindros estarem alinhados estão de acordo com os estudos realizados por [3-5]. Os resultados numéricos apresentaram boa concordância com as visualizações experimentais.



# 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

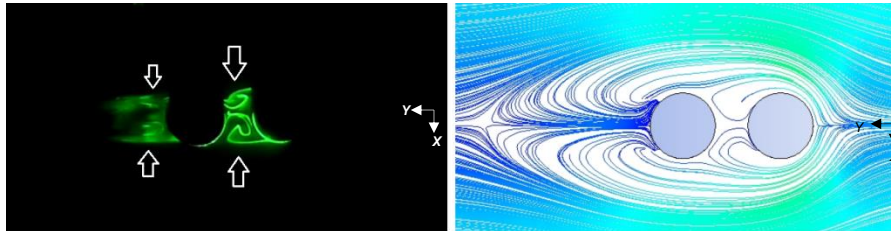


Figura 2. Resultados experimentais (esquerda) e numéricos (direita) do escoamento ao redor de um par de cilindros para  $Re = 70$  e  $S/D = 1,5$ .

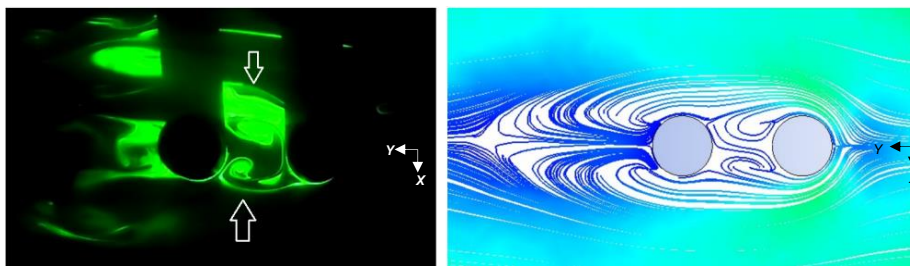


Figura 3. Resultados experimentais (esquerda) e numéricos (direita) do escoamento ao redor de um par de cilindros para  $Re = 70$  e  $S/D = 2,0$ .

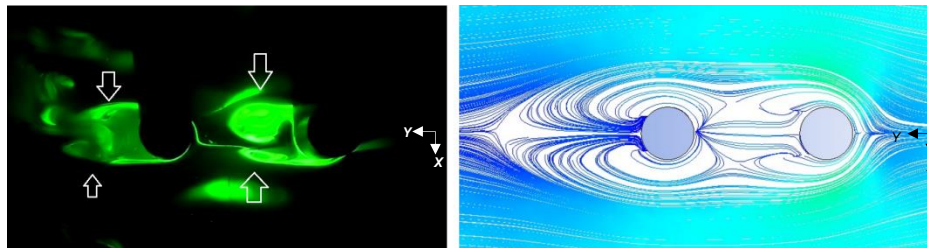


Figura 4. Resultados experimentais (esquerda) e numéricos (direita) do escoamento ao redor de um par de cilindros para  $Re = 70$  e  $S/D = 3,0$ .

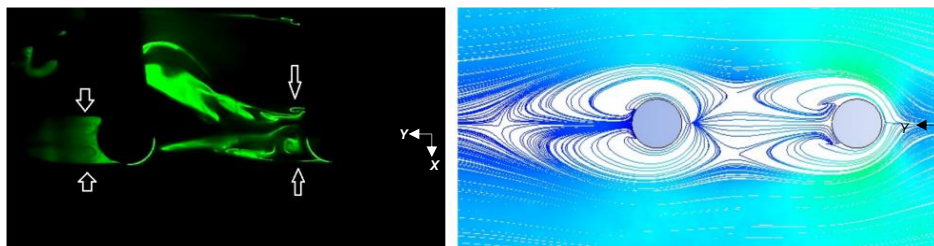


Figura 5. Resultados experimentais (esquerda) e numéricos (direita) do escoamento ao redor de um par de cilindros para  $Re = 70$  e  $S/D = 4,0$ .

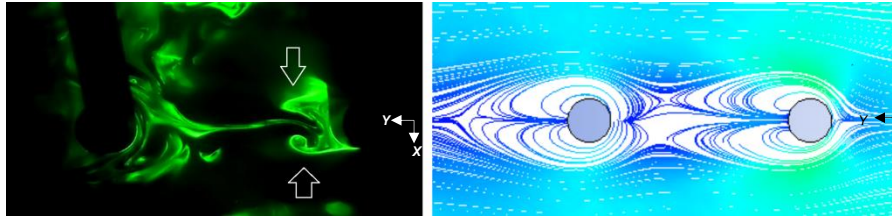


Figura 6. Resultados experimentais (esquerda) e numéricos (direita) do escoamento ao redor de um par de cilindros para  $Re = 70$  e  $S/D = 5,0$ .

### 3.2 Escoamento Turbulento

As Figuras 7-8 apresentam os resultados da visualização do campo instantâneo (experimental) e médio (predições numéricas) para o escoamento turbulento com  $Re = 879$  e  $S/D = 1,5$  e  $2,0$ . Os resultados das Figuras 7-8 mostram um descolamento da camada limite da superfície do cilindro a montante e que esta se adere na superfície do cilindro a jusante. Entre os cilindros não ocorreu a formação de vórtices *shedding*. Os resultados da simulação numérica com o modelo de turbulência  $\kappa-\epsilon$  padrão mostraram a formação de duas regiões de recirculação na esteira do segundo cilindro.

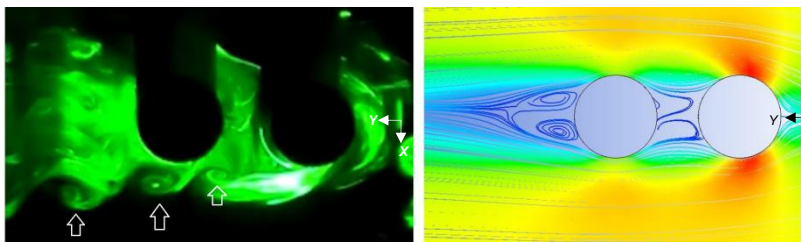


Figura 7. Resultados experimentais (esquerda) e numéricos (direita) do escoamento ao redor de um par de cilindros para  $Re = 879$  e  $S/D = 1,5$ .

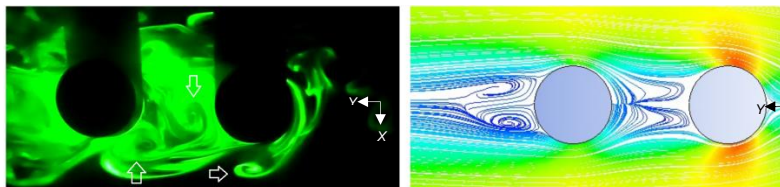


Figura 8. Resultados experimentais (esquerda) e numéricos (direita) do escoamento ao redor de um par de cilindros para  $Re = 879$  e  $S/D = 2,0$ .



# 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

As Figuras 9-11 apresentam os resultados da visualização do campo instantâneo (experimental) e médio (predições numéricas) para o escoamento turbulento com  $Re = 879$  e  $S/D = 3,0$ ,  $4,0$  e  $5,0$ . Para  $S/D = 3,0$  os resultados mostram que a região de esteira do cilindro a montante termina antes da região incidente do cilindro a jusante, com a formação de duas regiões de recirculação entre eles. Também para este caso não foi observada formação de vórtices *shedding*. Nas Figuras 10 e 11 os resultados experimentais do campo instantâneo mostram a formação do desprendimento de vórtices da superfície localizada na esteira do primeiro cilindro. Porém, os resultados das predições numéricas do campo médio falharam ao capturar este comportamento. Este comportamento já era esperado devido à utilização de um modelo de RANS e também ter simulado o escoamento em regime permanente.

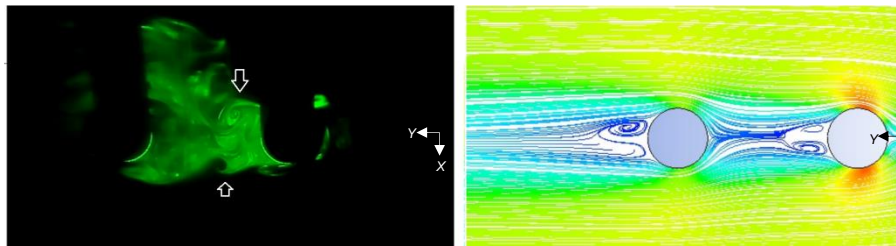


Figura 9. Resultados experimentais (esquerda) e numéricos (direita) do escoamento ao redor de um par de cilindros para  $Re = 879$  e  $S/D = 3,0$ .

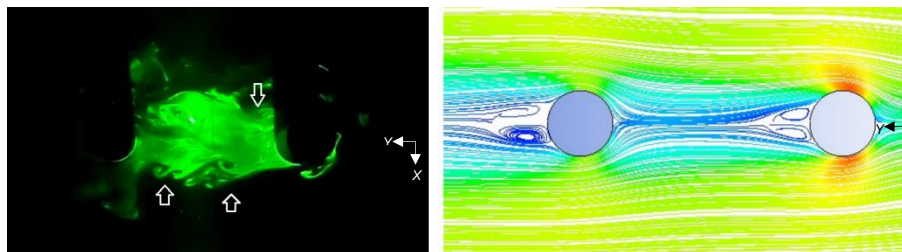


Figura 10. Resultados experimentais (esquerda) e numéricos (direita) do escoamento ao redor de um par de cilindros para  $Re = 879$  e  $S/D = 4,0$ .

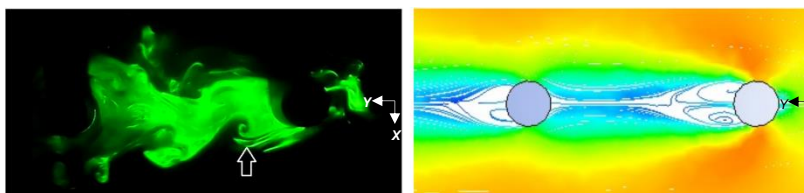


Figura 11. Resultados experimentais (esquerda) e numéricos (direita) do escoamento ao redor de um par de cilindros para  $Re = 879$  e  $S/D = 5,0$ .



# 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

## 4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram realizados experimentos de túnel de vento e simulações numéricas dos regimes de escoamentos laminar e turbulento nas proximidades de dois cilindros alinhados. No regime laminar, os resultados de ambas as simulações do campo instantâneo (experimental) e médio (numérica) apresentaram boa concordância, na qual foram observados vários regimes de interferência de esteira reportados na literatura. Os resultados experimentais do escoamento turbulento para o campo instantâneo mostraram que para  $1,5 \leq S/D < 2,0$ , ocorreu uma separação do escoamento da superfície do cilindro a montante e que o mesmo recolou na superfície do cilindro a jusante. Para  $S/D \geq 4$  ocorreu a formação de vórtices shedding entre os cilindros. Entretanto o uso de um modelo RANS em regime permanente falhou em capturar estas estruturas do escoamento nas proximidades de cilindros alinhados.

## 5. REFERÊNCIAS

- [1] G. Palau-Salvador, T. Stoesser, W. Rodi, LES of the flow around two cylinders in tandem, Journal of Fluid and Structures, **Vol.- 24**, pp. 1304-1312, 2008.
- [2] F.J. Huera-Huarte, P.W. Bearman, Vortex and wake-induced vibrations of a tandem arrangement of two flexible circular cylinders with near wake interference, Journal of Fluids and Structures, **Vol.- 27**, pp.193-211, 2011.
- [3] S. Bhattacharyya, S. Dhinakaran, Vortex shedding in shear flow past tandem square cylinders in the vicinity of a plane wall, Journal of Fluid and Structures, **Vol.- 24**, pp. 400-417, 2008.
- [4] B.S. Carmo, J.R. Meneghini, Numerical investigation of the flow around two circular cylinders in tandem, Journal of Fluid and Structures, **Vol.- 22**, pp. 979-988, 2006.
- [5] T. Igarashi, Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem. Bulletin of JSME, **Vol.- 24**, pp. 323–331, 1981.
- [6] M.M. Zdravkovich, The effects of interference between circular cylinders in cross flow. Journal of Fluids and Structures, **Vol. -1**, pp. 239–261, 1987.
- [7] D. Summer, Two circular cylinders in cross-flow: A review, Journal of Fluids and Structures, **Vol. - 26**, pp. 849-899, 2010
- [8] D. Summer, S.J. Price, M.P. Paidoussis, Tandem cylinders in impulsively started flow. Journal of Fluids and Structures **Vol.- 13**, pp.955–965, 1999



# 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

- [9] G.R.S. Assi, J.R. Meneghini, J.A.P. Aranha, P.W. Bearman, E. Casaprima, Experimental investigation of flow-induced vibration interference between two circular cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, **Vol.**-22, pp. 819–82, 2006;
- [10] D.B Ghadiri, M.H. Sarvghad, J.H. Hourii, Numerical Simulation of Flow over Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement, *Journal of Hydrodynamics*, **Vol.**- 23(1), pp. 114-126, 2011.
- [11] P.J.S. Jarbado, Transição na Esteria de Dois Cilindros Lada a Lado, Dissertação de Doutorado, USP, São Paulo, SP, 2013.
- [12] B.S. Carmo, On Wake Interference in the Flow around Two Circular Cylinders: Direct Stability Analysis and Flow-Induced Vibrations, Thesis of Doctor, Philosophy of Imperial College London, England, 2009.
- [13] J. Mizushima, e N. Suehiro, Investigated the transition between steady and time-periodic flow for two circular cylinders in tandem by means of numerical simulation and stability analysis, *Physics of Fluids*, **Vol.**-17 (10), pp. 104-107, 2005.
- [14] J.R. Meneghini, F. Saltara, C.L.R. Siqueira, J.A. Ferrari Jr, Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements, *Journal of Fluids and Structures*, **Vol.**-15, pp. 327–350, 2001.
- [15] G. Palau-Salvador, T. Stoesser, W. Rodi, Leso f the flow around two cylinders in tandem, *Journal of Fluids and Structures*, **Vol.**- 24, pp. 1304-1312, 2008.
- [16] B.H. Souza, R.R.C. Paula, M.S.P. Gomes, F.C. Cezana, M.P. Brito, 22nd International Congress of Mechanical Engineering, COBEM, The Interference Effect of Roof Profile on Wind Fields of Industrial Buildings, Ribeirão Preto, São Paulo, 2013.

## Agradecimientos

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).