

## ANÁLISE NUMÉRICO DE SUPRESSORES DE VÓRTICES TIPO "SPLITTER PLATE" E "FAIRING"

Mateus C.A.D. Cavalcante<sup>a</sup>, Letônio L.J. da Silva<sup>a</sup>, Giuliana F.F. Bono<sup>b</sup> e Gustavo Bono<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Núcleo de Tecnologia, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Rod. BR-104, Km 59, CEP: 55014-900, Caruaru - PE, Brasil, [mateus.calebe@ufpe.com](mailto:mateus.calebe@ufpe.com), [letoniojs@gmail.com](mailto:letoniojs@gmail.com), <http://www.ufpe.br/caa>

<sup>b</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Rod. BR-104, Km 59, CEP: 55014-900, Caruaru - PE, Brasil, [bonogustavo@gmail.com](mailto:bonogustavo@gmail.com), [giuliana.franca@gmail.com](mailto:giuliana.franca@gmail.com), <http://www.ufpe.br/ppgecam>

**Palavras Chave:** Supressores tipo *splitter plate* e *fairing*, Corpos Rombudos, Simulação Numérica, Vibrações Induzidas por Vórtices.

**Resumo.** O estudo e desenvolvimento de dispositivos para o controle do desprendimento de vórtices ao redor de cilindros circulares é fundamental em muitos projetos aerodinâmicos e hidrodinâmicos, já que os mesmos permitem suprimir ou minimizar efeitos indesejados, tais como: vibrações, aumento do arrasto e geração de ruído. Neste trabalho, apresenta-se um estudo numérico do controle do desprendimento de vórtices a baixo número de Reynolds ( $Re = 100$  e  $160$ ), através do uso de dispositivos do tipo: placa plana (*splitter plate*) com furos e carenados (*fairing*). Para as placas planas varia-se o comprimento da placa ( $L/D = 1,0$  e  $2,0$ ) e a disposição dos furos. Para o segundo dispositivo estuda-se como influencia o ângulo do bordo de fuga. Analisa-se como os principais coeficientes aerodinâmicos variam em função do número de Reynolds e dos parâmetros geométricos dos dispositivos. As equações de Navier-Stokes e a equação de conservação de massa considerando as hipóteses de pseudo-compressibilidade são resolvidas empregando o Método dos Elementos Finitos. Os resultados obtidos mostram que um aumento do número de Reynolds provoca um aumento da amplitude do coeficiente de sustentação e uma diminuição no valor médio do coeficiente de arrasto em todos os dispositivos estudados. Os dispositivos que apresentaram os melhores resultados com o *splitter plate* com  $L/D = 2,0$  e o *fairing* com  $\theta = 20^\circ$ .

## 1 INTRODUÇÃO

Um corpo não aerodinâmico quando imerso em uma corrente de fluido gera a separação do escoamento. Dependendo da relação entre as forças viscosas e de inércia atuantes neste escoamento, podem ocorrer instabilidades, causando a formação e o desprendimento de vórtices à jusante do corpo. O desprendimento de vórtices causa o aparecimento de forças dinâmicas que podem originar: modificação das forças de arrasto e de sustentação, surgimento de ruído e vibrações na estrutura. A ocorrência de vibrações, na maioria das estruturas, deve ser evitada, ou ao menos minimizada.

A investigação destes fenômenos é extremamente importante em várias áreas da engenharia já que permite o desenvolvimento de estratégias que objetivam: reduzir o arrasto e prevenir o colapso estrutural precoce das referidas estruturas no contexto de fadiga mecânica, estendendo a vida útil dos componentes através de mecanismos que promovem a redução das vibrações induzidas pelo escoamento. Deve-se ressaltar que o controle de escoamento mediante dispositivos e mecanismos permite não somente reduzir as vibrações em diferentes corpos, mas também a diminuição do arrasto, aumento da sustentação e supressão de ruídos ([Gad-el-Hak, 2000](#)).

As técnicas para o controle do escoamento podem-se dividir em duas categorias: técnicas passivas e ativas ([Gad-el-Hak, 2000](#); [Rashidi et al., 2016](#)). As técnicas de controle passivo do escoamento (CPE) recebem esta denominação porque as mesmas não requerem nenhuma fonte de potência exterior, ao contrário das técnicas de controle ativo do escoamento (CAE). Consequentemente, os métodos CPE são geralmente menos complexos e fáceis de utilizar, devido a que não empregam mecanismos complicados (atuadores, etc.) que são mais vulneráveis à falha. Entretanto, podem ter efeitos não desejados em determinadas situações onde o emprego dos mesmos não é necessário. Os métodos ativos são geralmente mais efetivos já que são empregados quando é necessário, entretanto, os sistemas são mais complexos e custosos.

Neste trabalho, nos limitaremos ao estudo de dispositivos de controle passivo do escoamento do tipo *splitter plate* e *fairing*. Antes de analisar os dispositivos, é necessário conhecer os mecanismos físicos envolvidos na formação da esteira de vórtices. [Gerrard \(1966\)](#) analisou os mecanismos físicos envolvidos no fenômeno de formação e desprendimento de vórtices no escoamento ao redor de um cilindro. Ele sugeriu que a interação mútua entre as duas camadas cisalhantes, formadas devido à separação da camada limite, constitui-se um elemento decisivo no processo de formação dos vórtices da esteira. O fenômeno de geração e desprendimento de vórtices envolve a mistura de regiões de fluido com vorticidade de sinais opostos.

Alguns dos principais meios aerodinâmicos e hidrodinâmicos empregados para suprimir as forças que atuam em um corpo rombudo são:

- (a) Controle da camada cisalhante por saliências na superfície (aletas, aletas helicoidais, fios, etc.) que afetam as linhas de separação. Ver [Potanza et al. \(2009\)](#), [Kleissl e Georgakis \(2012\)](#), [Cabral et al. \(2012\)](#), entre outros.
- (b) Controle de instabilidades da esteira através de estabilizadores (placa separadora, placas de orientação, fendas no modelo, etc.) localizados perto da mesma. Os estabilizadores reduzem a interação das camadas cisalhantes opostas. Ver [Hwang e Yang \(2007\)](#), [Bao e Tao \(2013\)](#), [Bono e Bono \(2014\)](#), entre outros.
- (c) Modificando a geometria do corpo, consegue-se suprimir ou reduzir a formação de vórtices na esteira. Esta técnica possibilita reduzir tanto os efeitos de Vibrações Induzidas por Vórtices como o coeficiente de arrasto. Ver [Schulz e Kallinderis \(2000\)](#), [Assi et al.](#)

(2011), Cabral et al. (2012), entre outros.

- (d) Existem outros dois métodos eficazes para suprimir a força sobre um corpo rombudo. A primeira delas é colocar em um dos lados do modelo um pequeno objeto de controle na camada limite cisalhante separada. O outro método é colocar um objeto de controle (cilindro pequeno ou placa plana fina) de forma centralizada na frente do modelo, modificando assim o escoamento que se aproxima ao corpo. Ver Young et al. (2001), Kuo e Chen (2009), entre outros.

No presente trabalho, apresenta-se um estudo paramétrico do comportamento aerodinâmico em dois tipos de atenuadores colocada a jusante de um cilindro circular: (1) placa plana separadora de escoamento e (2) carenagem. Analisa e comparar-se como os principais coeficientes aerodinâmicos variam em função do comprimento da placa plana, disposição dos furos, ângulo do bordo de fuga da carenagem e do número de Reynolds. O objetivo deste estudo é, essencialmente, começar a responder à questão de eficiência dos dispositivos e compreender os mecanismos aerodinâmicos responsáveis pela geração e desprendimento dos vórtices em esses tipos de supressores para baixo número de Reynolds. O artigo é organizado da seguinte forma: a metodologia que foi empregada no trabalho é apresentado na Seção 2. Na Seção 3, apresentam-se os exemplos analisados, e por último apresentamos as principais conclusões.

## 2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi empregado o programa, HEXAFEM\_3D\_IGF (Bono et al., 2011a), baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). O escoamento é analisado empregando as equações de Navier-Stokes e uma equação de conservação de massa considerando a hipótese de pseudo-compressibilidade para problemas isotérmicos. As equações são resolvidas empregando o MEF, usando uma série de Taylor e o clássico método de Bubnov-Galerkin para a discretização do tempo e do espaço, respectivamente. Para a discretização do domínio espacial utiliza-se o elemento isoparamétrico hexaédrico de oito nós. A validação do programa para exemplos clássicos com baixos e moderados números de Reynolds pode ser vista em Bono et al. (2011b), Cabral et al. (2012). e Bono e Bono (2014). Os resultados numéricos obtidos com o presente programa mostraram ótima concordância quando comparados com os resultados numéricos/experimentais obtidos por outros autores.

Os exemplos analisados são resolvidos como problemas bidimensionais (2-D), portanto, foram modelados geometricamente como um problema tridimensional (1 elemento hexaédrico na direção perpendicular) adotando-se as condições de contorno necessárias para simular um escoamento bidimensional.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foram estudados e analisados os principais parâmetros aerodinâmicas de dois dispositivos de controle passivo de desprendimento de vórtices: (1) cilindro circular com placa plana separadora (*splitter plate*) e cilindro circular com carenagem (*fairing*). Ambos dispositivos tem como função mitigar a formação e os desprendimento de vórtices. Na Figura 1, apresenta o cilindro circular (CC) com os dois dispositivo tipo *splitter plate* estudados. O CC possui diâmetro unitário e as placas separadoras estão localizadas à jusante do mesmo. Conforme pode-se observar na Figura 1, as placas planas apresentam furos de comprimento  $L/4$ , sendo que no caso A1 a placa plana está presa à base do CC, e no caso B1 existe um furo entre a placa plana e o CC. O tamanho da placa varia-se nas seguinte proporções:  $L/D=1$  e

$L/D=2$ . Deve-se ressaltar que a relação entre os tamanho dos furos e o tamanho total da placa sempre se mantém igual a 0,50.

Os exemplos com o dispositivo tipo carenagem são identificados como “C”, apresentando comprimento longitudinal fixo igual a  $L = 1,5D$ . Esta geometria varia de acordo com o ângulo do bordo de fuga da carenagem ( $\theta$ ). Detalhes da geometria e identificação dos casos podem ser vistos na Figura 2. Os casos foram simulados para  $\theta = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$  e  $60^\circ$ , onde  $\theta = 0^\circ$  ocorre quando os lados ficam paralelos entre si e  $\theta = 60^\circ$  ocorre quando os lados se tocam, único caso onde o bordo de fuga não é truncado semelhante a um *faring* tradicional.

Todos os casos supracitados foram simulados para os números de Reynolds,  $Re = 100$  e  $160$ .

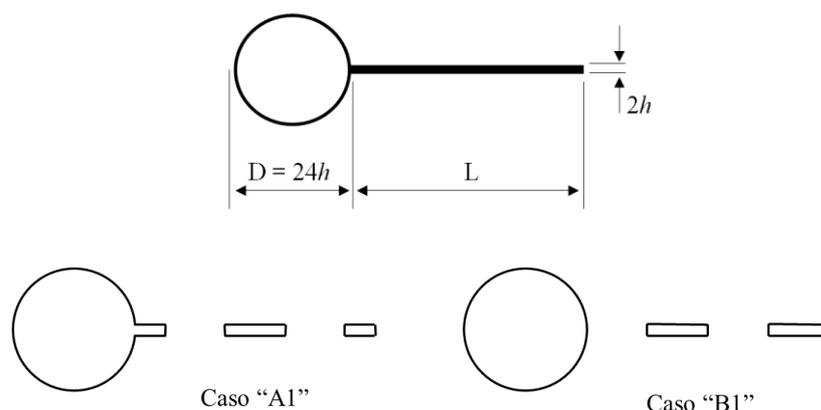


Figura 1: Geometria para o dispositivo tipo *Splitter Plate*

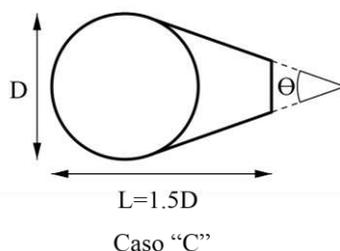


Figura 2: Geometria para o dispositivo tipo *Faring*

O domínio empregado em todos os casos analisados tem dimensões 30 [m] x 16 [m] e na entrada prescreve-se uma velocidade uniforme igual a 1,0 [m/s]. Detalhes com relação às condições de contorno e condições iniciais podem ser encontrados em Cabral et al. (2012). A validação do programa para caso de cilindro circulares com baixos e moderados números de Reynolds pode ser vista em Cabral et al. (2012) e Bono e Bono (2014). Na Figura 3, mostram-se detalhes das medidas que foram extraídas da topologia do escoamento para o caso dos resultados médios. Tomando-se como referência o centro do cilindro circular, considera-se:  $L$  – distância do centro do cilindro ao final da região de recirculação;  $L1$  – distância do centro do cilindro ao centro do primeiro par de vórtices;  $L2$  – distância do centro do cilindro ao centro do segundo par de vórtices, caso exista;  $H1$  – distância entre os centros do par de vórtices mais afastado do cilindro;  $H2$  – distância entre os centros do par de vórtices mais próximos do cilindro, caso exista;  $\varphi$  – ângulo de separação da camada limite em relação à linha de simetria.

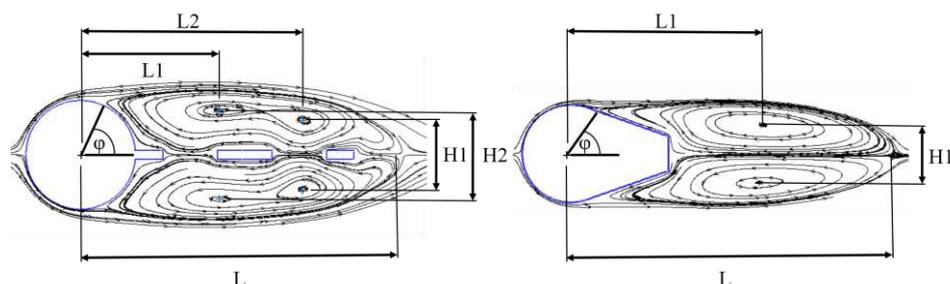


Figura 3: Detalhes das medidas realizadas nos dispositivos.

Na Figura 4, mostram-se as figuras de Lissajous para os casos dos dispositivos tipo *splitter plate*, A1 ( $L/D=1$  e 2) e B1 ( $L/D=1$  e 2) considerando os números de Reynolds 100 e 160. Estas curvas representam a variação das amplitudes e a relação entre fases e frequências dos coeficientes de sustentação (CL) e de arrasto (CD).

Pode-se observar que todas as curvas são simétricas em relação à linha  $CL = 0,0$  e o aumento do número de Reynolds provoca um acréscimo na amplitude do CL e uma diminuição no valor médio de CD. Independente do número de Reynolds e do tipo de disposição dos furos (casos A1 e B1), as placas planas de comprimento maior ( $L/D = 2$ ) sempre apresentam um valor menor do coeficiente de arrasto quando comparadas as placas de menor comprimento ( $L/D = 1$ ). Para as placas planas com o mesmo comprimento, independentemente do número de Reynolds, observa-se que os casos B1 sempre apresentam um CD levemente inferior aos casos A1. Por sua vez, os casos A1 sempre mostram um valor de amplitude do CL relativamente inferior em comparação aos casos B1. Os menores valores do coeficiente de arrasto médio e amplitude do coeficiente de sustentação foram obtidos para o comprimento da placa igual a  $L/D = 2,0$ .

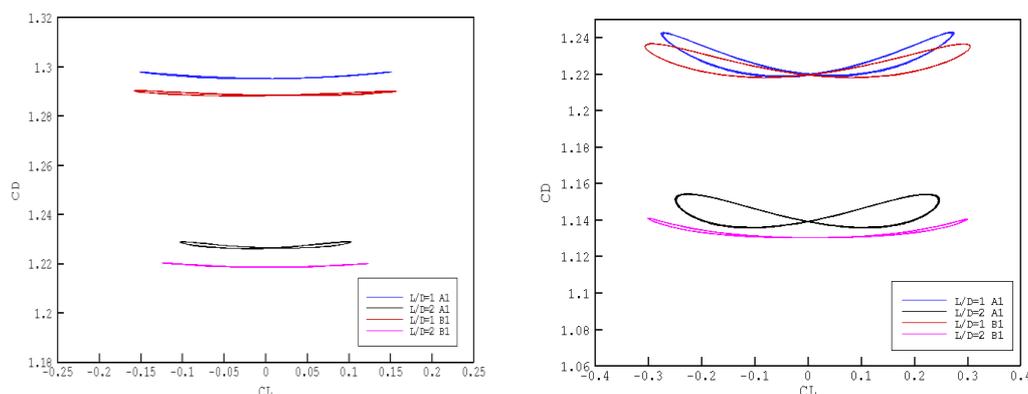


Figura 4: Figuras de Lissajous para o CC com placa plana com furos do tipo A1 e B1 para  $Re = 100$  e 160.

Na Figura 5, observar-se as figuras de Lissajous para o caso “C”, considerando os dois números de Reynolds 100 e 160. As curvas representadas mostram os casos para os ângulos do bordo de fuga igual a  $\theta = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$  e  $60^\circ$ . Novamente, é possível observar que todas as curvas são simétricas com relação à linha  $CL = 0$ . Assim, como ocorreu no caso do CC com placas separadoras, independentemente do valor do ângulo da carenagem, nota-se que um aumento no número de Reynolds sempre incrementa a amplitude do CL e reduz o valor médio do CD.

Pode-se observar, que independentemente do número de Reynolds, o caso  $\theta = 20^\circ$  sempre exibe o menor valor médio de CD e a menor amplitude do CL. Em contrapartida, os casos  $\theta = 0^\circ$  (lados paralelos) e  $60^\circ$  (*fairing* tradicional) apresentam os maiores valores de amplitude de CL e CD médio. Portanto, percebe-se que os coeficientes aerodinâmicos apresentam um valor máximo,  $\theta = 0^\circ$ , e diminuem até atingirem o mínimo para  $\theta = 20^\circ$ . Pelo exposto, pode-se concluir que a construção de um dispositivo do tipo C com um ângulo no bordo de fuga de  $20^\circ$  é a melhor escolha, já que trará como benefícios a redução da amplitude de oscilação e arrasto médio.

Comparando os três tipos de dispositivos analisados (casos A1, B1 e C), percebe-se que o supressor tipo C com  $\theta = 20^\circ$  foi o dispositivo mais efetivo, pois apresentou os menores valores de arrasto médio e amplitude de oscilação do coeficiente de sustentação.

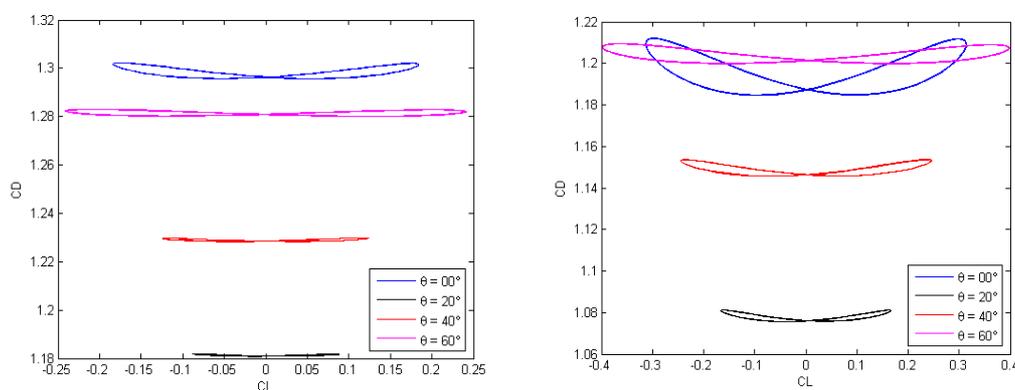


Figura 5: Figuras de Lissajous para o CC com carenagem para  $Re = 100$  e  $160$ .

Nas Figuras 6 e 7, apresentam-se as principais medidas características dos vórtices no caso dos resultados médios, conforme a nomenclatura apresentada na Figura 3. Todos os gráficos apresentados na Figura 6 são em função do tamanho da placa,  $L/D$ . Para o comprimento  $L$ , observa-se que os valores crescem com o aumento do comprimento placa, ficando praticamente inalterado para o caso B1 com  $Re = 160$ . Os maiores valores de  $L$  estão associados a  $Re = 100$ . O gráfico que apresenta a medida  $L1$ , mostra que os valores da variável aumentam para o caso B1 e diminuem para o caso A1 conforme aumenta o comprimento da placa.

O gráfico que apresenta a medida  $L2$ , mostra que para  $Re = 100$ , os valores da variável diminuem para o caso A1 e aumentam para o caso B1 conforme aumenta o comprimento da placa, acontecendo o comportamento contrário para  $Re = 160$ . Deve-se ressaltar que para o caso B1 com  $L/D = 2$  o valor é nulo já que não se formou um segundo par de vórtices. Por sua vez, para o caso A1 com  $L/D = 2$  ainda se formou um terceiro par de vórtices com uma distância 19% maior em relação ao segundo par de vórtices formados. Nos gráficos que apresentam as medidas  $H1$  e  $H2$ , observam-se que conforme aumenta o comprimento da placa os valores das variáveis aumentam para os casos A1 e diminuem para os casos B1. Deve-se observar que para  $H1$  o valor máximo corresponde para  $Re = 160$ , entretanto, para o comprimento  $H2$  o valor máximo obtém para  $Re = 100$ .

O gráfico que apresenta o ângulo de separação do escoamento  $\theta$ , mostra que o valor da variável permanece praticamente constante para os casos A1 e para os casos B1 cresce de acordo com o aumento da placa plana.

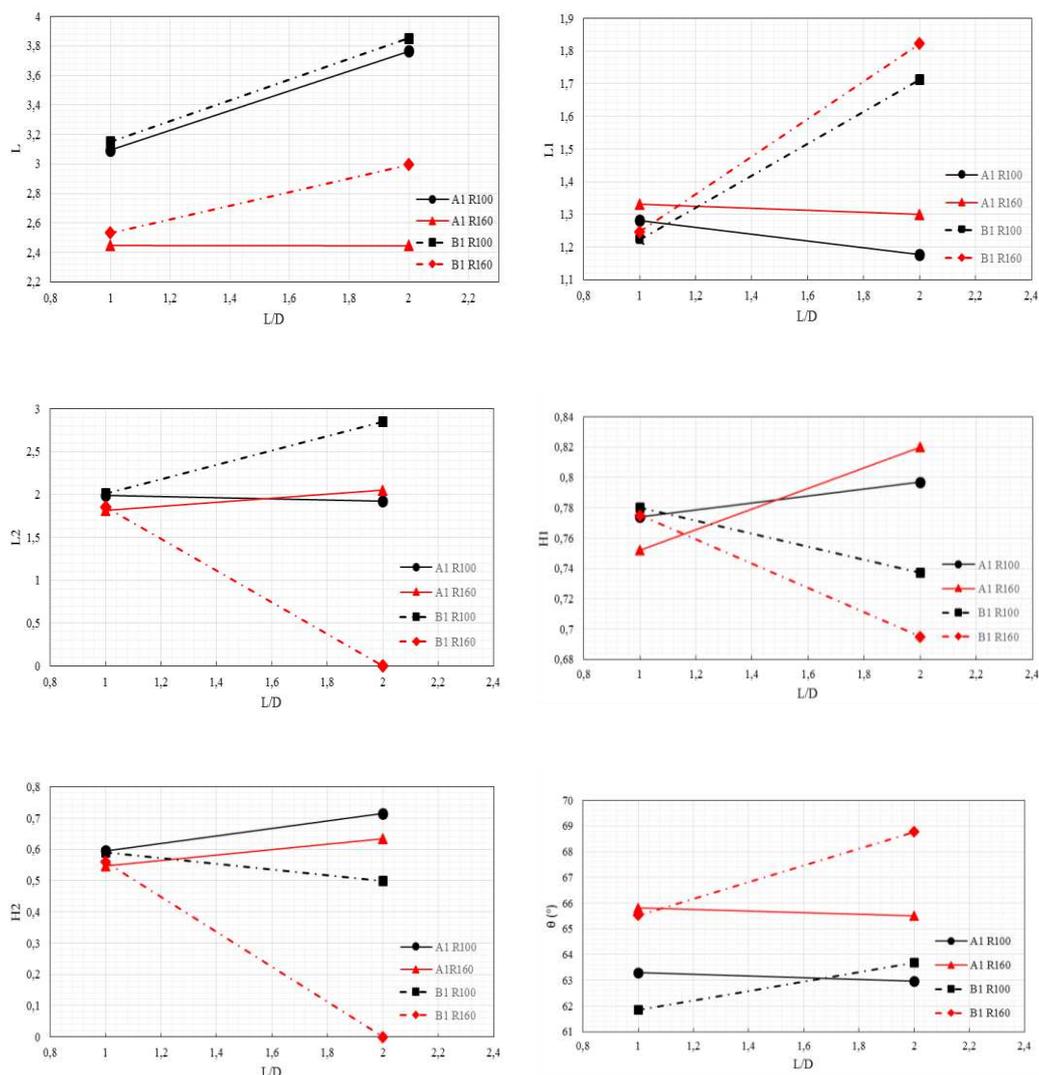


Figura 6: Medidas características dos vórtices apresentados na Figura 2 ( $L$ ,  $L1$ ,  $H1$ ,  $H2$  e  $\theta$ ) em função do comprimento da placa plana e do número de Reynolds para os casos A1 e B1.

Na Figura 7, apresentam-se as principais medidas dos vórtices para o caso do dispositivo tipo C (carenagem). Está representado no gráfico superior esquerdo as distâncias entre o centro do cilindro circular e o final da região de recirculação ( $L$ ) e os centros dos vórtices primários ( $L1$ ). Os gráficos apresentam o mesmo tipo de comportamento, sendo que para os casos com  $Re = 100$  obtêm-se os maiores valores. Além disso, percebe-se que em todos os casos os valores máximos de  $L$  e  $L1$  acontecem no caso de  $\theta = 20^\circ$ . No gráfico superior direito, mostram-se os valores de  $H1$  em função do ângulo  $\theta$ . A distância entre os centros dos vórtices torna-se mínima para  $\theta = 20^\circ$ . Por fim, o gráfico inferior mostra-se o ângulo ( $\varphi$ ) de separação da camada limite. Observa-se que o dispositivo retarda a separação da camada limite conforme diminui o ângulo  $\theta$ .

Comparando-se os supressores formados por placa plana separadora com a carenagem, percebe-se que os dispositivos tipo *splitter plate* deslocaram os vórtices para jusante do cilindro circular. Trata-se de algo esperado, pois as placas têm a finalidade de interferirem na interação das camadas cisalhantes adiando a formação dos vórtices. Portanto, o comprimento

L resultado maior. Em contrapartida, o dispositivo tipo *fairing* apresentou a menor distância entre vórtices, H1.

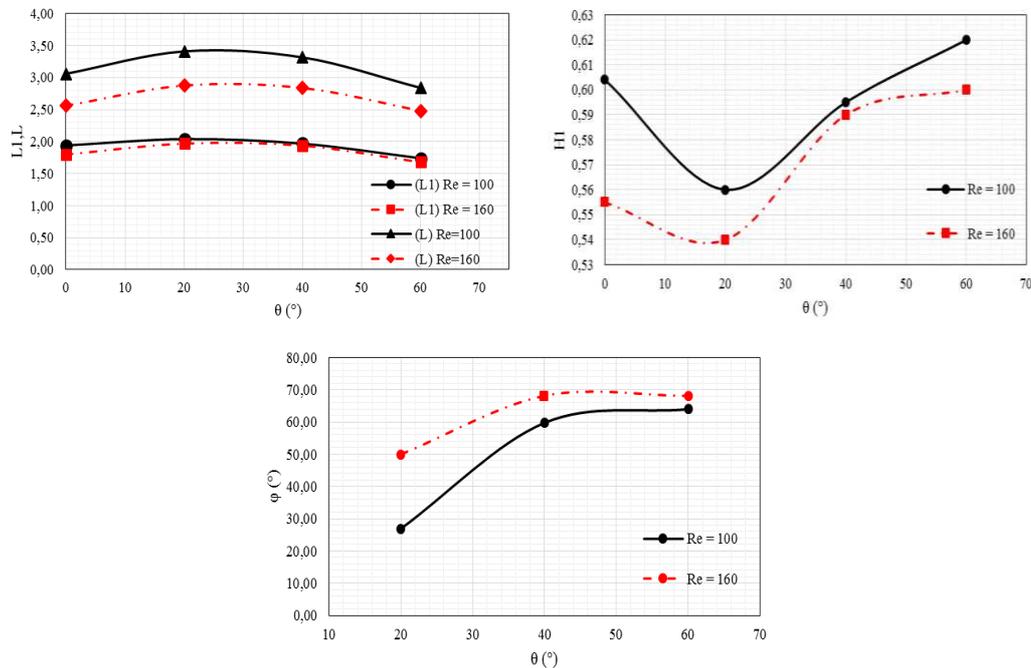


Figura 7: Medidas características dos vórtices apresentados na Figura 2 (L, L1, H1 e  $\phi$ ) em função do ângulo  $\theta$  e do número de Reynolds para o caso da carenagem tipo C.

#### 4 CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi apresentado um estudo paramétrico do comportamento aerodinâmico em dois tipos de atenuadores colocada a jusante de um cilindro circular: (1) placa plana separadora de escoamento e (2) carenagem. Analisaram-se como os principais coeficientes aerodinâmicos e as medidas características dos vórtices variam em função do comprimento da placa plana ( $L/D = 1,0$  e  $2,0$ ), disposição dos furos (casos A1 e B1), ângulo do bordo de fuga da carenagem ( $\theta = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$  e  $60^\circ$ ) e do número de Reynolds ( $Re = 100$  e  $160$ ).

Diante do exposto no trabalho, pode-se concluir que:

a) Para todos os casos estudados, verifica-se que um aumento do número de Reynolds provoca um aumento da amplitude do coeficiente de sustentação e uma diminuição no valor médio do coeficiente de arrasto.

b) Para os dispositivos de tipo placas planas, *splitter plate*, observou-se que para os casos de placas planas do mesmo comprimento, independentemente do número de Reynolds, os casos B1 sempre apresentam um  $CD$  levemente inferior aos casos A1. Por sua vez, os casos A1 sempre mostram um valor de amplitude do  $CL$  relativamente inferior aos casos B1.

c) Para o dispositivo de tipo carenagem, *fairing*, pode-se observar, que independentemente do número de Reynolds, o caso  $\theta = 20^\circ$  sempre exhibe o menor valor médio de  $CD$  e a menor amplitude do  $CL$ . Em contrapartida, os casos  $\theta = 0^\circ$  (lados paralelos) e  $60^\circ$  (*fairing* tradicional) apresentam os maiores valores de amplitude de  $CL$  e  $CD$  médio.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE e ao Conselho Nacional de Pesquisa – CNPq pelo apoio financeiro recebido durante a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Assi, G.R.S., Bearman, P.W., Tognarelli, M.A. e Rodrigues, J.R.H. The effect of rotational friction on the stability of short-tailed fairings suppressing vortex-induced vibrations, *Proc. ASME - OMAE* (2011), pp. 01-06.
- Bao, Y. e Tao, J. The passive control of wake flow behind a circular cylinder by parallel dual plates, *J. Fluids and Structures*, 37: 201-219, 2013.
- Bono, G., Lyra, P.R.M. e Bono, G.F.F. Simulação em escoamentos incompressíveis através do Método dos Elementos Finitos, *Anais Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica* (2011), pp. 721-733.
- Bono, G., Lyra, P.R.M. e Bono, G.F.F. Simulação numérica de escoamentos incompressíveis com Simulação de Grandes Escalas, *Mecânica Computacional*, XXX: 1423-1440, 2011.
- Bono, G. e Bono, G.F.F. Estudo numérico de supressores de vórtices tipo "splitter plate", *Mecânica Computacional*, XXXIII: 71-79, 2014.
- Cabral, N.C., Bono, G. e Bono, G.F.F. Estudo paramétrico de dispositivos de controle passivo de Vibrações Induzidas por Vórtices, *Mecânica Computacional*, XXXI: 69-84, 2012.
- Gad-el-Hak, M.. *Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management*. Cambridge University Press, 2000.
- Gerrard, J.H. The mechanics of the formation region of vortices behind bluff body, *J. Fluid Mech.*, 25: 69-84, 1966.
- Hwang, J-Y. e Yang, K-S. Drag reduction on a circular cylinder using dual detached splitter plates, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 95: 551-564, 2007.
- Kleissl, K. e Georgakis, C.T. Comparison of the aerodynamics of bridge cables with helical fillets and a pattern-indented surface, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 104-106: 166-175, 2012.
- Kuo, C-H. e Chen, C-C. Passive control of wake flow by two small control cylinders at Reynolds number 80, *J. Fluids and Structures*, 25: 1021-1028, 2009.
- Kwon, K. e Choi, H. Control of laminar vortex shedding behind a circular cylinder using splitter plates, *Phys. Fluids*, 8(2): 479-486, 1966.
- Nakamura, Y. Vortex shedding from bluff bodies with splitter plates, *J. Fluids and Structures*, 10: 147-158, 1996.
- Potanza, J.P., Menon, R.G. e Chen, H-C. Three-Dimensional numerical simulations of flows past smooth and rough/bare and helically straked circular cylinders allowed to undergo two degree-of-freedom motions, *J. Offshore Mech. and Arctic Eng.*, 05-131: 01-07, 2009.
- Rashidi, S., Hayatdavoodi, M. e Esfahani, J.A. Vortex shedding suppression and wake control: A review, *Ocean Engineering*, 126: 57-80, 2016.
- Ribeiro, P.A.R., Schettini, E.B.C. e Silvestrini, J.H. Bluff-bodies vortex shedding suppression by Direct Numerical Simulation, *Engenharia Térmica*, 5: 03-08, 2004.
- Schulz, K.W. e Kallinderis, Y. Numerical prediction of the hydrodynamic loads and vortex-induced vibrations of offshore structures, *J. Offshore Mech. and Arctic Eng.*, 11-122: 289-293, 2000.
- Young, D.L., Huang, J.L. e Eldho, T.I. Numerical simulation of high-Reynolds number flow around circular cylinders by a three-step FEM-BEM model, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 37: 657-689, 2001.