



## VISUALIZAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE ESTEIRAS E DO ESCOAMENTO BIESTÁVEL SOBRE CILINDROS LADO A LADO

José Leandro Cardoso Rivera Vila<sup>1</sup>  
Pedro Paulo Silva de Almeida<sup>2</sup>  
Jhon Nero Vaz Goulart<sup>3</sup>  
Tiago de Melo<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup>Centro Universitário do Distrito Federal – UDF, Brasília-DF, Brasil

<sup>3</sup>Group of Experimental and Computational Mechanics-GMEC, University of Brasilia, Gama, 72.405-610, Brasil  
<sup>1</sup>jl.vila@hotmail.com, <sup>2</sup>almeidappsa@gmail.com, <sup>3</sup>jvazgoulart@gmail.com, <sup>4</sup>tiago.melomec@gmail.com

**Resumo.** Este trabalho investiga as topologias de esteiras turbulentas atrás de dois cilindros circulares lado a lado, assim como suas interações entre esteira estreita (NW-narrow wake) e esteira larga (WW-wide wake), e trata de quantificar a distribuição de pressão ao redor dos cilindros e conseqüentemente os pontos de descolamento da camada limite e supressão de vórtices para uma faixa de Reynolds subcrítico de  $4.25 \times 10^3$  a  $1.78 \times 10^4$ . As visualizações do escoamento foram conduzidas em um canal de água, já as medições de pressão e vorticidade foram realizadas com ar em um canal aerodinâmico, onde a intensidade de turbulência foi mantida abaixo de 3%. A técnica de visualização utilizada foi a dye wash com nanquim. Os sinais de pressão foram medidos com um transdutor piezométrico em volta dos cilindros com um passo de  $10^\circ$  graus. Para os testes três espaçamentos  $p/d$  foram experimentados,  $p/d = 1.26, 2.00$  e  $3.00$ . Pelas visualizações foi possível observar a formação das esteiras assim como sua relação com o espaçamento  $p/d$ , de modo a serem identificadas as NW e WW. As medições de pressão identificaram os pontos de descolamento da camada limite e de desprendimento de vórtices, enquanto o número de Strouhal encontrado variou em torno de  $\sim 0.21$ .

**Palavras chave:** Escoamento Turbulento, Cilindros Lado a Lado, Esteira Turbulenta, Biestabilidade, Visualização.

### 1. INTRODUÇÃO

O escoamento sobre cilindros circulares está presente em diversos cenários da engenharia. Cilindros arranjados em pares, linhas e bancos de tubos são encontrados em linhas de transmissão, trocadores de calor, núcleos de reatores nucleares e geradores de fumaça.

A fim de aumentar a compreensão do escoamento ao redor de cilindros circulares, Zukauskas (1972) conduziu uma campanha experimental, seguida dos seus trabalhos posteriores, Zukauskas et al. (1980) e Zukauskas e Katinas (1988). Nestes trabalhos o autor se preocupa em delinear as bases da fluido-dinâmica e da transferência de calor no escoamento estudado em bancos de tubos. Atualmente os trabalhos de Ahamad et al. (2018), Alam et al. (2017), Kim e Alam (2015), Sumner (2010), entre outros, se voltam para as interações entre esteiras à jusante de cilindros em função de sua disposição. Um dos aspectos marcantes do escoamento sobre cilindros circulares são as interações entre esteiras, que por sua vez dependem muito mais da proximidade entre eles do que do número de Reynolds. Tal interação origina duas topologias estáveis que se alternam randomicamente ao longo do tempo, Neumeister et al. (2018). Este fenômeno é chamado de biestabilidade.

O escoamento biestável leva a um escoamento assimétrico à jusante dos cilindros, formando esteiras assimilares (NW-esteira estreita e WW-esteira larga), Fig. 1. As forças aerodinâmicas na superfície dos cilindros e a dinâmica do escoamento são regidas pela topologia de esteira imposta sob cada cilindro (Alam et al., 2003, Kang, 2003, Wang e Zhou, 2005, Giacomello et al., 2006). Estudos numéricos e experimentais têm se direcionado para o estudo da biestabilidade tanto em cilindros lado a lado quanto em bancos de tubos, tal como conduzido pelos autores (Olinto et al., 2006, Olinto et al., 2009, de Paula et al., 2012, 2013 e 2018). Kang (2003), conduziu um estudo numérico para diversos números de Reynolds e razões  $t/d$  ( $t=p/d - 1$ ). Pelos seus resultados o autor identificou seis topologias de esteiras, dependentes da distância entre centros ( $p$ ) e dos respectivos diâmetros ( $d$ ). O autor denota que, para o intervalo de Reynolds estudado, a frequência de desprendimento de vórtices é influenciada principalmente pelo espaçamento  $p/d$  entre cilindros.

Este trabalho investiga as topologias de esteiras à jusante de dois cilindros lado a lado, assim como suas interações, entre NW e WW, e adiante trata de quantificar a distribuição de pressão ao redor dos cilindros e conseqüentemente pontos de descolamento da camada limite e supressão de vórtices, para uma faixa de Reynolds subcrítico de  $4.25 \times 10^3$  a  $1.78 \times 10^4$ . Três razões de espaçamento  $p/d$  foram investigadas,  $p/d = 1.26, 2.00$  e  $3.00$ . A visualização do escoamento foi conduzida utilizando a técnica de dye wash, seguindo o trabalho de Destefani (2016), para observar a formação e desenvolvimento das esteiras turbulentas de modo que posteriormente fossem verificadas suas variáveis. A distribuição

de pressão média em função das posições angulares se apoia nos dados validados para um cilindro isolado, assim como o fator de Strouhal, do qual foi observado que a frequência de supressão de vórtices se indiferente às variações de  $p/d$ , bem próximo à  $\sim 0.21$ .

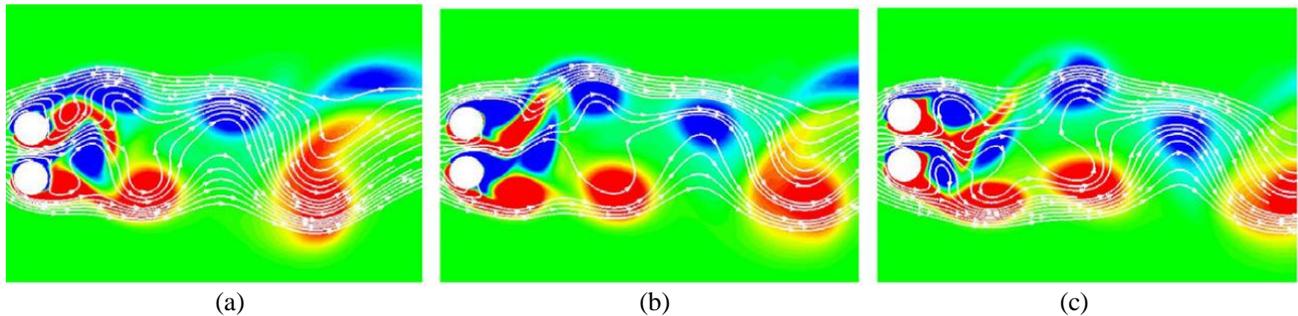


Figura 1. Evolução da esteira turbulenta em dois cilindros lado a lado, ressaltada por contornos de vorticidade e linhas de corrente, iniciando na fase (a) e seguindo a ordem até (b) e (c). Adaptado de Bao et al. (2013).

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para investigar o desenvolvimento das esteiras turbulentas e suas interações, assim como a observação do escoamento biestável, dois sistemas experimentais foram utilizados. A visualização do escoamento foi conduzida em um canal hidrodinâmico de 3 metros e com seção transversal de 250 x 70 mm alimentado por uma bomba com vazão de  $2\text{m}^3/\text{h}$ , induzindo um Reynolds de  $4.25 \times 10^3$  com  $U_\infty = 0.1727$  m/s. A técnica de visualização utilizada foi a de *dye wash*, mesma de Vila et al. (2018), consistindo na injeção de tinta nanquim para ressaltar as linhas de corrente e vorticidades. A injeção de nanquim foi conduzida seguindo Destestefani (2016), onde o autor sugere uma injeção localizada de tinta diretamente na superfície dos cilindros, como visto na Fig. 2 (b).

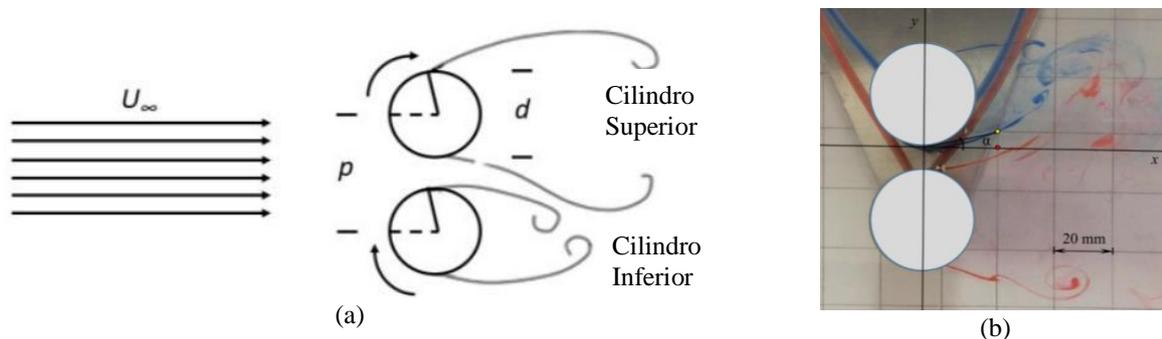


Figura 2. Arranjo dos cilindros lado a lado; (a) esquemático do escoamento incidente sob os cilindros, indicando os locais de medição e sentido de rotação; (b) arranjo de visualização sugerido por Destefani (2016).

Devido a falta de equipamentos para medição de sinais de pressão e velocidade no canal hidrodinâmico, uma segunda etapa do estudo foi conduzida em um canal aerodinâmico de 4 metros com seção transversal de 250 x 150 mm, no qual um tubo de Pitot é posicionado a 1500 mm à jusante da entrada do canal para medição da velocidade de referência  $U_\infty$ , que foi quantificada como igual a 11.45 m/s, produzindo um Reynolds de  $1.78 \times 10^4$ . Os sinais de pressão foram obtidos com passo de  $10^\circ$  graus ao redor dos cilindros, de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . A posição angular de  $0^\circ$  graus é tomada quando coincidente com o ponto de estagnação, que assim como o sentido de rotação são exibidos na Fig. 2 (a). Ambos canais possuem dispositivos de redução da intensidade de turbulência livre, de modo que esta ao alcançar os cilindros é inferior a 3%.

Os sinais de pressão foram adquiridos usando um transdutor piezorresistivo Endevco® 8510B-01, conectado a um amplificador DC modelo 136 da Endevco®. A aquisição de sinais foi conduzida usando uma placa de conversão A/C 8 CH de 12 bits da TSI®. Durante os experimentos os sinais foram obtidos com frequência de aquisição de 4.0 kHz, filtro passa baixa de 2 kHz, e séries temporais de 32.678s.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Visualização das Esteiras Turbulentas

As visualizações de esteiras turbulentas estão dispostas nas Figs. (3 a 6). A figura 3 exibe o desenvolvimento da esteira à jusante de um cilindro isolado em quatro instantes seguidos iniciando em (a)  $t = 0.15s$ . O comportamento demonstrado para os instantes de 0.15 a 0.22 s foi observado ao longo de toda a duração dos experimentos, de modo a ser um comportamento cíclico, onde inicia-se o desenvolvimento da esteira na Fig. 3 (a) e (b), ocorre a formação mais evidente da recirculação na região posterior do cilindro, Fig. 3 (c), e por fim na Fig. 3 (d) após decorridos 7 segundos o braço mais externo da esteira se destaca da região próxima ao cilindro, assim reiniciando o fenômeno visto na Fig. 3 (a). O desenvolvimento observado nos instantes  $t = 0.15$  a  $t = 0.22$  s foi verificado ao longo do experimento, assim como o comprimento de onda da esteira turbulenta à jusante do cilindro isolado.

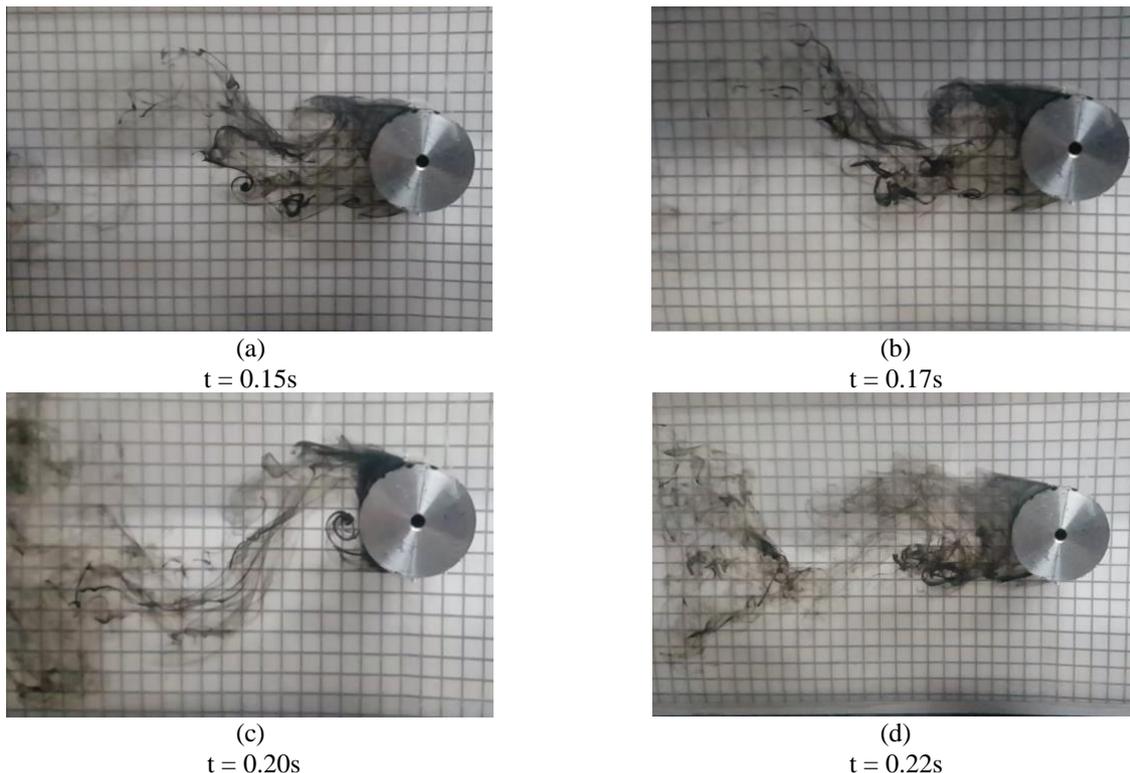


Figura 3. Desenvolvimento da esteira turbulenta para um cilindro isolado nos instantes: (a)  $t = 0.15s$ ; (b)  $t = 0.17s$ ; (c)  $t = 0.20s$ ; (d)  $t = 0.22s$ .

Adiante, foram conduzidas as visualizações das interações entre esteiras à jusante de dois cilindros circulares lado a lado, em função da variação das razões  $p/d$  ( $p/d = 1.26$ ,  $p/d = 2.00$  e  $p/d = 3.00$ ). A figura 4 (a) e (b) corresponde à visualização das esteiras para um  $p/d = 1.26$ , onde é possível observar a ocorrência de esteiras largas e estreitas ocorrendo em cilindros diferentes quando observados instantes também distintos. A figura 4 (a) demonstra a ocorrência de esteira larga (WW) à jusante do cilindro superior e estreita (NW) do cilindro inferior. O contrário é visto para o caso da Fig. 4 (b). Este comportamento confere a troca de modo entre esteiras, ora larga ora estreita, assim como confere a ocorrência do comportamento biestável, uma vez que durante nossos testes as esteiras se alternavam de modo intermitente e randômico. Este fato confere com a literatura, enquanto a biestabilidade é esperada para a faixa de  $1.20 < p/d < 2.00$ .

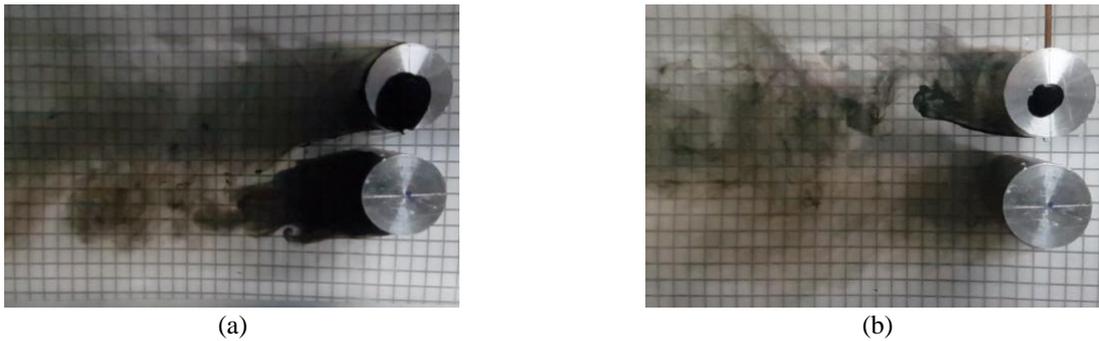


Figura 4. Interações entre esteiras turbulentas para a razão  $p/d = 1.26$ . (a) Cilindro superior: WW, inferior: NW; (b) Cilindro superior: NW, inferior: WW.

A Fig. 5 (a) e (b) exibe os resultados de visualização obtidos para a razão  $p/d = 2.00$ . Nas duas situações apresentadas as esteiras WW/NW estão sob os mesmos respectivos cilindros superior e inferior, o mesmo ocorreu durante nossos testes para este espaçamento de  $p/d = 2.00$ , diferente do demonstrado na Fig. 4 para o  $p/d = 1.26$ , onde havia a alternância entre os modos de esteira caracterizando a biestabilidade, fato que não foi verificado para este arranjo. Nós atribuímos o não aparecimento da troca entre esteiras à dois possíveis fatores: condições físicas do fluido no momento dos testes/incertezas de medição dos equipamentos utilizados, ou então à uma incerteza de montagem do aparato experimental, pois o range de aparecimento da biestabilidade é notável entre 2.00 e 1.20, sendo este  $p/d = 2.00$  o vértice, de modo que um erro mínimo de montagem pode ter provocado a fixação dos modos de esteiras em um determinado cilindro. Na Fig. 5 (a) e (b), a esteira larga ocorre à jusante do cilindro inferior, já a estreita à jusante do cilindro superior. Este comportamento perdurou durante toda a medição para esta razão  $p/d$ .

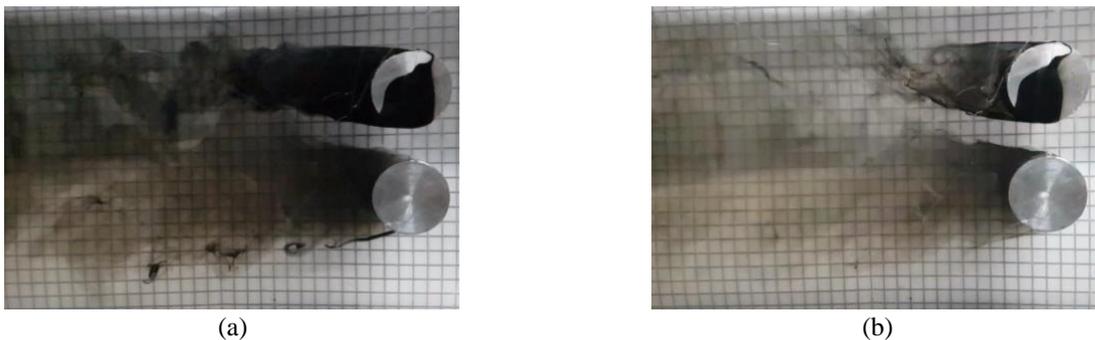


Figura 5. Interações entre esteiras turbulentas para a razão  $p/d = 2.00$ . (a) Cilindro superior: NW, inferior: WW; (b) Cilindro superior: NW, inferior: WW.

A Fig. 6 (a) e (b) exibem as visualizações obtidas com  $p/d = 3.00$ . Durante os nossos testes com  $p/d = 3.00$ , os cilindros desenvolveram esteiras como se estivessem isolados, de modo que estas não interferem de modo significativo umas nas outras, nem provocam uma alternância intermitente e randômica, como esperado por estar fora da faixa de ocorrência da biestabilidade em cilindros lado a lado. Assim como para as outras esta razão equivalente a 3.00 foi avaliada quanto à influência das paredes do canal, contudo elas não demonstraram influência nos nossos resultados.



Figura 6. Comportamento das esteiras turbulentas para ambos cilindros superior e inferior como isolado, em diferentes instantes: (a) e (b).

### 3.2 Distribuição Média de Pressão

Não obstante, a medição da distribuição de pressões na superfície dos cilindros lado a lado foi conduzida com o intuito de relacionar estes pontos com as visualizações de esteiras turbulentas. Os diagramas expostos na Fig. 7 (a) a (c), estão em termos adimensionais de  $C_p$ , coeficiente de pressão, em função das posições. Pela literatura é esperado que para um cilindro isolado, o descolamento da camada limite ocorra em  $80^\circ$  graus e assim foi validado o presente experimento, veja a Fig. 7 (a), mostrando o bom funcionamento do sistema de aquisição. A distribuição é simétrica atingindo os picos e vales de  $C_p$  em  $0^\circ$  e  $60^\circ$ , respectivamente. Em seguida, nós fomos adiante no experimento, avaliando as razões  $p/d$  verificadas na etapa de visualização do escoamento. Fig. 7 (b) e (c) mostra as distribuições de pressão para as dadas razões  $p/d$ , considerando sempre ambos os cilindros inferior e superior, visando a observação do deslocamento dos pontos de estagnação, descolamento da camada limite e desprendimento de vórtices. Pela figura é marcante a relação do  $p/d$  sobre as magnitudes de pressão. Adiante, o ponto de estagnação se move na direção da fenda quando o  $p/d$  decresce. Em função do menor valor de pressão, ambos cilindros para os  $p/d = 2.00$  e  $3.00$  apresentaram  $C_p = -1$ , no entanto um comportamento distinto ocorreu para a menor razão  $p/d$ , onde o coeficiente adimensional se aproximou de  $\sim -0.5$ .

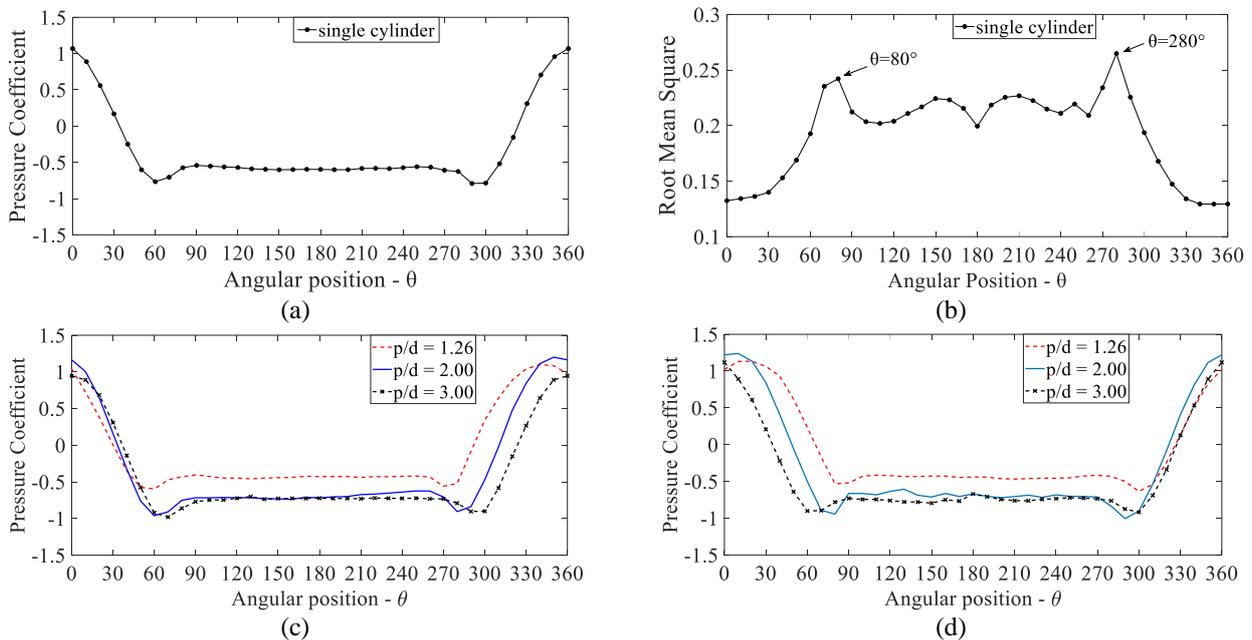


Figura 7. Distribuição do coeficiente de pressão na superfície dos cilindros em função da posição angular; (a) cilindro isolado; (b) Valores RMS para o cilindro isolado; (c) cilindro circular superior; (d) cilindro circular inferior.

### 3.3 Análise Espectral

A análise dinâmica do escoamento também foi alvo desta investigação. Através de funções de densidade de potência espectral nós miramos em padrões quasi-periódicos nos traços temporais de pressão. Fig. 8 (a) a (g), mostra as funções espectrais (PSD) das séries de dados de pressão para cada cilindro em cada razão  $p/d$ . A figura 8 é adimensional em termos de Strouhal no eixo x, enquanto a densidade de espectro no eixo y é adimensional através da densidade, diâmetro e velocidade de escoamento livre. As relações adimensionais de Strouhal e PSD são expostas nas Eq. (1) e (2):

$$St = \frac{f D}{U_\infty} \quad (1)$$

$$PSD = \frac{p^2}{\rho^2 U_\infty^3 D f} \quad (2)$$

, onde  $St$  é o número de Strouhal,  $D$  é o diâmetro do cilindro,  $\rho$  é a densidade do fluido e  $p$  é a parte flutuante das séries temporais de dados. Fig. 8 (a) mostra as densidades espectrais encontradas no cilindro isolado, novamente sendo conduzido isolado com o intuito de verificação da acurácia do experimento, sob os mesmos números de Reynolds. As computações são feitas nos pontos vizinhos e no ponto de descolamento da camada limite, onde a energia dos sinais foi

vista como máxima,  $\theta = 70^\circ, 80^\circ$  e  $90^\circ$ . A figura 8 (a) mostra que o aparato funciona de acordo com a literatura aberta. Para esta avaliação é esperado um  $St \sim 0.21$ , e de fato, os resultados encontrados convergem para um  $St = 0.22$ . Note que a largura de banda era de 3.90 kHz, fazendo o número de Strouhal variar entre 0.21 e 0.23.

Com o sistema de aquisição validado, nós voltamos as atenções para os cilindros lado a lado. É importante afirmar que para todos os cilindros (superior e inferior) apresentados a frequência fundamental, apresentaram um  $St \sim 0.21$ , no entanto algumas observações devem ser estabelecidas. O número de Strouhal mostrou crescimento à medida que a fenda começava a se aproximar. A Fig. 8 (b) e (c) mostram o  $St$  bem definido em 0.23. Para o  $p/d$  intermediário, 2.00, a frequência fundamental se moveu ligeiramente para um  $St = 0.24$  (Figura A2 (d) e (e)). Por outro lado, o resultado mais intrigante foi observado para um  $p/d = 1.26$ , Fig. 8 (f) e (g). Ao computar as funções de densidade espectral para todos os sinais de pressão ao longo do tempo, não fomos capazes de identificar um máximo de energia no espectro. A proximidade entre os cilindros parece suprimir o desprendimento de vórtices. Não obstante, para tal  $p/d$  dois picos de baixa energia aparecem em cerca de  $St = 0.43$  (cujo aparecimento precisa ser ressaltado durante as medições). Estes picos, devido sua baixa energia, não foram atribuídos (até o momento) a algum efeito dinâmico ou comportamento biestável, visto que estes também foram encontrados nas outras séries de densidade PSD.

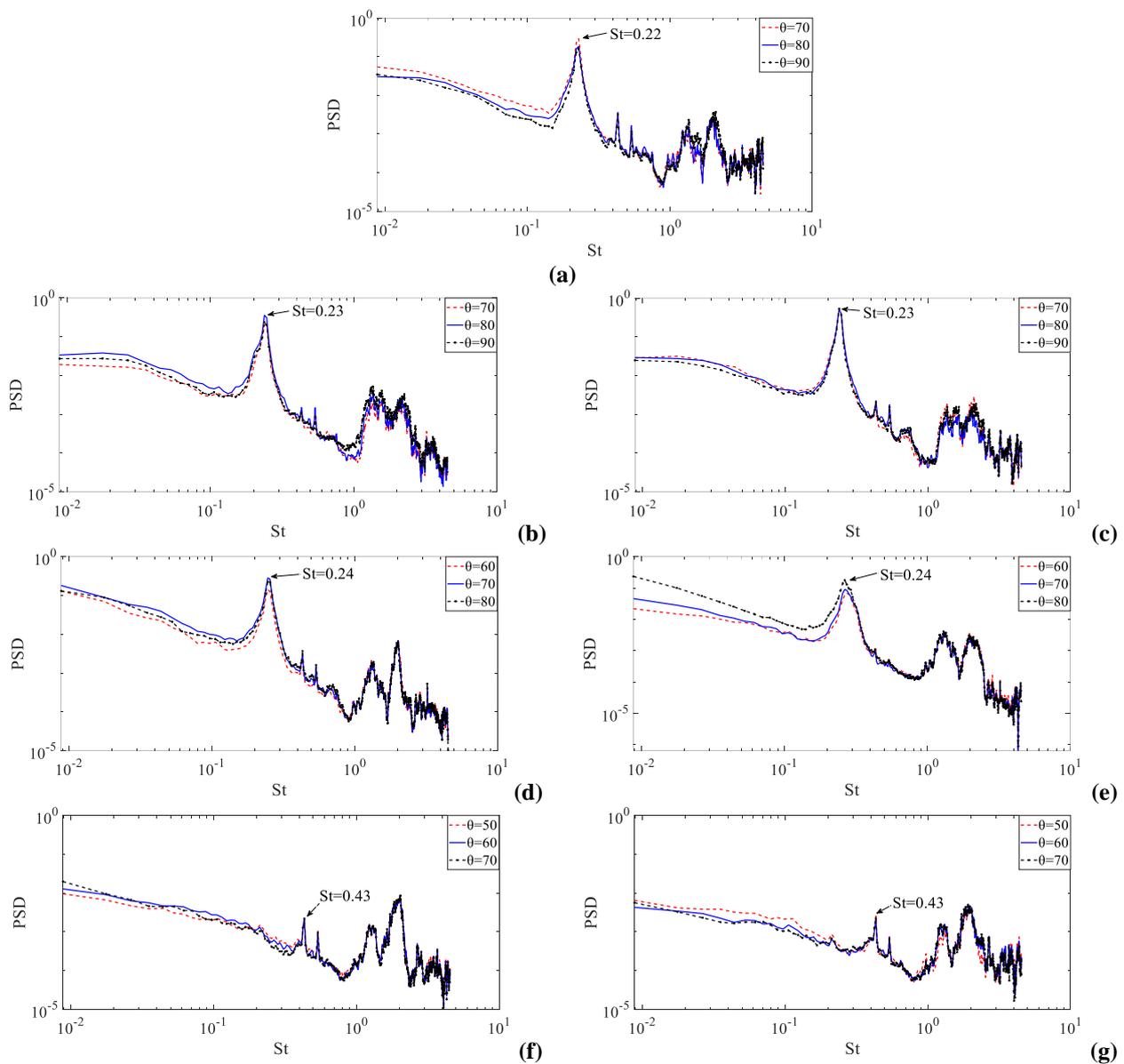


Figura 8. Função de Densidade Espectral para as séries temporais de pressão em diferentes posições angulares; (a) cilindro isolado; (b)  $p/d=3.00$  cilindro superior; (c)  $p/d=3.00$  cilindro inferior; (d)  $p/d=2.00$  cilindro superior; (e)  $p/d=2.00$  cilindro inferior; (f)  $p/d=1.26$  cilindro superior; (g)  $p/d=1.26$  cilindro inferior.

## 4. CONCLUSÃO

Este trabalho é voltado ao estudo das características do escoamento turbulento sobre dois cilindros circulares dispostos lado a lado. Os tubos foram dispostos afastados um do outro por uma distância  $P$  entre seus centros. Uma campanha experimental foi conduzida para investigar a relação das esteiras turbulentas formadas à jusante dos cilindros com a razão de espaçamento  $p/d$  entre os mesmos. Três razões  $p/d$  foram investigadas:  $p/d = 1.26, 2.00$  e  $3.00$ . Assim como foi alvo desta investigação a distribuição de pressão na superfície dos cilindros para estudar os pontos de descolamento da camada limite e desprendimento de vórtices com as configurações determinadas. Não obstante foi realizada uma abordagem de análise de densidade espectral de potência a fim de determinar a frequência fundamental do desprendimento de vórtices e conseqüentemente determinar o número de Strouhal.

A etapa de visualização de esteiras foi conduzida em um canal hidráulico sob um número de Reynolds  $= 4.25 \times 10^3$ . O sistema foi validado através dos resultados obtidos para um cilindro isolado em comparação com a literatura aberta. A razão de afastamento  $p/d$  se mostrou influente no desenvolvimento de esteiras.

Para o menor valor de  $p/d$ , 1.26, a presença de dois cilindros próximos com uma região de fenda pequena evidenciou a atuação das forças viscosas e das forças cisalhantes de modo que a troca entre esteiras teve sua maior intensidade. A presença de duas topologias de esteira (NW e WW) também foi vista para a razão intermediária de  $p/d = 2.00$ , porém as trocas se deram com menor intensidade. O comportamento observado para esses  $p/d = 1.26$  e  $2.00$  evidenciam um escoamento biestável uma vez que ocorre a troca de esteiras turbulentas de modo intermitente e randômico. No entanto para a razão superior,  $p/d = 3.00$ , a presença de um cilindro não demonstrou efeito sob o outro, ambos se comportando como cilindros isolados. Pela literatura a faixa de  $p/d$  com ocorrência de biestabilidade é para  $2.00 > p/d > 1.20$ .

Não obstante, a medição da distribuição de pressão e dos pontos de descolamento da camada limite foi conduzida em um canal aerodinâmico sob um  $Re = 1.78 \times 10^4$ . O aparato foi validado com as medições realizadas para um cilindro isolado através da distribuição de pressão e dos valores quadráticos médios que verificam o descolamento em cerca de  $80^\circ$ . O espaçamento  $p/d$  também se mostrou influente neste mérito, de modo que quanto mais próximos os pontos de estagnação e descolamento foram deslocados na direção da fenda. A intensidade deste deslocamento foi inversamente proporcional com o valor de  $p/d$ , de modo que o maior deslocamento foi visto para o  $p/d = 1.26$ .

A análise espectral de densidade de potência mostrou um Strouhal  $\sim 0.21$ , com exceção no caso do  $p/d = 1.26$ , onde um valor de energia baixa foi encontrado um  $St \sim 0.43$ . O primeiro valor confere com a literatura aberta, enquanto o segundo valor confere com o achado por Olinto em 2005.

## 5. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece o Centro Universitário do Distrito Federal – UDF pelo suporte e o incentivo dado durante o desenvolvimento deste trabalho. O primeiro e o segundo autor agradecem a Universidade de Brasília – UnB e FAP-DF pelo suporte dado durante este projeto de pesquisa. Os autores ainda agradecem aos Grupo de Mecânica Experimental e Computacional pela – GMEC pela infraestrutura

## 6. REFERÊNCIAS

- Ahmad, N., Bihs, H., Myrhaug, D., Kamath, A., Arntsen, O.A., 2018. “Three-dimensional numerical modelling of wave induced scour around piles in a side-by-side arrangement”. *Coastal Engineering*, pp. 132-151.
- Alam, M. M., Moriya, M., Sakamoto, H., 2003. “Aerodynamics characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon”. *Journal of Fluids and Structures*, pp. 325-346.
- Alam, M. M., Zheng, Q., Hourigna, K. 2017. “The wake and thrust by four side-by-side cylinders at a low  $Re$ ”. *Journal of Fluids and Structures*, 70 (2017) 131–144.
- Bao, Y., Zhou, D., Tu, J., 2013. “Flow characteristics of two in-phase oscillating cylinders in side-by-side arrangement”. *Computers & Fluids*, 71, 124-145.
- Destefani, B. V., 2016. “Visualização Da Biestabilidade Em Dois Cilindros Circulares Dispostos Lado A Lado Em Um Canal Hidráulico Posicionados Na Horizontal E Na Vertical”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- de Paula, A. V., Endres, L. A. M., Möller, S. V., 2012. “Bistable features of the turbulent flow in tube banks of triangular arrangement”. *Nuclear Engineering Design*, 249:379–387.
- de Paula, A. V., Möller, S. V., 2013. “Finite mixture model applied in the analysis of a turbulent bistable flow on two parallel circular cylinders”. *Nuclear Engineering and Design*, 264, 203-213.
- de Paula A. V., Möller S. V., 2018. “On the chaotic nature of bistable flows”. *Exp Therm Fluid Science* 94:172–191.
- Giacomello, M. V., Rocha, L. A. O., Silvestrini, J. H., 2006. “Simulação Numérica De Escoamentos Ao Redor De Cilindros Com Transferência De Calor”. *5a Escola de primavera de transição e turbulência – EPTT2006*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Kang, S., 2003. “Characteristics of flow over two circular cylinders in a side-by-side arrangement at low Reynolds numbers”. *Journal of Physics of Fluids*, 15(9), 2486-2498.

- Kim, S., Alam, M.M, 2015. “Characteristics and suppression of flow-induced vibrations of two side-by-side circular cylinders”. *Journal of Fluids and Structures*, pp. 629-642.
- Neumeister, R. F., Petry, A. P., Moller, S. V., 2018. “Characteristics of the wake formation and force distribution of the bistable flow on two cylinders side-by-side”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40-564.
- Olinto, C. R., Indrusiak, M. L. S. and Möller, S. V., 2006. “Experimental study of the bistable flow in tube arrays”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. XXVIII, No. 2, pp. 233-241.
- Olinto, C. R., Endres, L. A. M. and Möller, S. V., 2009. “Experimental study of the characteristics of the flow in the first rows of tube banks”. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 239, pp. 2022-2034.
- Sumner, D., 2010. “Two circular cylinders in cross-flow: a review”. *Journal of Fluids and Structures*, 26(6), 849-899.
- Vila, J. L. C. R., Almeida, P. P. S., Melo, T., 2018. “Experimental analysis of the vortex breakdown formation in draft tubes”. *11<sup>th</sup> Spring School on Transition and Turbulence – EPTT2018*, Uberlândia, Brasil.
- Wang, Z. J., & Zhou, Y., 2005. “Vortex interactions in a two side-by-side cylinder near-wake”. *International journal of heat and fluid flow*, 26(3), 362-377
- Zukauskas, A., 1972. “Heat transfer from tubes in crossflow”. *Advances in heat transfer*, vol. 8, pp. 93-160.
- Zukauskas, A., Katinas, V. J., Perednis, E. E., & Sobolev, V. A., 1980. “Viscous flow over inclined in-line tube bundles, and vibrations induced in the latter”. *Fluid Mechanics-Soviet Research*, 9(4).
- Zukauskas, A., Katinas, V., 1988. “Fluid dynamic forces on vibrating tubes of heat exchangers in cross-flow”. *Journal of Fluids and Structures*, 5(3), 279-298.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.