

ESTUDO NUMÉRICO DE SUPRESSORES DE VÓRTICES TIPO "SPLITTER PLATE"

Gustavo Bono e Giuliana F.F. Bono

Laboratório de Engenharia Computacional (LECOM) - Núcleo de Tecnologia – Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Rod. BR-104 km 59, Caruaru-PE, CEP 55002-970, Brasil, bonogustavo@gmail.com, giuliana.franca@gmail.com, <http://www.ufpe.br/caa>

Palavras Chave: Corpos Rombudos, Simulação Numérica, Vibrações Induzidas por Vórtices.

Resumo. O controle do desprendimento de vórtices ao redor de cilindros circulares é fundamental em várias áreas da engenharia e deve-se a suas múltiplas aplicações. Neste trabalho, apresenta-se um estudo numérico do controle do desprendimento de vórtices a baixos número de Reynolds, através do uso de placas de separação do escoamento. Para as placas planas considera-se dois casos: placas sólidas e placas com furos. Estuda-se como os principais coeficientes aerodinâmicos variam em função do comprimento da placa plana ($L/H = 1.0$ e 2.0), do índice de porosidade e do número de Reynolds. 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.

1 INTRODUÇÃO

A determinação de forças aerodinâmicas e hidrodinâmicas atuando em corpos rombudos submetidos a um escoamento de fluidos tem sido alvo de estudo, tanto experimentais como numéricos, durante várias décadas. Tal preocupação surge em várias áreas da engenharia e deve-se às suas aplicações em situações reais. Um obstáculo quando imerso em corrente de fluido, gera a separação do escoamento próximo a sua superfície. 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 deste corpo. O desprendimento de vórtices causa o aparecimento de forças dinâmicas que podem originar algumas dos possíveis efeitos: o incremento do arrasto e o surgimento de vibrações na estrutura. A ocorrência de vibrações, na maioria das estruturas, deve ser evitada, ou ao menos minimizada.

A investigação destes fenômenos permite o desenvolvimento de estratégias que objetivam reduzir o arrasto ou prevenir o colapso estrutural precoce das referidas estruturas no contexto de fadiga mecânica, estendendo a vida útil desses 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. 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). Conseqüentemente, 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 unicamente ao estudo de dispositivos de controle passivo do escoamento do tipo *splitter plate*. 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. Gerrard postou que um vórtice cresce, ganhando circulação oriunda da camada cisalhante, a qual ele está conectado. Em certo instante, o vórtice que está crescendo torna-se suficientemente intenso para atrair a camada cisalhante oposta. Esta atração se dá devido à velocidade induzida pelo vórtice em crescimento. A aproximação de fluido com vorticidade oposta, em uma concentração suficientemente intensa, interrompe a alimentação de circulação do vórtice em crescimento e então, ele é desconectado da camada cisalhante e a seguir, convectado para jusante, formando a esteira. O fenômeno de geração e desprendimento de vórtices envolve a mistura de regiões de fluido com vorticidade de sinais opostos. Devido a este fato, a intensidade de um vórtice individual da esteira será menor que a circulação total que emanou da separação de um dos lados do corpo rombudo durante um ciclo de geração.

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 \(2012\)](#), 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 \(2013\)](#), entre outros.
- (c) Modificando a geometria do corpo, consegue-se suprimir ou reduzir a formação de vórtices na esteira. Está técnica possibilita reduzir tanto os efeitos de VIV como o coeficiente de arrasto. Ver [Schulz e Kallinderis \(2000\)](#), [Assi et al. \(2011\)](#), 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 atenuadores do tipo placa plana separadora de escoamento. Analisa e compara-se como os principais coeficientes aerodinâmicos variam em função do comprimento da placa plana, do índice de porosidade da placa plana e do número de Reynolds. O objetivo deste estudo é, essencialmente, começar a responder à questão de eficiência dos dispositivos e compreender os mecanismos hidrodinâmicos 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 e trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi empregado o programa, HEXAFEM_3D_IFF ([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. As matrizes do elemento correspondentes são obtidas analiticamente, empregando integração numérica reduzida. A validação do programa para exemplos clássicos com baixos e moderados números de Reynolds pode ser vista em [Bono et al. \(2011b\)](#) e [Cabral et al. \(2012\)](#). Os resultados numéricos obtidos com o presente programa mostraram ótima concordância quando comparados com os resultados numéricos/experimentais obtidos por outros autores.

Embora o programa empregado permita a resolução de problemas tridimensionais, no presente trabalho, os exemplos estudados serão resolvidos como problemas bidimensionais (2-D). O problema 2-D foi modelado geometricamente como um problema tridimensional (1 elemento hexaédrico na direção perpendicular) sendo adotadas as condições de contorno para simular um escoamento bidimensional.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente trabalho foram analisadas as características aerodinâmicas de um cilindro circular (CC) de diâmetro unitário com dispositivos atenuadores/supressores de tipo *splitter plate*. As placas de separação do escoamento estão localizadas a jusante do CC e sobre o eixo longitudinal. Para o presente trabalho foram consideradas os casos de: (a) placa plana sólida e (b) placa plana com furos uniformemente distribuídos. Os dispositivos foram simulados para dois números de Reynolds, $Re = 100$ e 160 . A relação entre o comprimento da placa plana (L) e o diâmetro (D) do CC foi variado entre $L/D = 0, 1.0$ e 2.0 .

Deve-se ressaltar que em todos os casos de placa plana com furos a relação entre área dos furos com relação à placa sem furos é constante e igual a $0,50$. Os exemplos da placa plana com furos são identificados como A1, A2, B1 e B2. A primeira parte da identificação está relacionada ao fato de existir contato entre o CC e a placa plana com furos, os casos que iniciam com a letra "A" identificam que não existe contato entre CC e placa plana e os casos com a letra "B" identificam que sim existe contato. A segunda parte da identificação está relacionada a quantidade de divisões da placa plana, o código com "1" identifica que a placa possui dois furos e código com "2" apresenta quatro furos. Detalhes da geometria e identificação dos casos podem ser vistos na Figura 1.

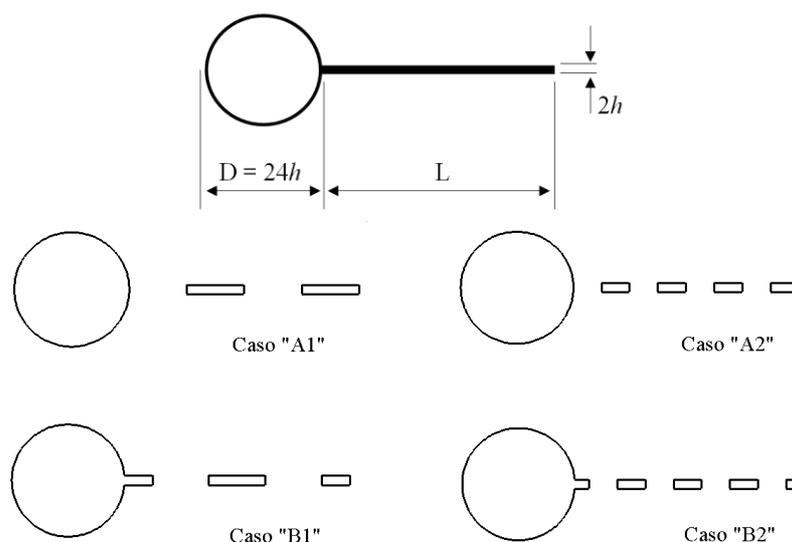


Figura 1: Esquema das geometrias analisadas

O domínio empregado em todos os casos analisados tem dimensões $30 [m] \times 16 [m]$ 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-se encontrados em [Cabral et al. \(2012\)](#). Na Figura 2, mostram-se os detalhes de duas malhas de elementos finitos no caso da placa plana sem furos e com furos. Para todos os casos dos exemplos de placa plana sem furos a quantidade de elementos e de nós varia em torno de 32000 e 65000 , respectivamente. No caso das malhas da placa plana com furos tem-se aproximadamente 58000 elementos e 117000 nós.

Na Figura 3, mostra-se a variação do número de Strouhal (parâmetro adimensional que relacionado à frequência de desprendimento de vórtices) em função da relação entre o comprimento da placa plana e o diâmetro (L/D) para o caso da placa plana sólida. Pode-se observar, que os resultados apresentados mostram uma boa concordância com os resultados apresentados por [Kwon e Choi \(1996\)](#), [Ribeiro et al. \(2004\)](#) e [Nakamura \(1996\)](#).

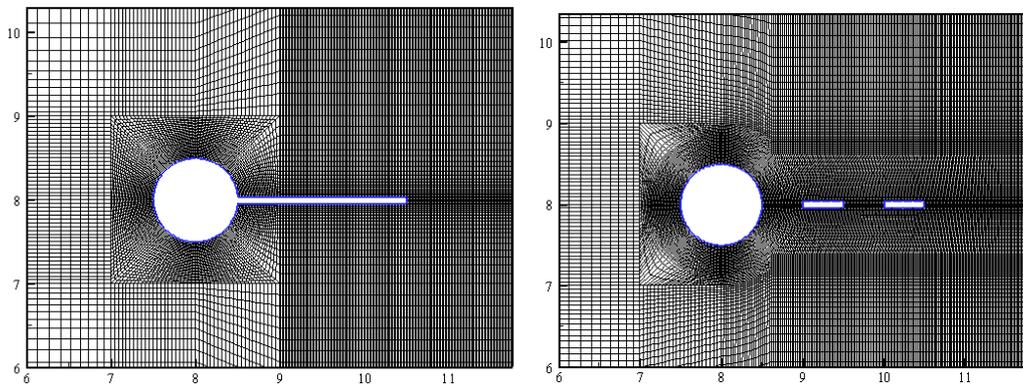


Figura 2: Detalhes de duas das malhas analisadas

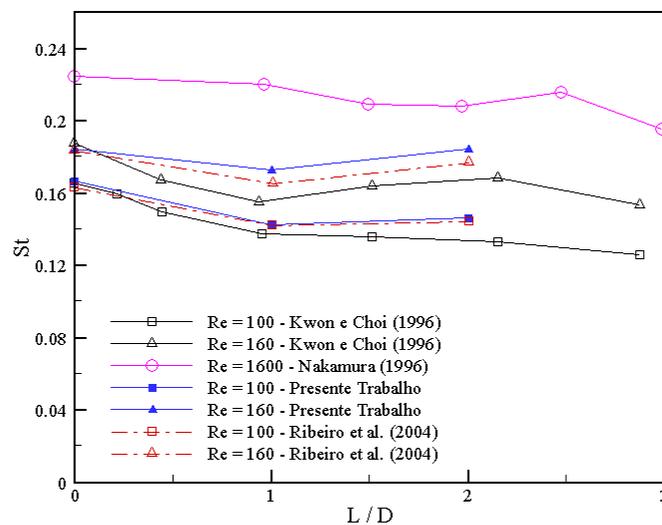


Figura 3: Distribuição do número de Strouhal em função da relação L/D

As curvas de Lissajous para os casos do CC sem placa plana e com a placa plana com furos e números de Reynolds igual a 100 e 160 são mostradas na Figura 4. A partir das figuras podem-se estabelecer relações entre as frequências, amplitudes e fases dos históricos dos coeficientes de sustentação (CL) e arrasto (CD). Com a identificação L1 e L2 representa-se a relação $L/D = 1.0$ e 2.0 , respectivamente.

Pode-se observar que todas as curvas são simétricas com relação à linha $CL = 0$ e mostram a forma típica de "borboleta" que caracteriza que o coeficiente de arrasto possui o dobro da frequência do coeficiente de sustentação. Também, pode-se observar que os sinais dos coeficientes não estão em fase, sendo isto, muito mais evidente para os casos com número de Reynolds igual a 160.

Independentemente do valor da relação L/D da placa plana, observa-se que um aumento no número de Reynolds sempre leva a um incremento na amplitude do CL e a uma redução do valor médio do CD. O comportamento do CL e CD é influenciado pelo comprimento da placa plana. Para o caso de $L/D = 1.0$, pode-se observar que tanto o valor médio do CD e a amplitude do CL mudam segundo o tipo de placa plana furada. As placas planas com um maior número de furos (casos A2 e B2) sempre apresentam um menor valor médio do coeficiente de arrasto em comparação com os casos A1 e B1. O valor do CD médio sempre é

relativamente menor nos casos B. A amplitude do CL permanece praticamente constante para os casos A2 e B2 e se reduz levemente do caso A1 para B1.

Para o caso de $L/D = 2.0$, pode-se observar que o valor médio do CD permanece praticamente o mesmo para os casos A1/B1 e A2/B2. Como no caso anterior, as placas planas com mais furos (casos A2 e B2) sempre apresentam um menor valor médio do CD em comparação com os casos A1 e B1. Também observa-se que amplitude do CL permanece praticamente constante para os casos A2 e B2 e se reduz levemente do caso A1 para B1.

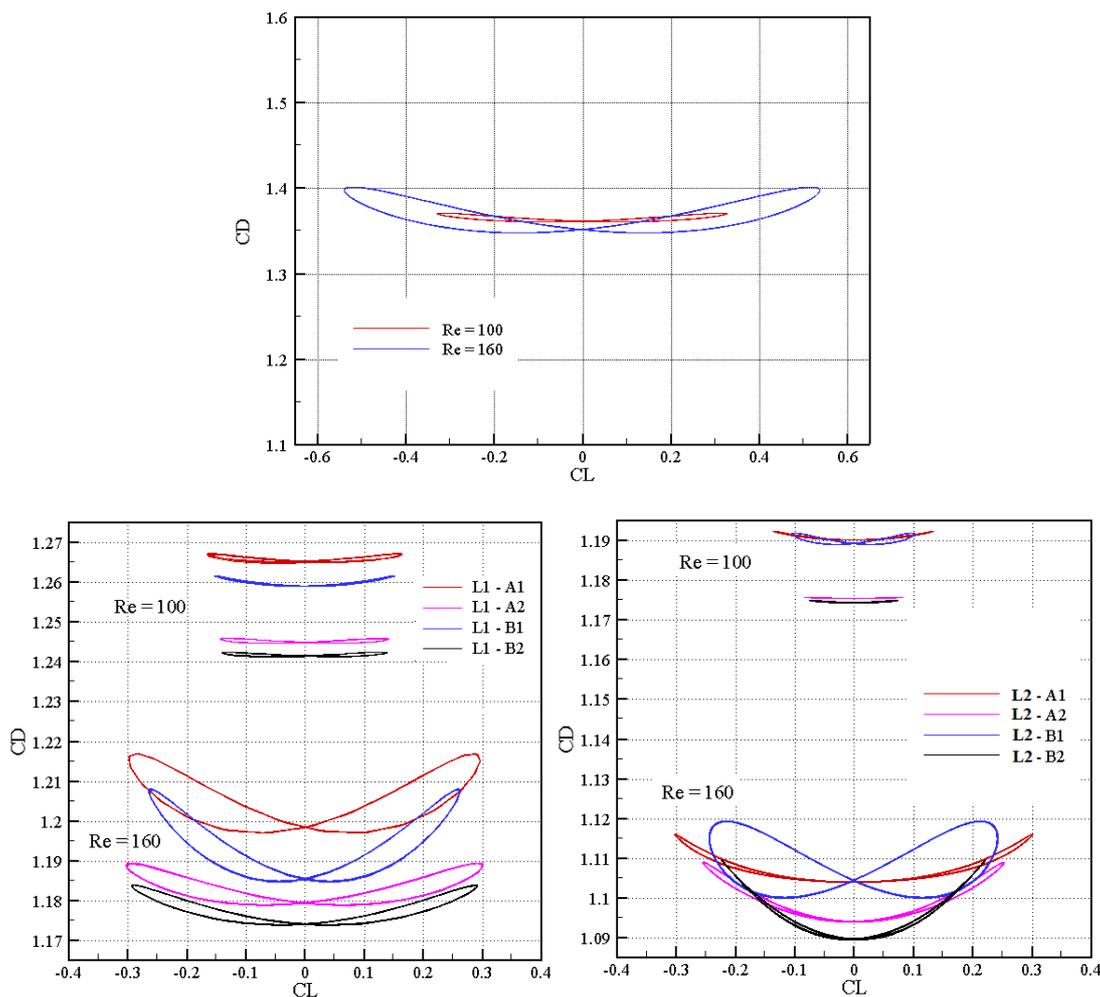


Figura 4: Curvas de Lissajous para o CC sem placa plana (superior) e com placa plana com furos para $Re = 100$ e 160 . O caso L1 representa $L/D = 1.0$ e L2 representa $L/D = 2.0$

Na Figura 5, apresentam-se as distribuições da pressão e as linhas de corrente para o caso do cilindro circular com o dispositivo de tipo *splitter plate* para os números de Reynolds igual a 100 e 160 e a relação L/D igual a 1.0 e 2.0.

Na Figura 6, mostra-se a distribuição do número de Strouhal em função da relação L/D e do número de Reynolds para os casos de placa plana sólida e com furos. Na figura também pode-se ver o número de Strouhal para o caso do CC sem placa separadora ($L/D = 0.0$).

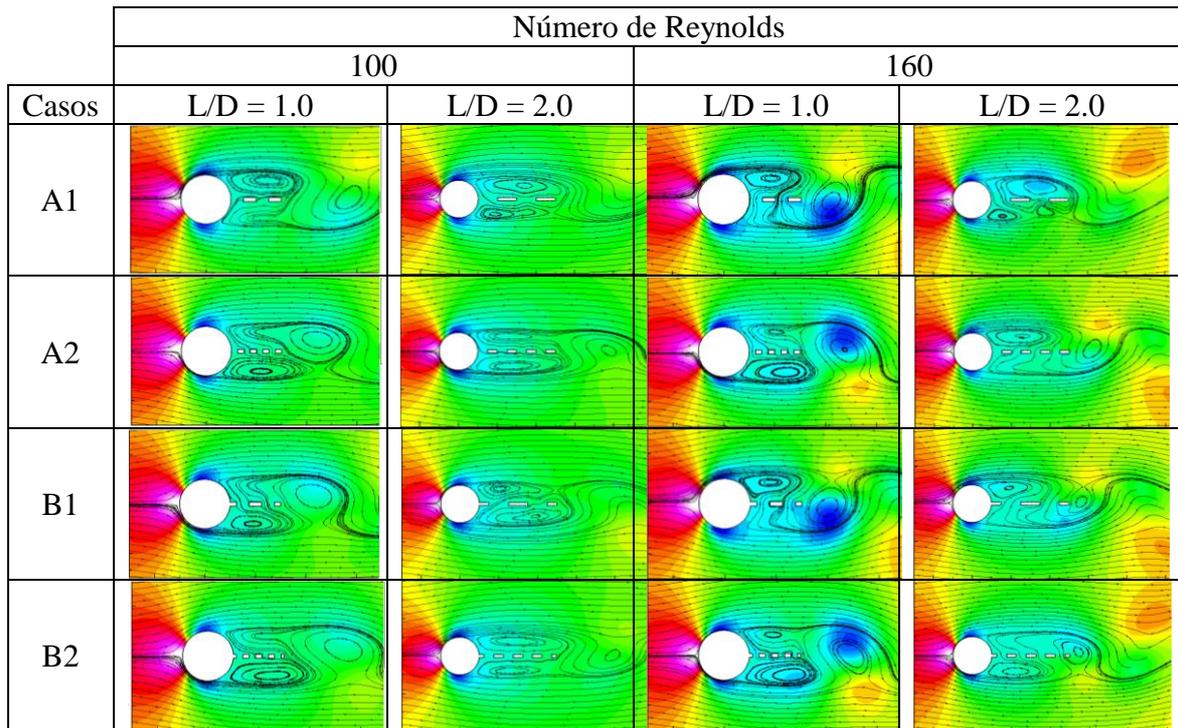


Figura 5: Distribuição da pressão e linhas de corrente para as placas com furos, relações L/D = 1.0 e 2.0 com números de Reynolds Re = 100 e 160. Pressão máxima = 0.50 (cor branca). Pressão mínima = -0.50 (Cor azul)

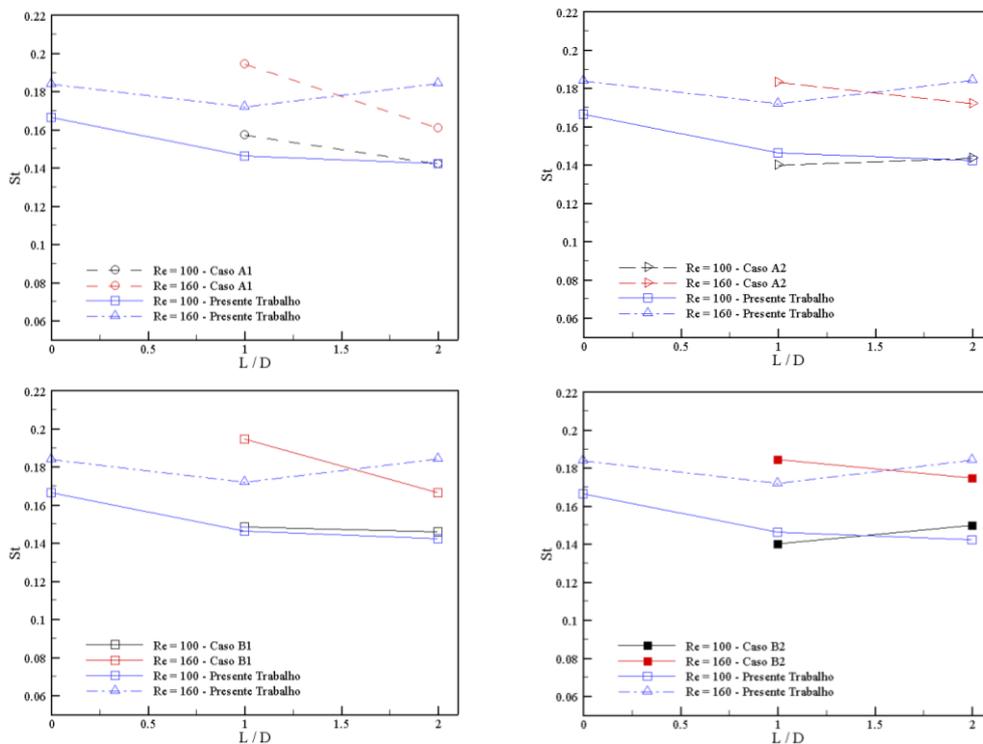


Figura 6: Distribuição do número de Strouhal em função da relação L/D e do número de Reynolds para os casos da placa plana sólida e com furos

Analisando o comportamento do número de Strouhal podem-se concluir como a quantidade de furos e disposição dos mesmo interfere na frequência de despreendimento de vórtices. Para o caso de número de Reynolds igual a 100, pode-se observar que quando se

aumenta o tamanho da placa plana separadora se produz uma leve redução no número de St para os casos A1 e B1, ou seja, para o caso de 2 furos. Para os casos A2 e B2, placa plana com 4 furos, observa-se que o comportamento é totalmente contrario, já que o número de Strouhal aumenta levemente conforme se aumenta a relação L/D.

No caso de número de Reynolds igual a 160, observa-se que sempre se produz uma redução no número de Strouhal quando aumenta-se a relação L/D, independentemente do caso analisado. A redução nos casos A1 e B1 é muito maior em comparação com os casos A2 e B2.

Comparando a distribuição do número de Strouhal entre a placa com furos (A1, A2, B1 e B2) e a placa sólida para o caso de $Re = 160$, pode-se observar que para $L/D = 1.0$ o número de St no caso da placa com furos sempre resulta maior que no caso da placa sólida. Entretanto, isto se inverte para o caso $L/D = 2.0$, ou seja, o número de Strouhal é maior no caso da placa sólida. Os resultados mostram que no caso de querer reduzir a frequência de desprendimento de vórtices para o caso $L/D = 1.0$ resulta mais eficiente empregar uma placa plana sólida, entretanto, para $L/D = 2.0$, resulta mais conveniente empregar uma placa com furos.

No caso de número de Reynolds igual a 100, observa-se que a variação do número de Strouhal entre os resultados da placa sólida e com furos é muito menor em comparação com o caso anterior. O comportamento apresentado entre os diferentes caso varia, precisando portanto no futuro, um estudo mais detalhado.

4 CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi apresentado um estudo paramétrico do comportamento aerodinâmico em atenuadores do tipo placa plana separadora de escoamento. Analisaram-se como os principais coeficientes aerodinâmicos variam em função do comprimento da placa plana, do índice de porosidade da placa plana e do número de Reynolds.

Embora a pesquisa esteja na etapa inicial, pode-se concluir que:

a) Independentemente do valor da relação L/D da placa plana furada, observa-se que um aumento no número de Reynolds sempre leva a um incremento na amplitude do CL e a uma redução do valor médio do CD. O comportamento do CL e CD é fortemente influenciado pelo comprimento da placa plana.

b) Para o caso de número de Reynolds igual a 100, pode-se observar que quando se aumenta o tamanho da placa plana se produz uma leve redução no número de Strouhal para os casos A1 e B1. Entretanto, para os casos A2 e B2, observa-se que o comportamento é totalmente contrario, ou seja, aumenta o número de St conforme se aumenta a relação L/D. No caso de número de Reynolds igual a 160, observa-se que sempre se produz uma redução no número de Strouhal quando aumenta-se a relação L/D, independentemente do caso analisado.

c) Comparando a distribuição do número de Strouhal entre a placa com furos e a placa sólida para o caso de $Re = 160$, pode-se observar que para $L/D = 1.0$ o número de St no caso da placa com furos sempre resulta maior que no caso da placa sólida. Entretanto, isto se inverte para o caso $L/D = 2.0$, ou seja, o número de Strouhal é maior no caso da placa sólida. No caso de $Re = 100$, observa-se que a variação do número de Strouhal entre os resultados da placa sólida e com furos é muito menor em comparação com o caso anterior. O comportamento apresentado entre os diferentes caso varia significativamente.

Futuros trabalhos pretendem continuar aprofundando o entendimento dos mecanismos de controle de escoamento em dispositivos de tipo *splitter plane* com furos. A influência dos modelos de turbulência (LES clássico e dinâmico) também será analisada para exemplos com número de Reynolds maiores.

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.
- 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.
- 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.