

ESTUDO PARAMÉTRICO DE DISPOSITIVOS DE CONTROLE PASSIVO DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES

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

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

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 ($h/D = 0.10$ e 0.15) dos *strakes* e no dispositivo de tipo *fairing* varia-se a relação de aspecto ($L/D = 1.50, 2.0, 3.0$ e 4.0). 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 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. Por sua vez, nos dispositivos de tipo *fairing* observa-se que os mesmos suprimem ou reduzem a amplitude das oscilações com mínimo arrasto.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria do petróleo no Brasil enfrenta novos desafios com a descoberta de hidrocarbonetos na camada pré-sal. Uma maior rentabilidade destas reservas somente será possível com o desenvolvimento de novas tecnologias em laminais d'água profundas e ultraprofundas.

No final de 2010, segundo dados da Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2011), as reservas totais de petróleo de Brasil foram contabilizadas em 28,5 bilhões de barris. Considera-se como reserva total o somatório de reservas provadas, prováveis e possíveis. Das reservas provadas, 93,6% se localizavam em mar e 6,4% se situavam em terra. No tocante ao gás natural, as reservas provadas chegaram a 423 bilhões m³. Similarmente ao petróleo, a maior parte (83,7%) das reservas provadas de gás natural se encontrava em reservatórios marítimos. As porcentagens acima mostram claramente que a maioria das reservas de petróleo e gás natural no Brasil se localiza em campos *offshore*.

Os *risers* são peças fundamentais dentro da indústria de petróleo *offshore*. Os mesmos são tubulações esbeltas de seções circulares empregadas para interligar o poço de petróleo no fundo do mar com a plataforma ou navio e podem ser divididos em flexíveis e rígidos dependendo do tipo de operação (perfuração, produção, etc.).

Quando um corpo não aerodinâmico, como um *riser*, está imerso num fluido em movimento acontece a separação da camada limite em uma porção considerável de sua superfície. Dependendo da relação entre as forças de inércia e forças viscosas atuantes neste escoamento, perturbações podem ocorrer causando a formação da esteira de vórtices e a transição à turbulência. O campo de pressão e conseqüentemente as forças aerodinâmicas (sustentação e arrasto) resultam afetados pela formação e o desprendimento de vórtices.

Como conseqüência 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 fosse 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).

Os *risers* podem apresentar severos problemas de fadiga devido à vibração induzida pelos movimentos da plataforma, ondas e correnteza. A ocorrência de VIV nos *risers* pode ocasionar movimentos de grande amplitude, portanto devem ser evitados a fim de não comprometer o funcionamento do sistema, ou até em condições extremas provocar o colapso.

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 exemplo na indústria do petróleo pode-se mencionar que a técnica mais utilizada para reduzir as vibrações induzidas no caso de *risers* cilíndricos são os *strakes* helicoidais ao longo da superfície da estrutura, de modo a promover um desprendimento de vórtices assíncrono. A utilização de carenagens, *fairing*, 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 (ver Figura 1), 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.

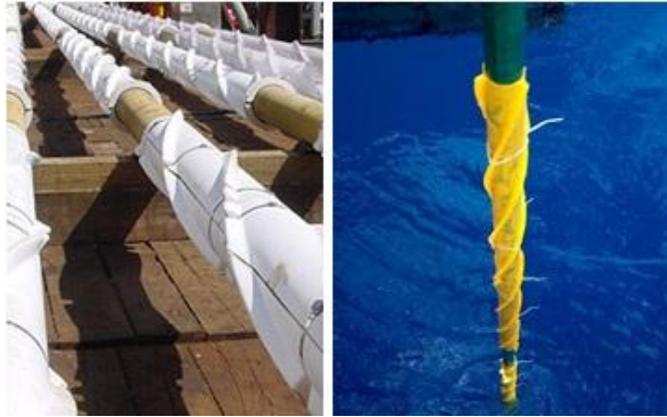


Figura 1: Riser com dispositivo tipo *Strakes Helicoidais* (fonte: vivsolutions.com)

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, ver Figura 2. A carenagem diminui as instabilidades do escoamento fazendo que o ponto de separação da camada limite se desloque à jusante do corpo, com a conseguinte 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.



Figura 2: Riser com dispositivo tipo *Fairing* (fonte: vivsolutions.com)

No presente trabalho, apresenta-se um estudo paramétrico dos coeficientes aerodinâmicos de alguns métodos passivos para o controle das Vibrações Induzidas por geração e desprendimento de Vórtices (VIV). Analisa e comparar-se o comportamento de um cilindro circular 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 hidrodinâmicos responsáveis pela atenuação de VIV causada por 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, 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

Na atualidade, os programas baseados na Dinâmica dos Fluidos Computacional permitem a simulação de escoamentos ao redor de configurações complexas nas mais diversas áreas da engenharia. Para o desenvolvimento do presente trabalho foi empregado o programa, HEXAFEM_3D_IFF (Bono et al., 2011), 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 (experimentais e numéricos) obtidos por outros autores. 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. O aumento no número de elementos entre as diferentes malhas sempre é maior no sentido circunferencial que no sentido radial.

Na Tabela 1, mostram-se para cada malha o número de elementos (*nelem*) e o número de nós (*nno*).

| Malha | <i>Nelem</i> | <i>nno</i> |
|-------|--------------|------------|
| M1 | 9920 | 4800 |
| M2 | 16400 | 8000 |
| M3 | 26520 | 13000 |

Tabela 1: Dados das malhas e principais parâmetros

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 2, mostram-se alguns dos principais parâmetros do escoamento obtidos para os três níveis de refinamento. Os parâmetros geométricos analisados, ver Figura 3, foram: comprimento até o centro dos vórtices (a/D), distância entre os centros dos vórtices (b/D), comprimento total dos vórtices (L/D) e ângulo de separação do escoamento (θ_s) e como parâmetro aerodinâmico analisa-se o coeficiente aerodinâmico de arrasto (CD). 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).

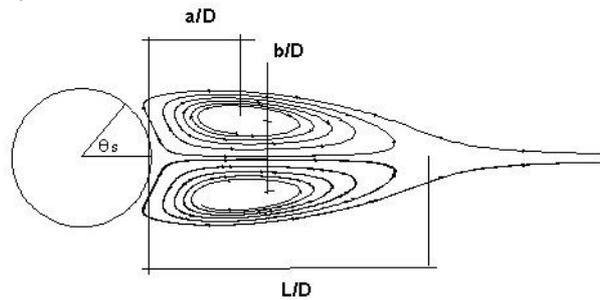


Figura 3: cilindro com par de vórtices simétricos e estacionários e $Re = 40$

Observa-se na Tabela 2 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.

Para números de Reynolds superior a aproximadamente 50 acontece a transição do regime de esteira fechada para o de esteira periódica devido ao aparecimento da primeira instabilidade. Esta instabilidade dá início ao desprendimento alternado de vórtices na esteira do CC, formando a chamada esteira de vórtices de von Kármán. O regime laminar de esteira periódica acontece no intervalo entre $50 < Re < 200$. No intervalo entre $350 < Re < 3 \times 10^5$ acontece o denominado regime subcrítico de geração de vórtices, onde observa-se a transição nas camadas cisalhantes, sendo que a camada limite sobre a superfície do cilindro permanece laminar. 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 $Re = 100, 200, 500$ e 1000 .

| | CD | L/D | a/D | b/D | θ_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 2: Comparações de alguns parâmetros do escoamento sobre o CC com $Re = 40$

Na Figura 4, 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.

Na Tabela 3, 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 3

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)).

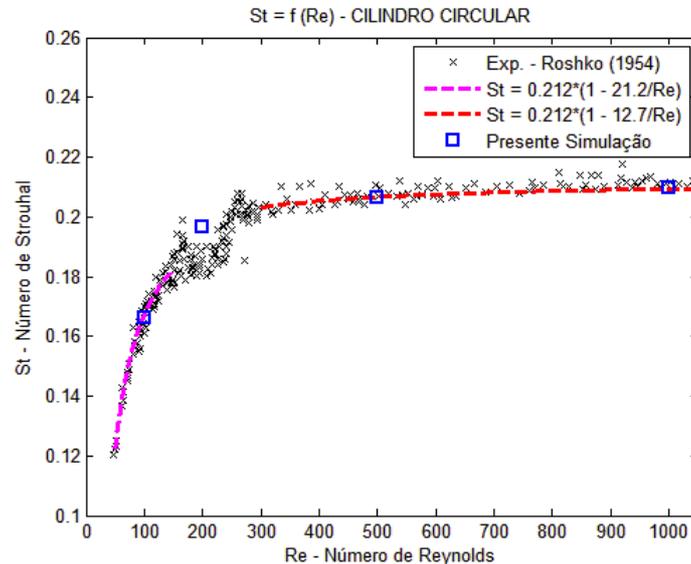


Figura 4: Comparação da variação do número de Strouhal (St) em função do número de Reynolds (Re) entre os resultados experimentais e os obtidos com a malha M3 nos casos de $Re = 100, 200, 500$ e 1000

| Re | Ref. | CL | CL _{RMS} | 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 3: 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).

No caso do dispositivo de tipo *fairing* foi analisado como influência nos principais coeficientes aerodinâmicos a relação entre o comprimento da carenagem (L) e a altura do mesmo (D), ver Figura 5. As relações L/D estudadas foram 1.5, 2.0, 3.0 e 4.0.

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 5. As relações estudadas foram h/D = 0.10 e 0.15. O ângulo de incidência (α) 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°, 90°, 180° e 270° (ver Figura 5). Geralmente, na indústria para facilitar o processo de fabricação as saliências são de forma retangular ou triangular, neste trabalho foi empregado o formato triangular a fim de facilitar a etapa de pré-processamento.

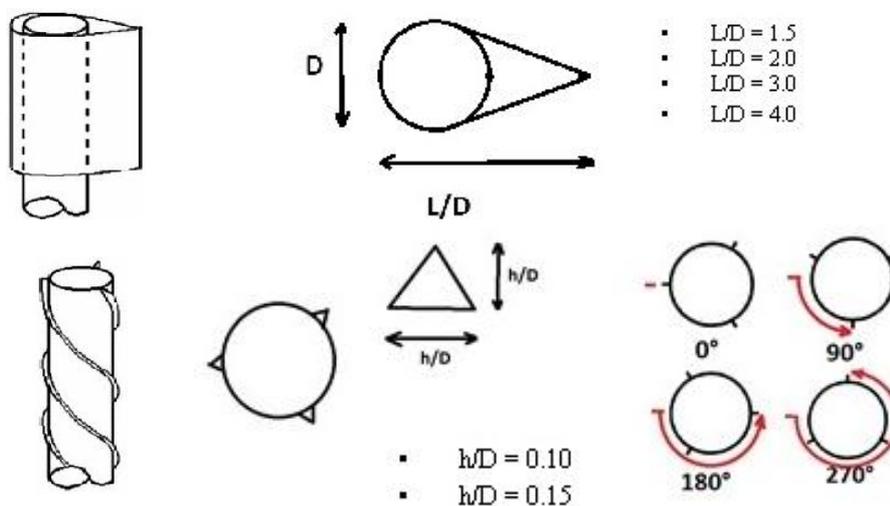


Figura 5: Esquema das geometrias analisadas. *Fairing* com L/D = 1.5, 2.0, 3.0 e 4.0. *Strakes* com h/D = 0.10 e 0.15 e os quatro ângulos de incidência

O domínio empregado é o mesmo em todos os casos analisados e tem dimensões 25 [m] x 15 [m], na entrada prescreve-se uma velocidade uniforme igual a 1.0 [m/s.] O número de elementos (*nelem*) e de nós (*nno*) para todos os casos estudados são mostrados nas Tabela 4 e Tabela 5.

| Dispositivo <i>Strakes</i> com h/D = 0.10 | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| α | 0° | 90° | 180° | 270° |
| <i>nelem</i> | 8650 | 8150 | 8650 | 8150 |
| <i>nno</i> | 17770 | 16770 | 17770 | 16770 |

| Dispositivo <i>Strakes</i> com h/D = 0.15 | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| α | 0° | 90° | 180° | 270° |
| <i>nelem</i> | 8650 | 8150 | 8650 | 8150 |
| <i>nno</i> | 17800 | 16800 | 17800 | 16800 |

Tabela 4: 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 5: Dados das malhas para os dispositivos de tipo *fairing*

Nas **Figura 6** e **Figura 7**, mostram-se as malhas nas proximidades dos dispositivos. Observe-se que os elementos foram concentrados na região da camada limite e das saliências. Dependendo do exemplo analisado, o incremento de tempo empregado variou entre $9.7 \times 10^{-5} < \Delta t < 2.0 \times 10^{-4}$.

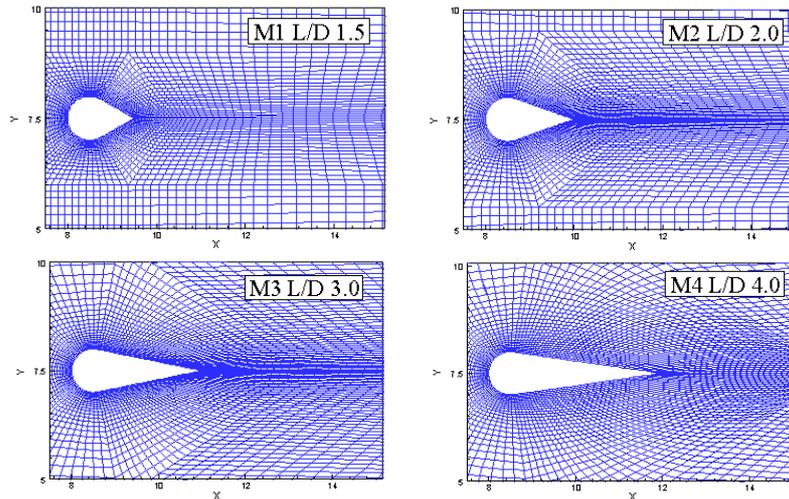


Figura 6: Malhas empregadas para o dispositivo do tipo *fairing*

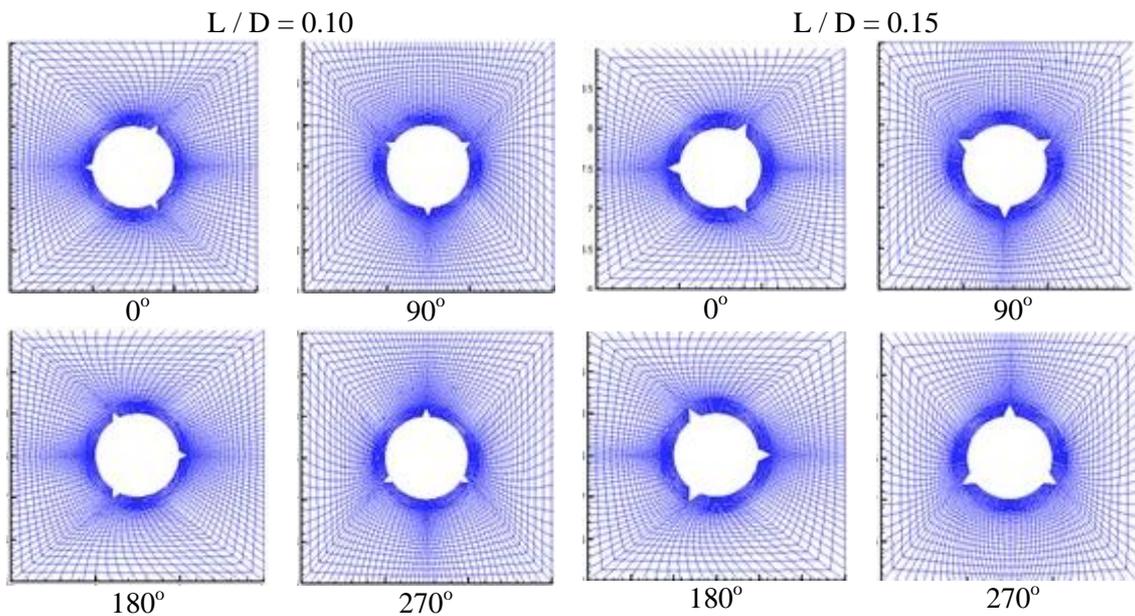


Figura 7: Malhas empregadas para o dispositivo do tipo *strakes*

Na **Figura 8**, mostra-se a distribuição de pressão e as linhas de corrente para o caso do cilindro circular com dispositivo de tipo *fairing* para $Re = 100$. Para ter um melhor entendimento de como influencia a relação de aspecto (L/D) no *fairing*, também foram incluídas na figura, o cilindro circular e o perfil aerodinâmico NACA 0012.

Analisando a figura, pode-se observar que à medida que se aumentava 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 $L/D = 4.0$.

Comparando as distribuições de pressão entre o perfil aerodinâmico NACA 0012 e o *fairing* com $L/D = 4.0$, pode-se observar que em ambos os casos não existe separação da

camada limite e o valor da mínima pressão acontece na região de máxima espessura.

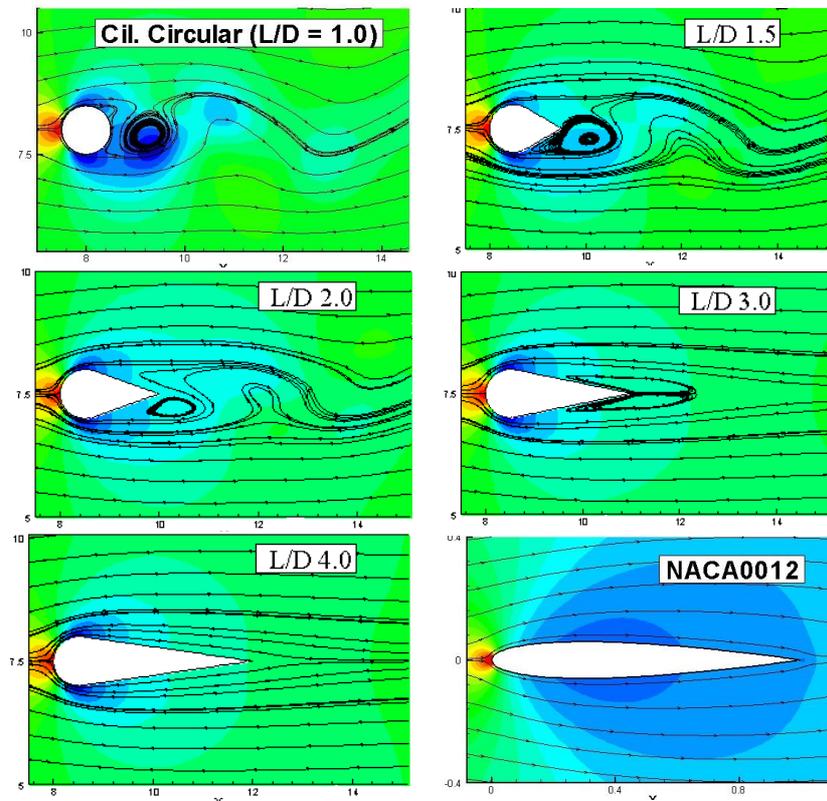


Figura 8: Distribuição da pressão e linhas de corrente para o CC, o CC com dispositivos de tipo *fairing* e aerofólio NACA0012 com $Re = 100$

As distribuições dos coeficientes de sustentação (C_L) e de arrasto (C_D) em função do tempo (em segundos) para o dispositivo de tipo *fairing* com $Re = 100$, são mostrados na Figura 9. 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 na relação L/D .

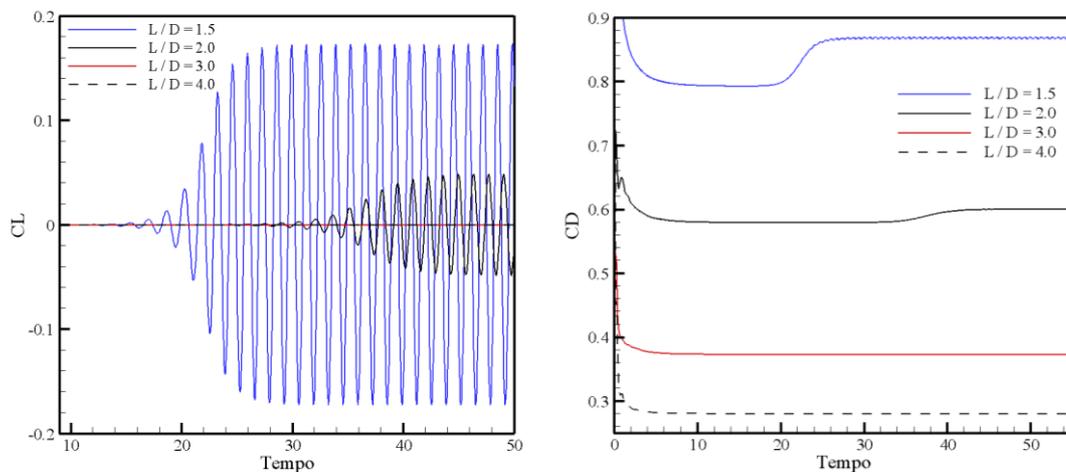


Figura 9: Distribuições dos coeficientes de sustentação e de arrasto em função do tempo para o CC com dispositivo de tipo *fairing* no caso de $Re = 100$

A distribuição de pressão e as linhas de corrente para o caso do CC, do CC com dispositivo de tipo *fairing* e para o perfil aerodinâmico NACA 0012 para $Re = 1000$, mostram-se na Figura 10. Observa-se que o aumento no número de Reynolds modifica substancialmente as características do escoamento em comparação com o caso anterior.

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 existiam para o caso de $Re = 100$. Também, observa-se que a relação $L/D = 4.0$, mostra-se menos eficiência na supressão dos vórtices quando comparado para o caso com $Re = 100$ (ver Figura 8). Embora, não seja possível suprimir totalmente os vórtices está relação de aspecto ($L/D = 4.0$) diminui a região de separação e a intensidade dos vórtices em comparação com os *fairing* de menor tamanho.

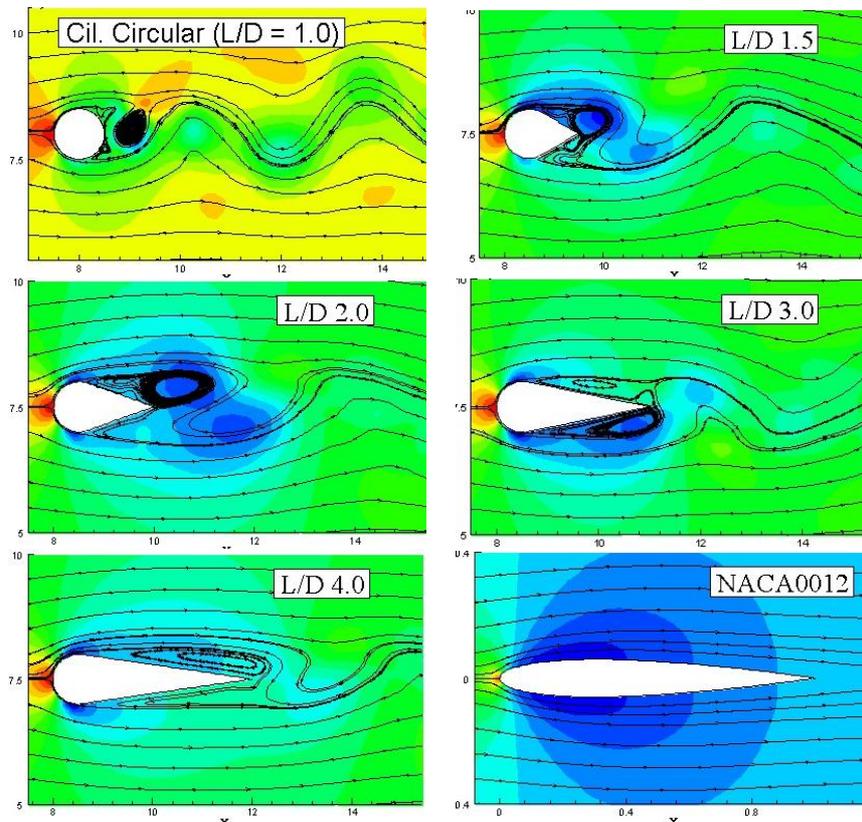


Figura 10: Distribuição da pressão e linhas de corrente para o CC, o CC com dispositivos de tipo *fairing* e o aerofólio NACA0012 com $Re = 1000$

Na Figura 11, mostram-se o valor da amplitude do coeficiente de sustentação (C_L), o coeficiente de arrasto médio (C_D) 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 cilindro circular sem *fairing*. Os pontos mostrados na superfície representam o valor encontrado para cada caso simulado numericamente e a superfície foi obtida por interpolação.

Observa-se que independentemente do número de Reynolds, sempre diminuem os valores dos coeficientes de sustentação e de arrasto quando se aumenta a relação L/D .

O 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.

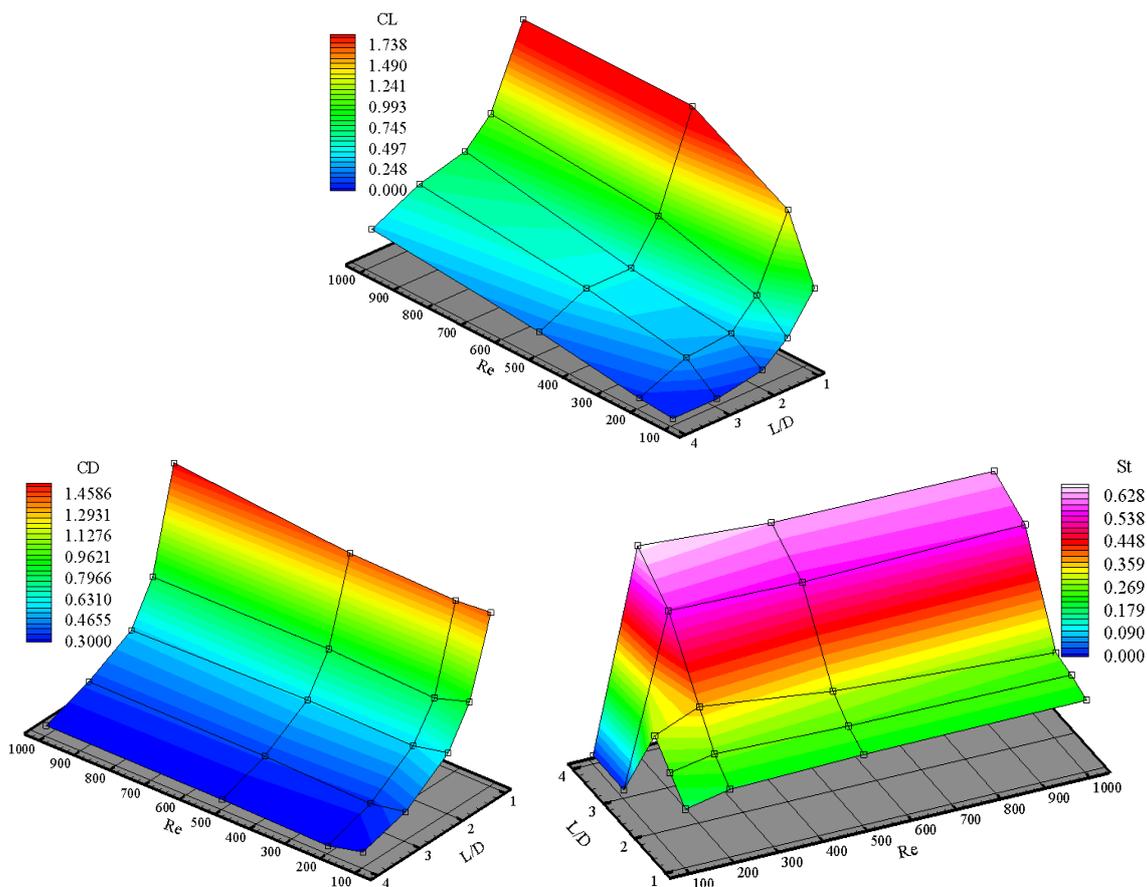


Figura 11: Distribuição dos coeficientes de sustentação (CL), de arrasto (CD) e número de Strouhal (St) para os diferentes números de Reynolds e relação L/D analisados

Na Figura 12, 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° 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.

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 conseqüente 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 se dá 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.

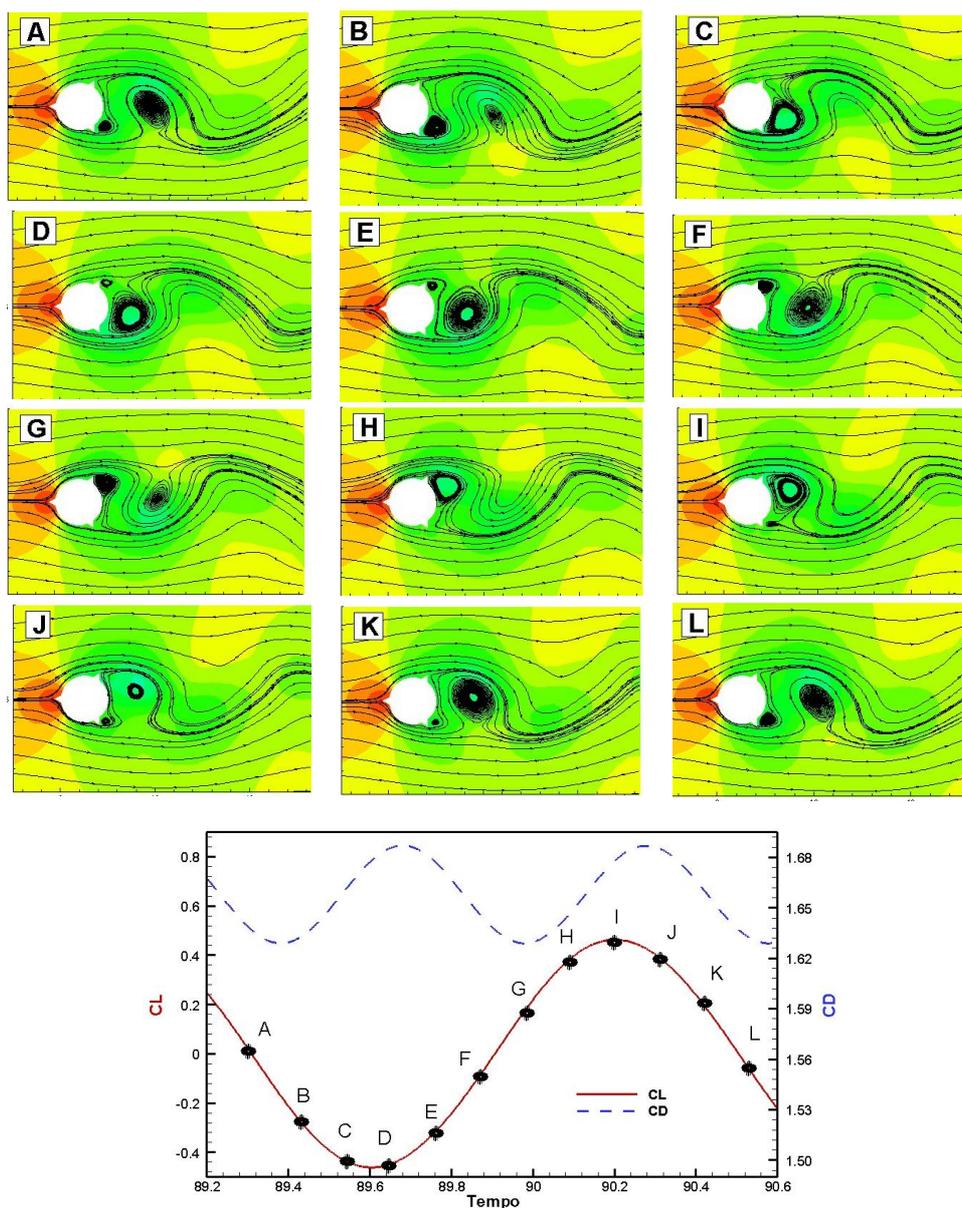


Figura 12: Sequência de formação e desprendimento de vórtices e distribuição dos coeficientes de sustentação e de arrasto para caso de *strakes* com $h/D = 0.15$ e $Re = 100$

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° e $Re = 1000$, mostra-se na Figura 13. Embora a dinâmica da formação e desprendimento de vórtices seja a mesma apresentada para o caso laminar ($Re = 100$), pode-se observar que o escoamento turbulento resulta mais complexo quando comparado com o caso mostrado na Figura 12. Entre o intervalo de tempo “A” e “C” acontece o crescimento do vórtice localizado na parte inferior do CC. O crescimento do vórtice está associado a uma diminuição do CL. Deve-se observar que na parte superior existe um pequeno vórtice localizado imediatamente atrás do *strake*. No tempo “D”, se atinge o mínimo valor do CL e o vórtice superior é absorvido pelo vórtice maior localizado na parte inferior. No intervalo entre “E” e “G”, acontecem simultaneamente o desprendimento do vórtice inferior e o crescimento do vórtice superior. Neste intervalo, observa-se o crescimento do coeficiente de sustentação. O máximo valor do CL obtém-se no intervalo entre “H” e “I”, neste caso o vórtice que estava crescendo de tamanho (localizado na parte

superior) absorve o vórtice inferior. No intervalo entre “J” e “L”, se produz o desprendimento do vórtice e o início de formação do vórtice inferior. Finalizando este intervalo, a dinâmica de formação e desprendimento dos vórtices repete-se ciclicamente.

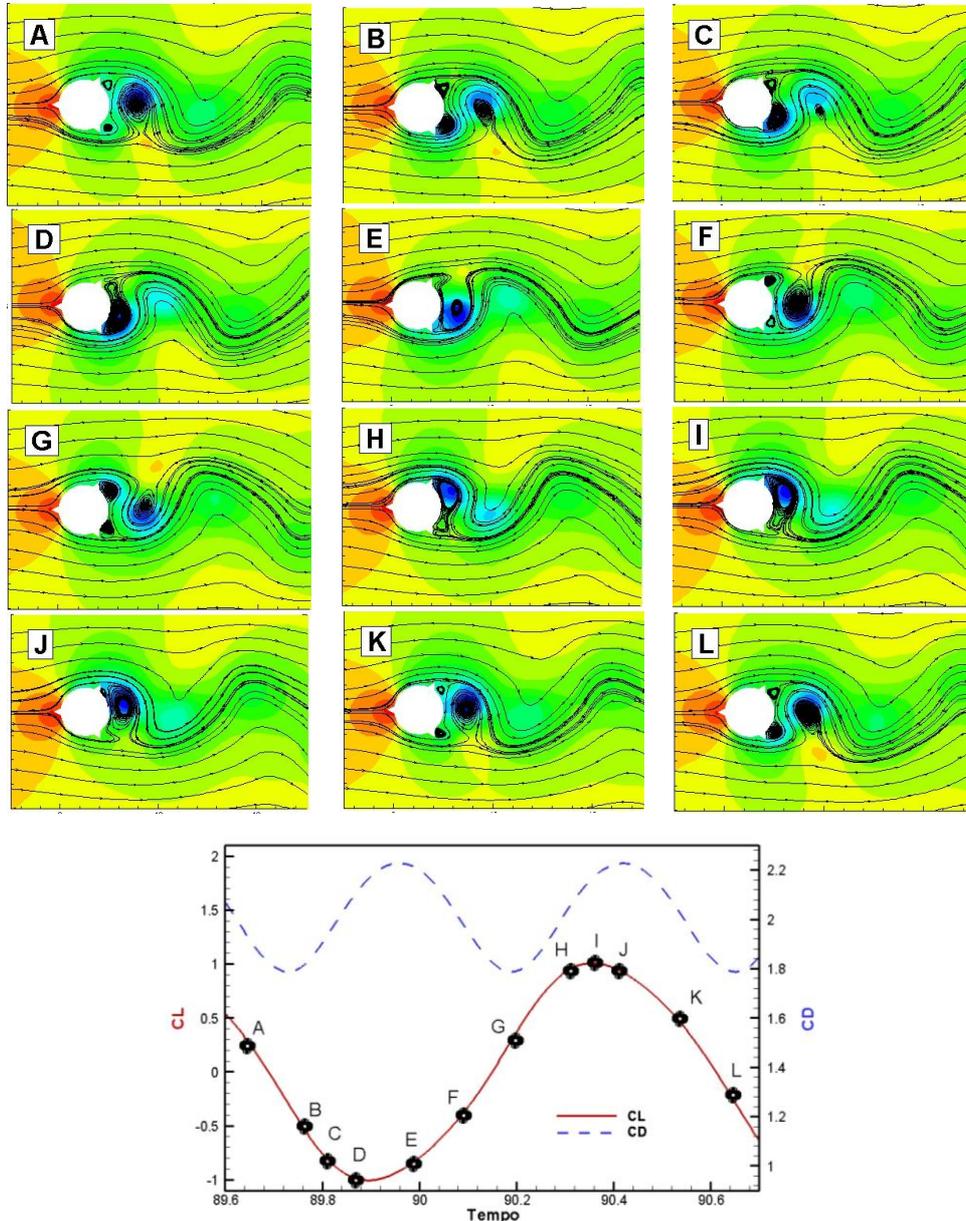


Figura 13: Sequência de formação e desprendimento de vórtices e distribuição dos coeficientes de sustentação e de arrasto para caso de *strakes* com $h/D = 0.15$ e $Re = 1000$

Na Figura 14, comparam-se as distribuições dos coeficientes aerodinâmicos (CL e CD) em função do tempo (em segundos) para o dispositivo de tipo *strakes* com altura $h/D = 0.15$ e $Re = 100$, para os diversos ângulos de ataque analisados. As linhas de corrente e distribuição de pressão para este caso são mostrados na Figura 15.

Observa-se que os coeficientes de sustentação no caso dos ângulos de incidência 90° e 270° 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 qual pode ser interpretada a partir da distribuição do campo de pressão, ver Figura 15.

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 separação e, por conseguinte os menores valores nos coeficientes aerodinâmicos.

Observe-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° são muito similares. Entretanto, o coeficiente de sustentação médio resulta nulo para $\alpha = 0^\circ$, positivo para $\alpha = 90^\circ$ e negativo para $\alpha = 270^\circ$.

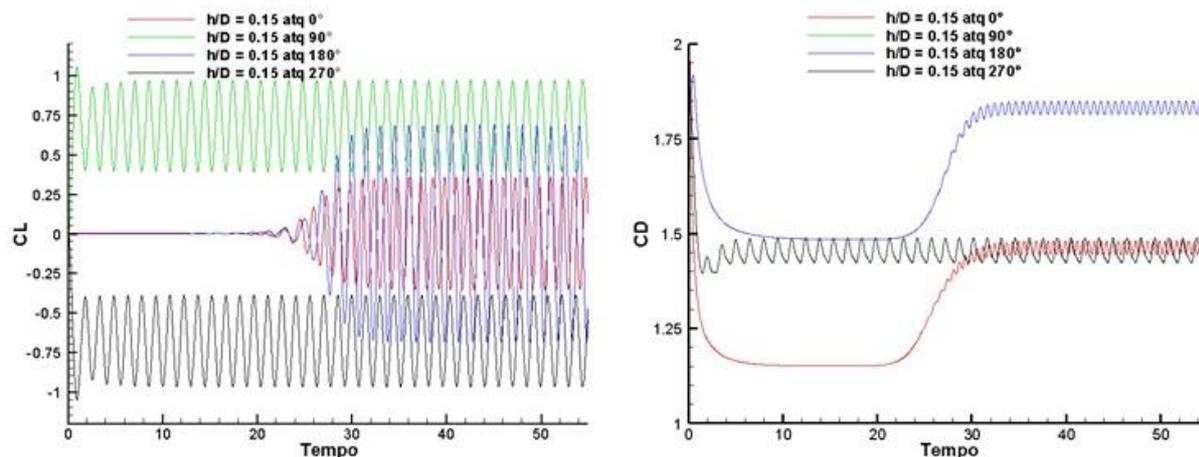


Figura 14: Coeficientes de sustentação e de arrasto para o cilindro circular com *strakes* no caso de $h/D = 0.15$ e número de Reynolds igual 100

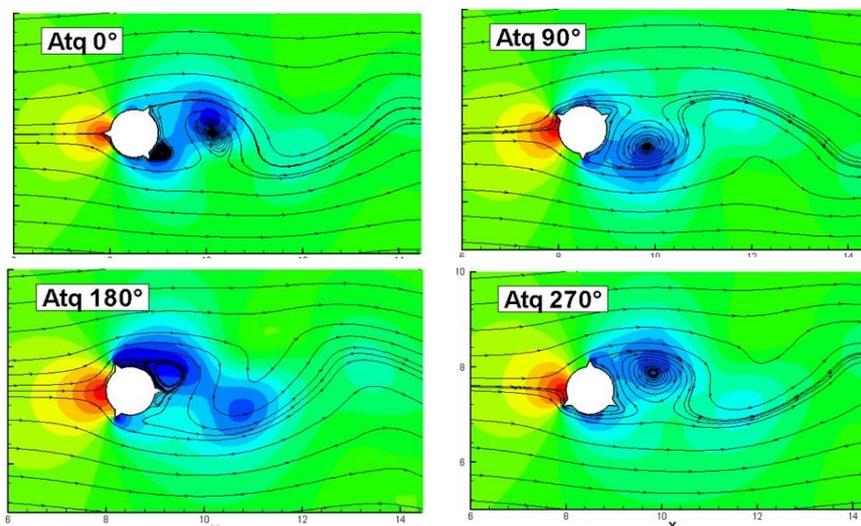


Figura 15: Linhas de corrente e campos de pressão para o caso de *strakes* com $h/D = 0.15$ e $Re = 100$ para os quatro ângulos de ataque estudados

Pelo fato da análise do CC com *strakes* ser de caráter bidimensional, não se pode 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 16, 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 16 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*.

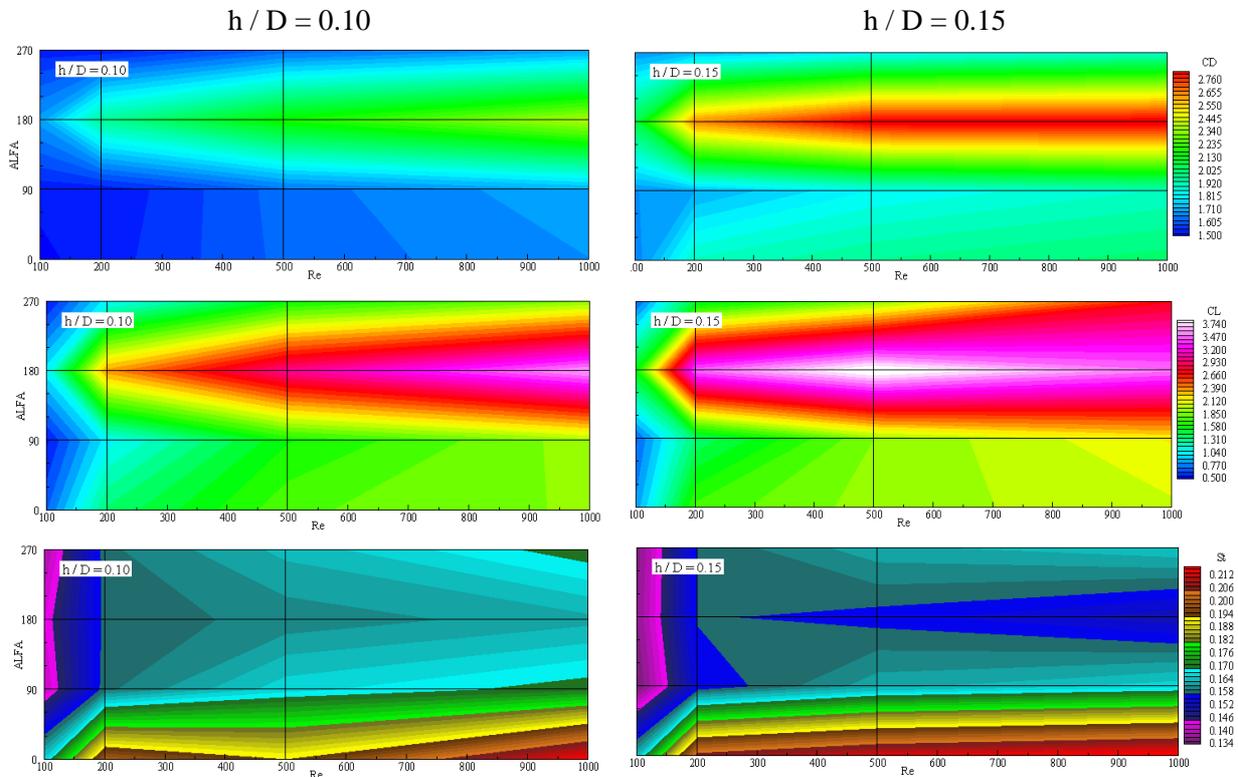


Figura 16: Distribuição do coeficiente de arrasto (CD), número de Strouhal (St) e coeficiente de sustentação (CL) para o caso do CC com *strakes* de altura $h/D = 0.10$ e 0.15

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 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. A influência dos modelos de turbulência (LES clássico e dinâmico) também será analisada nos dispositivos de tipo *fairing* e *strakes*.

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

- ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis* ANP (2011).
- 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.
- 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.