

# ESTUDO NUMÉRICO DE ATENUADORES E SUPRESSORES DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES EM CILINDROS CIRCULARES

**Gustavo Bono, Danilo N. Cabral 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, danilodonc@gmail.com, giuliana.franca@gmail.com, <http://www.ufpe.br/caa>*

**Palavras Chave:** Vibrações Induzidas por Vórtices, Atenuadores e supressores, Simulação Numérica.

**Resumo.** Neste trabalho, apresenta-se um estudo paramétrico do comportamento aerodinâmico de dois dos principais dispositivos empregados para reduzir as Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV) em corpos rombudos. Atualmente, os dispositivos de controle passivo de VIV do tipo *strakes* e *fairing* são amplamente empregados na indústria devido a sua boa relação custo/benefício. No presente trabalho, estudam-se como os coeficientes aerodinâmicos variam em função de alguns dos principais parâmetros geométricos que definem a forma dos atenuadores/supressores e do número de Reynolds. No caso do primeiro dispositivo varia-se a disposição e altura dos *strakes* e no dispositivo de tipo *fairing* varia-se a relação de aspecto. O Método dos Elementos Finitos é empregado para resolver as equações de Navier-Stokes. Para a simulação do escoamento turbulento, emprega-se a Simulação de Grandes Escalas (LES). Os resultados obtidos mostram que os dispositivos de tipo *fairing* suprimem ou reduzem a amplitude das oscilações com mínimo arrasto. Por sua vez, nos dispositivos de tipo *strakes* a variação dos ângulos de ataque muda de forma significativa o número de Strouhal, sugerindo que no caso tridimensional este assincronismo dos vórtices romperá a correlação espacial, favorecendo a atenuação de VIV.

## 1 INTRODUÇÃO

O controle do escoamento ao redor de corpos rombudos é muito importante em várias áreas da engenharia e deve-se a suas múltiplas aplicações. Dependendo da relação entre as forças de inércia e forças viscosas atuantes num escoamento, perturbações podem ocorrer causando a formação da esteira de vórtices e a transição à turbulência. O campo de pressão e consequentemente as forças aerodinâmicas resultam afetados pela formação e o desprendimento de vórtices. Como consequência das flutuações de pressão na superfície surge uma força oscilatória transversal ao fluxo, que age sobre o corpo. Se o corpo estiver livre para oscilar e uma das frequências naturais do corpo for próxima da frequência de desprendimento dos vórtices, então esta força fará com que a estrutura comece a vibrar em ressonância. Este fenômeno ressonante é conhecido como Vibrações Induzidas por desprendimento de Vórtices (VIV). A investigação e o melhor entendimento do fenômeno de VIV permite o desenvolvimento de estratégias que objetivam prevenir o colapso estrutural precoce das estruturas envolvidas neste tipo de escoamento. Através do uso de dispositivos que promovem a redução ou eliminação da VIV do escoamento é possível estender a vida útil desses componentes. Como típico dispositivo pode-se mencionar que a técnica mais utilizada para reduzir as vibrações induzidas no caso de cilindros circulares são os *strakes* helicoidais ao longo da superfície da estrutura, de modo a promover um desprendimento de vórtices assíncrono. A utilização de carenagens, *fairings*, em forma semelhante a um aerofólio também é bastante empregada e tem como objetivo evitar o desprendimento do escoamento diminuindo, portanto, as instabilidades.

Nos dispositivos de tipo *strakes* helicoidais insere-se uma saliência ao longo da envergadura do cilindro, a fim, de alterar a separação da camada limite. O dispositivo não tem o objetivo de suprimir o desprendimento de vórtices, mas a sua disposição em forma helicoidal modifica a correlação no desprendimento de vórtices ao longo de sua envergadura. O desprendimento assíncrono de vórtices reduz as vibrações induzidas, diminuindo a amplitude das oscilações. Os principais parâmetros geométricos neste tipo de dispositivos são: a quantidade, a forma, a altura e o passo da saliência.

No dispositivo de tipo *fairing*, o cilindro é coberto por uma carenagem semelhante a um perfil de aerofólio ou acrescenta-se uma carenagem de cauda. A carenagem diminui as instabilidades do escoamento fazendo que o ponto de separação da camada limite se desloque à jusante do corpo, com a consequente redução da região de recirculação da esteira. Isto possibilita diminuir as vibrações e o arrasto na estrutura. Os principais parâmetros geométricos neste tipo de dispositivos são: a forma e o comprimento da carenagem.

No presente trabalho, apresenta-se um estudo paramétrico dos coeficientes aerodinâmicos de alguns métodos passivos para o controle das VIV. Analisa e compara-se o comportamento de um cilindro circular (CC) com duas das técnicas passivas descritas brevemente acima. Particularmente, nos concentraremos nos atenuadores de tipo *strakes* e *fairing*. O objetivo deste estudo é, essencialmente, responder à questão de eficiência dos dispositivos e compreender os mecanismos aerodinâmicos responsáveis pela atenuação de VIV causada por esses tipos de supressores para baixo e moderado número de Reynolds.

O artigo é organizado da seguinte forma: a metodologia que foi empregada no trabalho é apresentado na Seção 2, a validação do programa é dada na Seção 3. Na Seção 4, 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., 2011, 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. O esquema de Taylor-Galerkin (TG) pode ser interpretado como a versão em elementos finitos do método de Lax-Wendroff usado em diferenças finitas. Para a simulação de escoamentos turbulentos, emprega-se a Simulação de Grandes Escalas com os modelos de Smagorinsky clássico e de Smagorinsky dinâmico para as escalas inferiores à resolução da malha. 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.

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 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA

Para a validação do programa analisou-se o escoamento ao redor de um cilindro circular (CC). Emprega-se este exemplo já que existe uma ampla gama de resultados tanto experimentais como numéricos. O estudo de independência de malha foi realizado com três níveis de refinamento de malha, M1, M2 e M3, e para vários números de Reynolds. Os números de elementos/nós nas malhas M1, M2 e M3 são: 9920/4800, 16400/8000 e 26520/13000, respectivamente. O aumento no número de elementos entre as diferentes malhas sempre é maior no sentido circunferencial que no sentido radial.

Para o caso de baixo número de Reynolds,  $Re = 40$ , não existe desprendimento de vórtices, apenas a formação de um par de vórtices simétricos e estacionários à jusante do CC. Na [Tabela 1](#), mostram-se alguns dos principais parâmetros do escoamento obtidos para os três níveis de refinamento. Os parâmetros analisados foram: o ângulo de separação do escoamento ( $\theta_s$ ), o coeficiente aerodinâmico de arrasto ( $CD$ ) e os comprimentos característicos dos vórtices ( $a/D$ ,  $b/D$ ,  $L/D$ ), ver [Figura 1](#). Os resultados obtidos foram comparados com valores experimentais apresentados por [Tritton \(1959\)](#) e [Constanceau et al. \(1997\)](#) e os resultados numéricos de [Rengel et al. \(1999\)](#), [Ding et al. \(2004\)](#) e [Wanderley et al. \(2008\)](#).

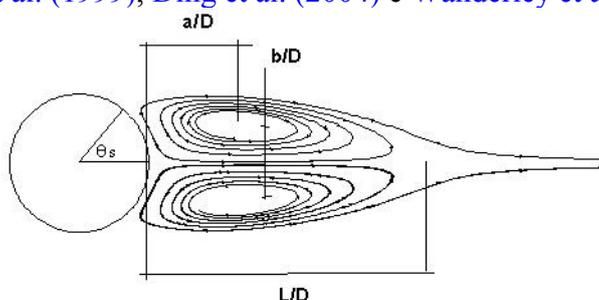


Figura 1: cilindro com par de vórtices simétricos e estacionários e  $Re = 40$

Observa-se na [Tabela 1](#) que os resultados obtidos apresentam uma boa concordância

quando comparado com os resultados apresentados por outros autores. Deve-se ressaltar que devido ao tipo de refinamento empregado entre as diferentes malhas os valores de alguns parâmetros (principalmente os medidos na esteira) não sofrem uma grande variação entre os diferentes níveis de refinamento.

	CD	L/D	a/D	b/D	$\theta_s$
Tritton (1959)	1,57	---	---	---	---
Coutanceau e Bouard (1977)	---	2,13	0,76	0,59	53,5
Rengel et al. (1999)	1,61	2,23	0,72	0,58	54,06
Ding et al. (2004)	1.713	2.20	--	--	53.5
Wanderley et al. (2008)	1,56	2,29	0,73	0,6	53,8
Malha M1	1,663	2,14	0,69	0,58	50,89
Malha M2	1,657	2,15	0,69	0,59	51,74
Malha M3	1,658	2,16	0,7	0,59	52,2

Tabela 1: Comparações de alguns parâmetros do escoamento sobre o CC com  $Re = 40$

Para validar o programa no regime no qual existe desprendimento alternado de vórtices foram analisados os casos no qual o número de Reynolds resulta igual a 100, 200, 500 e 1000. Na [Figura 2](#), mostra-se a variação do número de Strouhal (parâmetro adimensional relacionado à frequência de desprendimento de vórtices) em função do número de Reynolds para os quatro casos analisados no presente trabalho. Os resultados numéricos obtidos com a malha mais refinada (M3) foram comparados com os dados experimentais obtidos por [Roshko \(1954\)](#). Pode-se concluir que os resultados apresentam uma ótima concordância com os resultados experimentais.

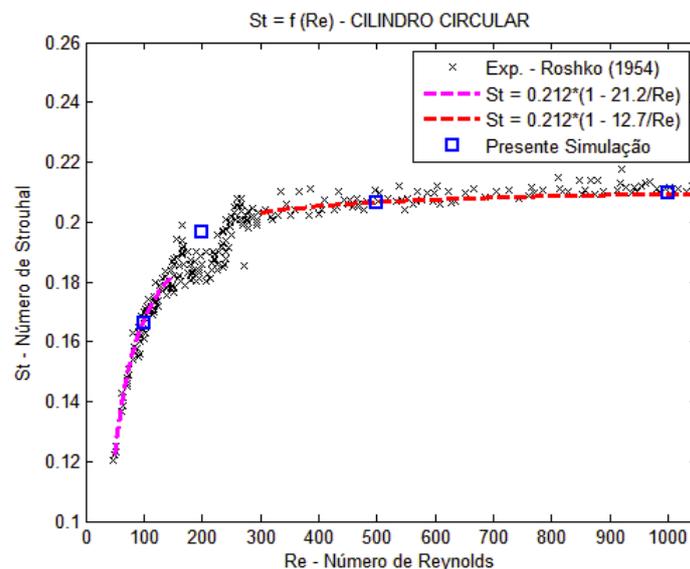


Figura 2: Comparação da variação do número de Strouhal (St) em função do número de Reynolds (Re) entre os resultados experimentais e os obtidos com a malha M3 nos casos de  $Re = 100, 200, 500$  e  $1000$

Na [Tabela 2](#), apresentam-se os valores dos coeficientes de sustentação (amplitude e RMS), de arrasto e número de Strouhal para os quatro casos analisados ( $Re = 100, 200, 500$  e  $1000$ ) empregando a malha M3. Pode-se observar, que os resultados apresentados na [Tabela 2](#) mostram um boa concordância com os resultados apresentados por outros autores ([Ayyappan](#)

e Vengadesan (2008); Baranyi e Lewis (2006); Burbeau e Sagaut (2002); Ding et al. (2004); Evangelinos e Karniadakis (1999); Mittal e Balachandar (1995); Wanderley e Levi (2002); Wanderley et al. (2008)).

Re	Ref.	CL	CL <sub>RMS</sub>	CD	St
100	Presente Simulação	±0.364	0.256	1.412±0.014	0.1663
	Ding et al. (2004)	±0.28	--	1.325±0.008	0.164
	Burbeau e Sagaut (2002)	±0.34	--	1.40	0.167
	Baranyi e Lewis (2006)	--	0.2289	1.340	0.1661
	Wanderley et al. (2008)	±0.25	--	1.30	0.158
200	Presente Simulação	±0.727	0.515	1.393±0.048	0.1967
	Ding et al. (2004)	±0.60	--	1.327±0.045	0.196
	Wanderley et al. (2008)	±0.51	--	1.27	0.187
500	Presente Simulação	±1.009	0.662	1.415	0.2064
	Mittal e Balachandar (1995)	±1.21	--	1.44	--
	Ayyappan e Vengadesan (2008)	--	--	1.085	--
1000	Presente Sim. - Smag.	±1.178	0.841	1.535	0.2095
	Presente Sim. - LES	±1.63	1.091	1.515	0.231
	Evangelinos e Karniadakis (1999)	±1.0696	--	1.5406	0.238
	Wanderley e Levi (2002)	±1.37	--	1.51	0.235
	Wanderley et al. (2008)	±0.22	--	0.96	0.193

Tabela 2: Comparações dos coeficientes aerodinâmicos sobre o CC com Re = 100, 200, 500 e 1000

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente trabalho foram analisadas as características aerodinâmicas de cilindros circulares com dispositivos atenuadores/supressores de tipo *fairing* e *strakes*. Os dispositivos foram simulados para quatro números de Reynolds, Re = 100, 200, 500 e 1000. Nos casos de Re = 500 e 1000 foi empregado o modelo de turbulência de Smagorinsky clássico (Bono et al., 2011, Bono et al., 2011a).

No caso do dispositivo de tipo *fairing* foi analisado como influencia nos principais coeficientes aerodinâmicos a relação entre o comprimento da carenagem (L) e a altura do mesmo (D), ver Figura 3. As relações L/D estudadas foram 1.5, 2.0, 3.0 e 4.0.

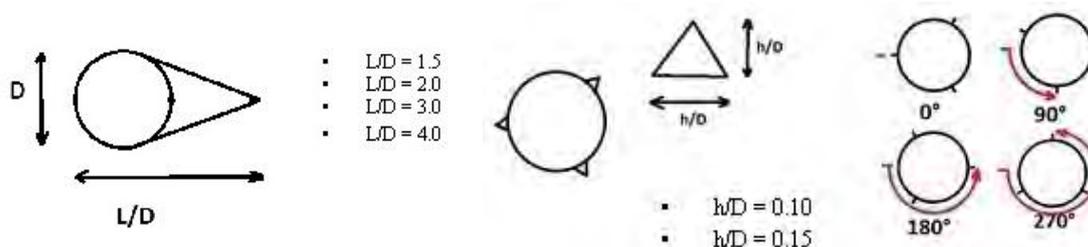


Figura 3: Esquema das geometrias analisadas. *Fairings* com L/D = 1.5, 2.0, 3.0 e 4.0. *Strakes* com h/D = 0.10 e 0.15 e os quatro ângulos de incidência

Os dispositivos de tipo *strakes* apresentam três saliências igualmente espaçadas, as mesmas foram modeladas como triângulos isósceles com a mediatriz e a base do triângulo igual a h/D, ver Figura 3. As relações estudadas foram h/D = 0.10 e 0.15. O ângulo de incidência ( $\alpha$ ) da corrente não perturbada com relação à disposição dos *strakes* também é um parâmetro

importante devido à simulação ser tratada como bidimensional. Os quatro ângulos de incidência analisados foram:  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ , ver [Figura 3](#).

Na geração da malha de elementos finitos, os elementos foram concentrados na região da camada limite e das saliências. O número de elementos (*nelem*) e de nós (*nno*) para todos os casos estudados são mostrados nas [Tabela 3](#) e [Tabela 4](#).

dispositivo <i>Strakes</i> com $h/D = 0.10$					dispositivo <i>Strakes</i> com $h/D = 0.15$				
$\alpha$	$0^\circ$	$90^\circ$	$180^\circ$	$270^\circ$	$\alpha$	$0^\circ$	$90^\circ$	$180^\circ$	$270^\circ$
<i>nelem</i>	8650	8150	8650	8150	<i>nelem</i>	8650	8150	8650	8150
<i>nno</i>	17770	16770	17770	16770	<i>nno</i>	17800	16800	17800	16800

Tabela 3: Dados das malhas para os dispositivos de tipo *strakes*

dispositivo <i>Fairing</i>				
	L/D = 1.5	L/D = 2.0	L/D = 3.0	L/D = 4.0
<i>nelem</i>	5730	6790	7150	7080
<i>nno</i>	11806	13958	14680	14506

Tabela 4: Dados das malhas para os dispositivos de tipo *fairing*

Na [Figura 4](#), mostra-se a distribuição de pressão e as linhas de corrente para o caso do CC com dispositivo de tipo *fairing* para  $Re = 100$  e  $1000$ . Para ter um melhor entendimento de como influencia a relação de aspecto (L/D) no *fairing*, também foram incluídas na figura, o CC e o perfil aerodinâmico NACA 0012.

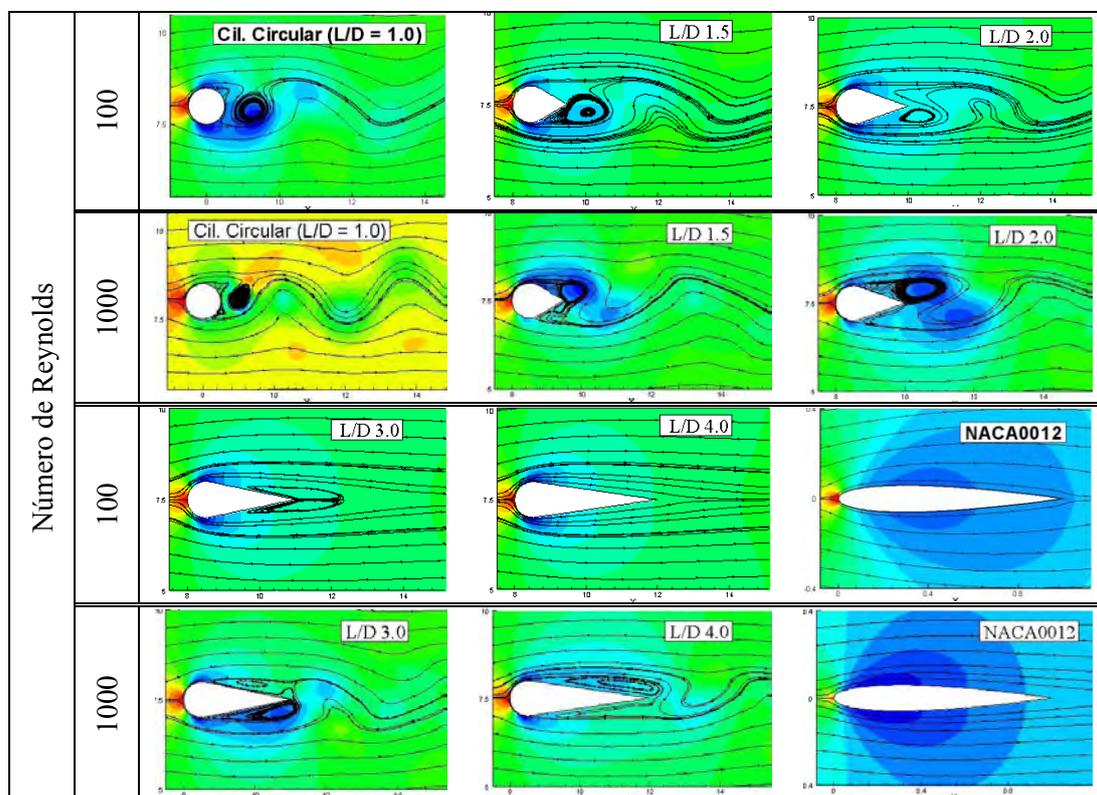


Figura 4: Distribuição da pressão e linhas de corrente para o CC, o CC com dispositivos de tipo *fairing* e o aerofólio NACA0012 com  $Re = 100$  e  $1000$

Analisando a figura, pode-se observar que para o caso de  $Re = 100$ , à medida que se aumenta o comprimento ( $L$ ) do *fairing* o ponto de separação desloca-se a jusante diminuindo ou suprimindo totalmente a região de separação. Para  $L/D = 3.0$ , observa-se a formação de um par de vórtices estacionários os quais desaparecem totalmente para  $L/D = 4.0$ . No caso de  $Re = 1000$ , pode-se verificar que para a relação  $L/D = 3.0$ , as instabilidades no escoamento impedem a formação de um par de vórtices estacionários tal como existe para o caso de  $Re = 100$ . Também, observa-se que a relação  $L/D = 4.0$ , mostra menos eficiência na supressão dos vórtices quando comparado ao caso com  $Re = 100$ .

As distribuições dos coeficientes de sustentação ( $CL$ ) e de arrasto ( $CD$ ) em função do tempo para o dispositivo de tipo *fairing* com  $Re = 100$ , são mostrados na Figura 5. Pode-se observar que o incremento na relação  $L/D$  diminui a amplitude no coeficiente de sustentação, sendo nula para os casos de  $L/D$  iguais a 3.0 e 4.0. O coeficiente de arrasto diminui constantemente com o aumento da relação  $L/D$ .

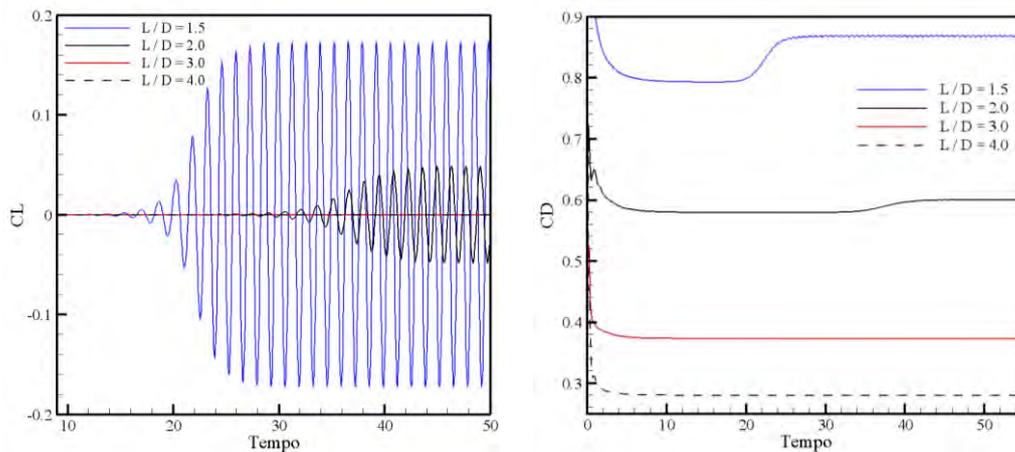


Figura 5: Distribuições dos coeficientes de sustentação e de arrasto em função do tempo para o CC com dispositivo de tipo *fairing* no caso de  $Re = 100$

Na Figura 6, mostram-se o valor da amplitude do coeficiente de sustentação ( $CL$ ) e o número de Strouhal ( $St$ ) para os diferentes números de Reynolds ( $Re$ ) e relação de aspecto ( $L/D$ ) analisados no caso do dispositivo de tipo *fairing*. O caso com  $L/D = 1.0$  se refere ao CC sem *fairing*.

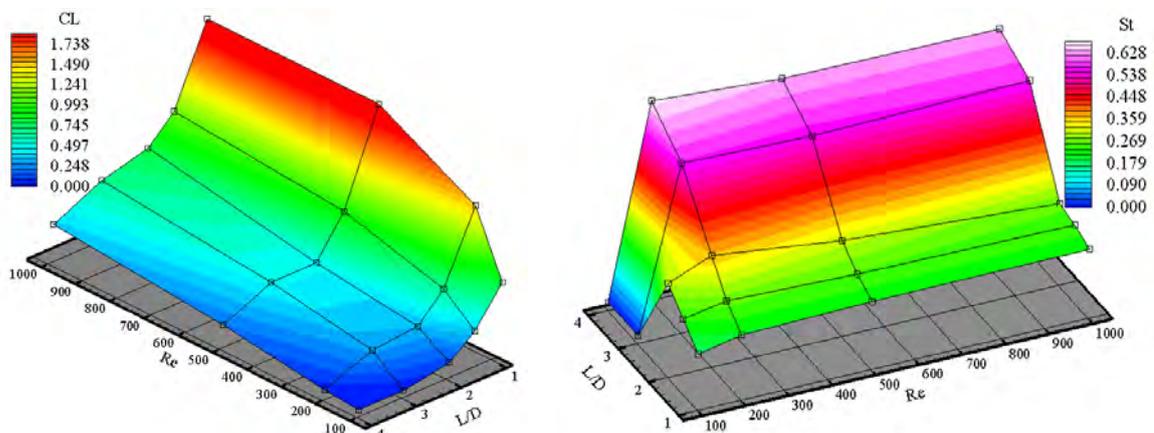


Figura 6: Distribuição dos coeficientes de sustentação ( $CL$ ), de arrasto ( $CD$ ) e número de Strouhal ( $St$ ) para os diferentes números de Reynolds e relação  $L/D$  analisados.

Observa-se que independentemente do número de Reynolds, sempre diminui o valor do coeficiente de sustentação quando se aumenta a relação L/D. A análise do desprendimento de vórtices pode ser feita a partir da superfície que mostra a variação do número de Strouhal. Os vórtices são suprimidos totalmente no caso de baixo número de Reynolds ( $Re = 100$ ) e relações  $L/D = 3.0$  e  $4.0$ , para o resto dos casos analisados sempre existe desprendimento alternado de vórtices.

Na **Figura 7**, mostra-se o mecanismo de formação e desprendimento de vórtices no caso do CC com *strakes* de altura,  $h/D = 0.15$ , ângulo de incidência igual a  $0^\circ$  e número de Reynolds,  $Re = 100$ . Na figura, também se mostram as variações dos coeficientes de sustentação (CL) e de arrasto (CD) para um pequeno intervalo de tempo.

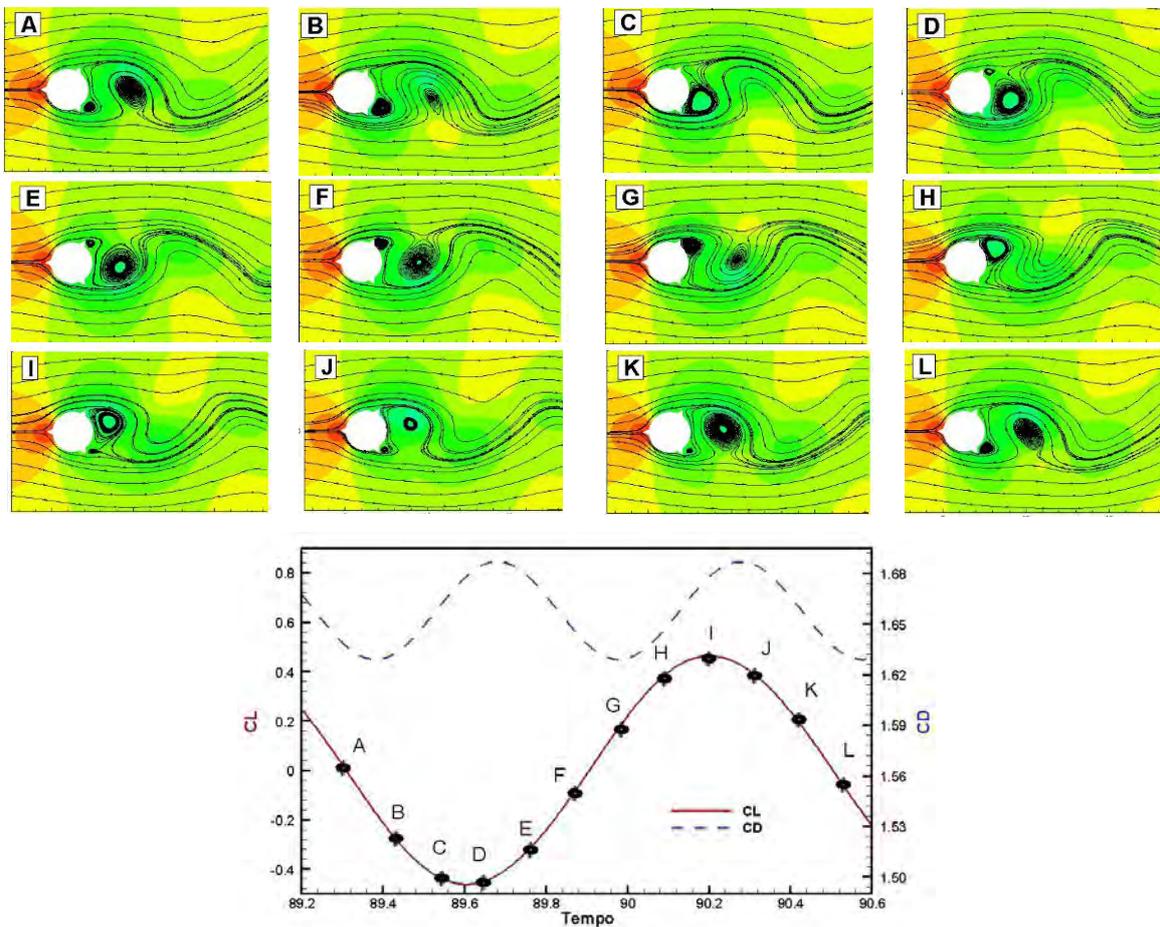


Figura 7: Sequência de formação e desprendimento de vórtices e distribuição dos coeficientes de sustentação e de arrasto para caso de *strakes* com  $h/D = 0.15$  e  $Re = 100$

Das figuras, pode-se observar que no intervalo de tempo entre “A” e “C” há um crescimento do vórtice na parte inferior do CC, e conseqüentemente uma diminuição do coeficiente de sustentação. No intervalo de tempo entre “C” e “E”, acontece o crescimento do vórtice inferior até o tamanho máximo e o desprendimento do mesmo do CC. Simultaneamente, também aconteceu a formação de um vórtice na parte superior do CC. Neste intervalo obtém-se o mínimo valor do CL. O crescimento do vórtice na parte superior ocorre entre o intervalo de tempo “E” e “H” conjuntamente com o aumento do coeficiente de sustentação. Entre os intervalos de tempo “H” e “K”, acontece o crescimento e desprendimento do vórtice superior e a formação do vórtice na parte inferior. Neste intervalo

obtém-se o máximo valor do CL. O vórtice inferior aumenta seu tamanho entre o intervalo “K” e “L”, diminuindo o valor de CL. Pode-se observar que a partir deste ponto o comportamento descrito acima se repete de forma cíclica.

A frequência de oscilação no coeficiente de sustentação é dada pela frequência de desprendimento de vórtices, ou seja, pela emissão de vórtices de ambos os lados do CC. Por sua vez, a frequência do coeficiente de arrasto resulta o dobro da frequência do CL devido a que o ciclo do CD é governado pela queda de pressão de base que acontece quando os vórtices são desprendidos de um dos lados do CC.

Na [Figura 8](#), comparam-se as distribuições dos coeficientes aerodinâmicos (CL e CD) em função do tempo para o dispositivo de tipo *strakes* com altura  $h/D = 0.15$  e  $Re = 100$ , para os diversos ângulos de ataque analisados. Observa-se que os coeficientes de sustentação no caso dos ângulos de incidência  $90^\circ$  e  $270^\circ$  são de sinais contrários, isso se deve a falta de simetria do corpo em relação ao escoamento. Essa assimetria gera uma força resultante sobre o corpo diferente de zero. A máxima região de separação obtém-se para o caso de  $\alpha = 180^\circ$ , para esta disposição geométrica têm-se o máximo valor do coeficiente de arrasto e o máximo valor da amplitude do coeficiente de sustentação. O caso de  $\alpha = 0^\circ$  apresenta a menor região de separação e, por conseguinte os menores valores nos coeficientes aerodinâmicos. Observa-se que os coeficientes de arrasto médio e o valor da amplitude no CL para os casos de  $\alpha = 0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $270^\circ$  são muito similares. Entretanto, o coeficiente de sustentação médio resulta nulo para  $\alpha = 0^\circ$  e  $180^\circ$ , positivo para  $\alpha = 90^\circ$  e negativo para  $\alpha = 270^\circ$ .

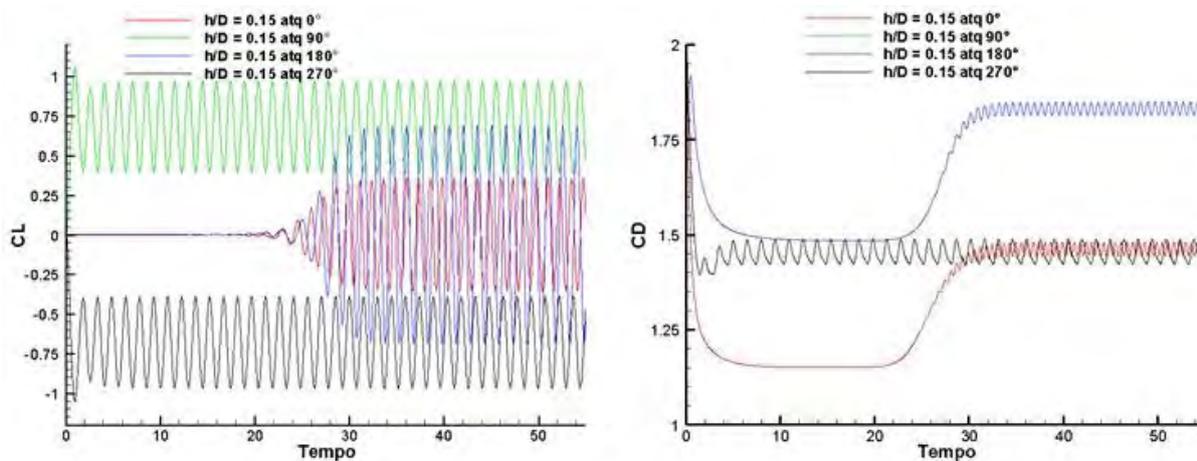


Figura 8: Coeficientes de sustentação e de arrasto para o CC com *strakes* no caso de  $h/D = 0.15$  e  $Re = 100$

Pelo fato da análise do CC com *strakes* ser de caráter bidimensional, não se podem obter conclusões com relação à redução da VIV no caso tridimensional, mas é possível mostrar que existe uma falta de sincronismo no desprendimento de vórtices quando se variam os ângulos de ataque. Isto pode ser visto na [Figura 9](#), analisando o comportamento do número de Strouhal para o caso do CC com *strakes* de altura  $h/D = 0.10$  e  $0.15$ . Os coeficientes de arrasto médio e o valor da amplitude no CL são mostrados também na [Figura 9](#) para as duas relações  $h/D$  estudadas. Observa-se que a maior dispersão dos valores do número de Strouhal e os máximos valores nos coeficientes sempre são obtidos para a maior altura de *strakes* ( $h/D = 0.15$ ). Os valores dos coeficientes de sustentação e arrasto sempre são maiores para os casos com  $\alpha = 180^\circ$ , independentemente da altura do *strakes*.

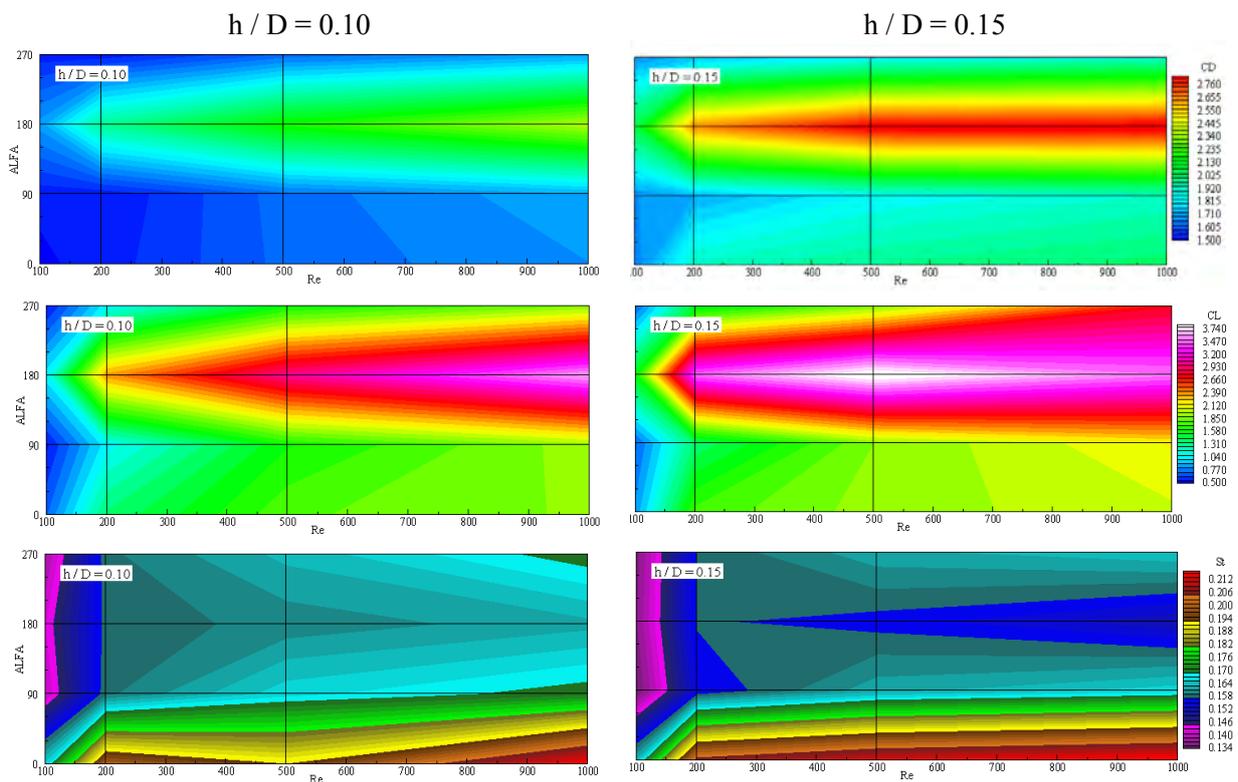


Figura 9: Distribuição do coeficiente de arrasto (CD), coeficiente de sustentação (CL) e número de Strouhal (St) para o caso do CC com *strakes* de altura  $h/D = 0.10$  e  $0.15$

## 5 CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi apresentado um estudo paramétrico do comportamento aerodinâmico dos dispositivos atenuadores de Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV) em corpos rombudos de tipo *fairing* e *strakes*. Analisaram-se como os coeficientes aerodinâmicos (CL, CD e St) variam em função de alguns dos principais parâmetros geométricos que definem a forma dos dispositivos para números de Reynolds baixos e moderados.

As principais conclusões são dadas a seguir:

- O dispositivo de tipo *fairing*, mostra-se muito eficiente na redução da amplitude do coeficiente de sustentação (oscilações no sentido transversal do escoamento). Incluso, para baixo número de Reynolds ( $Re = 100$ ) foi possível suprimir as oscilações. Observa-se que a redução na amplitude do coeficiente de sustentação com o aumento da relação  $L/D$  sempre é acompanhada de uma redução significativa no coeficiente de arrasto. Embora, o dispositivo de tipo *fairing* mostre-se como um excelente atenuador de VIV, deve ser levado em consideração que a relação  $L/D$  não pode ser aumentada indefinidamente, devido a que os custos de fabricação e instalação influenciarão negativamente na relação custo/benefício.
- O dispositivo de tipo *strake*, embora tratados de forma bidimensional, sugerem que serão muito eficientes em romper a correlação espacial entre os vórtices, favorecendo a atenuação de VIV. Os três parâmetros aerodinâmicos analisados variam consideravelmente em função dos ângulos de ataque. As variações entre os valores máximos e mínimos são mais acentuadas no caso de *strakes* com altura  $h/D = 0.15$ .

Futuros trabalhos pretendem aprofundar o entendimento dos mecanismos de controle de escoamento em dispositivos modelados tridimensionalmente e a influência dos modelos de turbulência (LES clássico e dinâmico).

## 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

- Ayyappan, T. e Vengadesan, S., Influence of staggering angle of a rod on flow past a circular cylinder, *J. Fluids Engineering* 130(3) (2008), pp. 1-11.
- Baranyi, L. e Lewis, R.I., Comparison of a grid-based CFD method and vortex dynamics predictions of low Reynolds number cylinder flows, *The Aeronautical J.* (2006), pp. 63-71.
- 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. Solução numérica de escoamentos incompressíveis com Simulação de Grandes Escalas, *Mecânica Computacional Vol. XXX* (2011a), pp. 1423-1440.
- Burbeau, A. e Sagaut, P., Simulation of a viscous compressible flow past a circular cylinder with higher-order discontinuous Galerkin methods, *Comput. Fluids* 31 (2002), pp. 887-889.
- Coutanceau, M., Bouard, R., Experimental determination of the main features of viscous flow in the wake of a circular cylinder in uniform translation. Part 1. Steady flow. *Journal of Fluid Mechanics* 79(2) (1977), pp.231–256.
- Ding, H., Shu, C., Yeo, K.S. e Xu, D., Simulation of incompressible viscous flow past a circular cylinder by hybrid FD scheme and meshless least square-based finite difference method, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 193 (2004), pp. 727-744.
- Evangelinos, C. e Em Karniadakis, G., Dynamics and flow structures in the turbulent wake of rigid and flexible cylinders subject to VIV, *J. Fluid Mechanics* 400 (1999), pp. 91-124.
- Mittal, R. e Balachandar, S., Effect of three-dimensionality on the lift and drag of nominally two-dimensional cylinders, *Phys. Fluids* 7(8) (1995), pp. 1841-1865.
- Rengel, J.E., Sphaier, S.H., A projection method for unsteady Navier–Stokes equation with FVM and collocated grid. *Hybrid Methods in Heat and Mass Transfer* 1 (1999), 4.
- Roshko, A., On the development of turbulent wakes from vortex streets. *NACA Report 1191, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), 1954.*
- Tritton, D.J., Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics* 6 (1959), pp.547–567.
- Wanderley, J.B.V. e Levi, C.A., Validation of a finite difference method for the simulation of VIV on a circular cylinder, *Ocean Engineering* 29 (2002), pp. 445-460.
- Wanderley, J.B.V., Souza, G.H.B., Sphaier, S.H. e Levi, C., Vortex-induced vibrations of an elastic mounted circular cylinder using an upwind TVD two-dimensional numerical scheme, *Ocean Engineering* 35 (2008), pp. 1533-1544.