

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Simulação Computacional do Escoamento em Torno de uma Seção Circular com Movimento Forçado

AUTORES:

Julia Satie Saito

Celso Kazuyuki Morooka

INSTITUIÇÃO:

Universidade Estadual de Campinas

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO EM TORNO DE UMA SEÇÃO TRANSVERSAL CIRCULAR COM MOVIMENTO FORÇADO

Abstract

To perform offshore operations for oil and natural gas production, underwater pipelines are used to transporting oil and gas from the seabed to a floating production unit. Riser pipes are also used to drill offshore petroleum wells. All of those underwater pipelines are subjected to interact with the sea water which results in vortex shedding raising two excitation force components: the drag force (F_D) in the direction of fluid incidence, and the lift force (F_L) in the perpendicular direction for the first one. Those components make the pipe to oscillate due to the phenomenon known as the Vortex Induces Vibration (VIV) which usually is in synchronism with the vortex shedding. The study of this phenomenon is important for underwater pipeline system design, because it can lead to the pipeline fails due to the fatigue. Nowadays, Computational Fluid Dynamics (CFD) is used more and more, in the process of the engineering design, in complement with laboratory tests. The present paper presents a methodology used for computational simulation by CFD, of the external current flow around a underwater pipeline, in two dimensions. A two dimensional transverse section of the pipeline is taken, and it is forced to move in different forced oscillation frequencies. For the present research, a commercial software is applied (ANSYS-CFX[®]) which basis in the solution of the Navier-Stoke's equations by the finite volume method. Discussions for the results are carried out for different frequencies as a function of the lift coefficient (CL), and these results are compared with the literature.

Introdução

Os estudos relacionados à perfuração e produção de poços marítimos, aos mecanismos de elevação de petróleo do fundo do mar até a unidade de produção flutuante, assim como o transporte deste petróleo produzido, são cada vez mais importantes, principalmente depois da descoberta da camada do pré-sal nas Bacias de Campos (RJ) e de Santos (SP). Sem dúvida existe um potencial muito grande de produção de petróleo dos campos do pré-sal, no entanto, os reservatórios encontram-se em profundidades muito grandes. E a lâmina d'água destes campos chegam a mais de 2000 metros de profundidade, além dos poços terem de atravessar algumas vezes formações com mais de 7 quilômetros de profundidade, dos quais aproximadamente dois quilômetros correspondem à camada de sal.

A produção de petróleo e gás de campos marítimos corresponde à elevação destes fluidos produzidos do reservatório, do fundo do mar à unidade de produção flutuante, utilizando-se de dutos submarinos e *risers*, tubulações para escoamento da produção de petróleo, especialmente projetados para durar até 20 anos, o que corresponde ao tempo mínimo de produção de uma unidade em alto-mar. Estas tubulações transportadoras de petróleo devem resistir aos esforços produzidos pela correnteza marítima e ataque à corrosão devido aos componentes agressivos misturados ao petróleo, tais como o CO₂ e H₂S. Em águas profundas, devido ao comprimento total dos *risers*, podem ser muito pesados. Com a finalidade de diminuir os efeitos de peso total do *riser* na unidade flutuante de produção, utiliza-se algumas vezes bóias intermediárias de subsuperfície para sustentação do *riser*. No caso do sistema híbrido de *riser*, utiliza-se de uma estrutura cilíndrica de aço de grande diâmetro como bóia, ficando localizado a aproximadamente 100 metros abaixo do nível do mar, afastado da zona de influência das ondas do mar. O *riser* com terminação superior na bóia transfere o fluido transportado

do fundo do mar até a bóia para a unidade flutuante de produção, por meio de uma tubulação flexível denominada de *jumper*. Assim sendo, este sistema de *riser* apresenta vantagens de estar distante dos efeitos direto das ondas do mar, reduzindo riscos de ruptura eventual por fadiga do *riser* (Farfán, 2005).

Os conceitos básicos da dinâmica de fluídos (Fox et all, 1995) permite descrever a interação mecânica entre as partículas de água de um escoamento e a superfície externa de uma tubulação imersa neste escoamento. Devido a esta interação, ocorrem variações de pressão ao longo da superfície externa desta tubulação, e com as perdas observadas neste processo devido à viscosidade do fluído, diferenças de pressões causam variações de velocidade de partícula na parede, e finalmente ocasionando desprendimento da partícula em relação à trajetória original no escoamento, e o surgimento de vórtices que desprendem alternadamente, considerando-se o plano de simetria da seção circular. A ocorrência dos vórtices resulta no aparecimento de uma força resultante na seção circular que comumente pode ser dividida em uma componente paralela ao escoamento (*in-line*), chamada de força de arrasto (F_D) e outra, componente transversal ao escoamento denominada de força transversal (F_L). Estas forças são oscilantes e podem fazer a tubulação vibrar, fenômeno este conhecido como Vibração Induzida por Vórtices (VIV), importante no projeto de tubulações submarinas visto que pode provocar sua fadiga precoce, resultando em graves acidentes com consequências econômicas, ambientais e humanas.

A Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) vem sendo cada vez mais utilizada para simulação de cenários reais nas diferentes áreas da engenharia, como por exemplo, em problemas de escoamento de fluidos em tubos de trocadores de calor, estudo da ação de ventos em cabos de eletricidade e, como no presente trabalho, no estudo do escoamento da água ao redor de dutos submarinos e *risers* utilizados para a perfuração e produção de petróleo marítimo. Trata-se da aplicação de métodos numéricos computacionais nas equações fundamentais da mecânica de fluidos para a simulação em computador, do escoamento de fluidos. Esta técnica vem sendo cada vez mais pesquisada e sendo utilizada para auxiliar o entendimento de alguns aspectos do projeto de dutos submarinos e *risers*.

Neste trabalho, apresenta-se o desenvolvimento da modelagem numérica e simulações do escoamento ao de uma seção circular de superfície externa lisa, bidimensional, com movimento forçado. Variou-se as frequências deste movimento forçado mantendo-se a amplitude máxima e mínima fixas. Acrescenta-se, finalmente que o a presente investigação pode ser estendida para todas as situações em que se utiliza de elementos estruturais tubulares esbeltos na extração do petróleo marítimo, quando expostos à correnteza marítima, ondas e/ou aos movimentos da unidade flutuante a qual estão geralmente conectados.

As simulações através do *CFD* tem base as equações de Navier-Stokes e a aplicação do método dos volumes finitos no cálculo das variáveis de interesse do problema. A partir de F_D e F_L obtidos numericamente, determinou-se os coeficientes hidrodinâmicos de arrasto (C_D) e de sustentação (C_L), parâmetros de interesse no caso do VIV em dutos submarinos e *risers*. Estes resultados foram comparados resultados disponíveis na literatura para fins de compreensão e validação dos resultados.

Metodologia

No presente trabalho, o software ANSYS-CFX® foi aplicado para as simulações numéricas. As equações de Navier-Stokes descrevendo processos de transferência de massa, de calor e de momento são resolvidas nos resultados de simulação apresentados, para cada volume de controle da malha computacional.

As simulações foram realizadas utilizando-se a mesma malha anteriormente aplicada (Saito e Morooka, 2010) na simulação do escoamento ao redor de um duto submarino estacionário. O diâmetro do duto submarino é de 0,114m e o fluido do escoamento é a água, utilizando-se as propriedades definidas na própria biblioteca do programa, sendo assim, a densidade $\rho=997\text{kg/m}^3$ e a viscosidade dinâmica $\mu=8,899\times 10^{-4}$ Pa.s, a 25°C. Com estes valores, e utilizando a velocidade de correnteza de $v=1,5\text{m/s}$, o número de Reynolds é calculado segundo a equação (1):

$$\text{Re} = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (1)$$

O modelo de turbulência utilizado é o modelo de *Shear Stress Transport (SST)*. De acordo com Menter (1994), o modelo *SST* introduz o conceito de uma viscosidade turbulenta (*eddy viscosity*), que estima o transporte das principais tensões cisalhantes, o que resulta na melhora de uma combinação dos modelos *k- ω* e *k- ϵ* . O transporte das tensões cisalhantes é muito importante para prever escoamento com altos gradientes de pressão adversos e, consequentemente, a separação do fluxo, o que faz com que este modelo de turbulência tenha uma melhora significativa para todos os escoamentos que envolvam gradientes de pressão adversos, como é o caso do presente trabalho. Segundo Stravopoulos et al (2005), o modelo *SST* utiliza basicamente o modelo *k- ω* para as regiões próximas da superfícies externa da seção, e *k- ϵ* nas regiões afastadas da mesma.

Em relação à malha elaborada, a região próxima à superfície externa ao longo da seção circular transversal ao redor do duto se encontra mais refinada, ou seja, apresenta elementos menores tendo em vista as forças viscosas dominantes em relação às forças inerciais, o que resulta na formação de uma camada limite que define a formação de vórtices na região posterior a esta seção bidimensional transversal deste duto submarino. Assim, é necessário que os volumes de controle nessa região sejam pequenos o suficiente para que a camada limite esteja bem definida, garantindo a confiabilidade dos resultados. A região posterior ao duto no escoamento também está um pouco mais refinada se comparado às regiões mais distantes do mesmo, visto que nela ocorre a esteira de vórtices os quais se desprendem e influenciam no desprendimento dos demais. Desta forma, o programa aplicado soluciona as equações do comportamento do fluido envolvidas, e acredita-se que provê de solução mais próxima do real e mais confiável.

Resultados e Discussão

Com base em resultados obtidos anteriormente (Saito e Morooka, 2010), selecionou-se a velocidade de correnteza incidente de $v=1,5\text{m/s}$, o que resulta no número de Reynolds (*Re*) de 191580. Conforme se pode observar da Figura 1, para curva de coeficiente de arrasto de um tubo liso, em função do número de *Re*, o escoamento em questão encontra-se antes da região denominada de crise do arrasto.

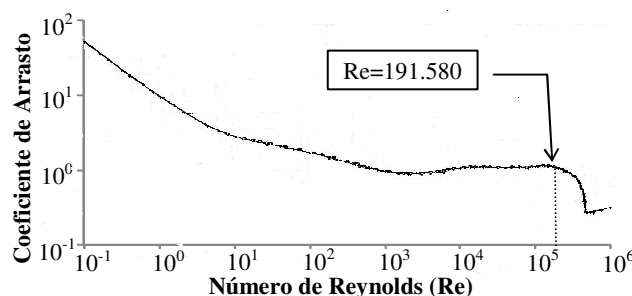


Figura 1: Curva de coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds.

Para se estudar a relação entre a frequência de desprendimento de vórtices, a frequência de oscilação do duto e a amplitude de oscilação, é preferível que o duto seja movido mecanicamente à ser movido elasticamente por molas (Stansby, 1976, apud Pantazopoulos, 1994). Com base neste entendimento, no presente trabalho a seção transversal circular do duto é forçada a movimentar apenas na direção transversal, deixando-se fixa a direção *in-line*. A Figura 2 ilustra este movimento imposto, conforme a equação 2:

$$mov = A \sin(2\pi f_e t) \quad (2)$$

onde A é a amplitude de oscilação, definida como $A = 0,1 \times D = 0,0114\text{m}$, e f_e é a frequência de oscilação, variado para alguns valores entre $f_e = 1,575\text{ Hz}$ até $f_e = 6\text{ Hz}$.

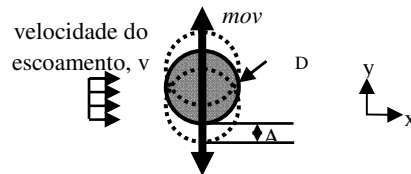


Figura 2: Esquema para o movimento forçado da seção circular na direção transversal.

Carberry et al (2005) verificou um aumento repentino na amplitude da força quando a razão f_e/f_0 ultrapassa a 1. Em seu trabalho, atribui este resultado às mudanças na estrutura da esteira do escoamento em questão. Conforme pode se verificar anteriormente (Saito e Morooka, 2010), para o escoamento em estudo no presente trabalho, a simulação numérica mostrou este aumento repentino na amplitude da força para o presente caso em estudo, para uma frequência de 3,17Hz.

Tendo como referência esta frequência, neste trabalho foram realizadas simulações com frequências de oscilação de: 1,575 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 3,17 Hz, 4,5 Hz, 5 Hz e 6 Hz, respectivamente.

Um exemplo de histórico no tempo para resultados obtidos de força de arrasto e transversal, e o movimento imposto para a seção obtido das simulações para frequências de oscilação $f_e = 2\text{ Hz}$ e $f_e = 6\text{ Hz}$, estão mostrados nas Figuras de 3 e 4, respectivamente.

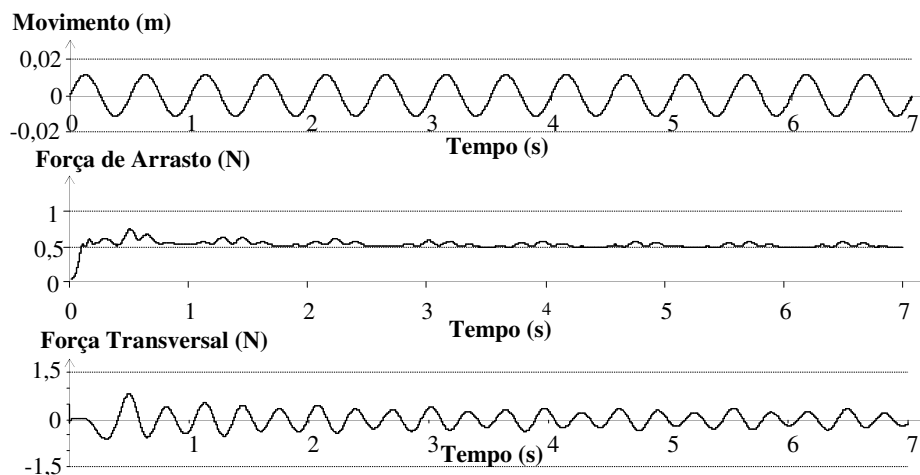


Figura 3: Resultado da simulação força de arrasto (F_D) e força transversal (F_L), para um movimento de oscilação imposto de $f_e = 2\text{ Hz}$, e velocidade de correnteza $v = 1,5\text{ m/s}$.

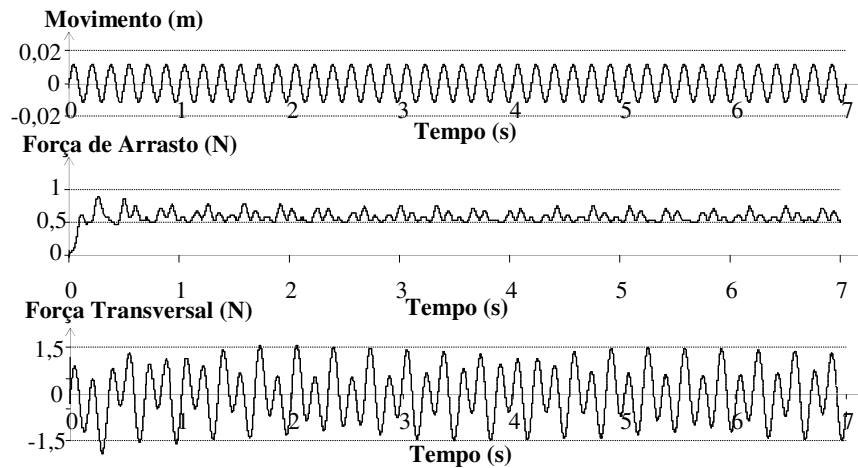


Figura 4: Resultado da simulação força de arrasto (F_D) e força transversal (F_L), para um movimento de oscilação imposto em $f_e=6$ Hz, e velocidade de correnteza $v=1,5$ m/s.

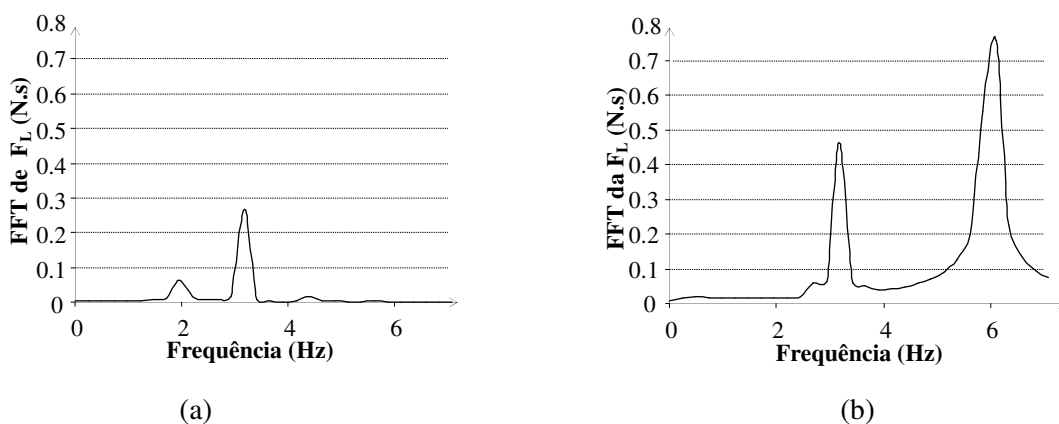


Figura 5: Espectro de Fourier da força transversal (F_L) nas frequências de oscilação: (a) $f_e=2$ Hz e (b) $f_e=6$ Hz.

A Figura 5 mostra a Espectro de Fourier para a força transversal, para as frequências de oscilação de $f_e=2$ Hz (a) e $f_e=6$ Hz (c), respectivamente.

O coeficiente de sustentação (C_L) é calculado com o valor da amplitude máxima da força transversal (F_L) obtida da série temporal nas simulações, segundo a equação 3:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho D L v^2} \quad (3)$$

Quando o movimento da seção é forçado, nota-se que a força transversal passa a oscilar geralmente em duas frequências distintas: uma na frequência do movimento induzido pelo surgimento de vórtices para o caso da seção estacionária (f_o), e outra na frequência de oscilação forçada da seção (f_e). O movimento induzido por vórtices ocorre como resposta da estrutura às perturbações de instabilidade natural da esteira enquanto que a oscilação forçada perturba a instabilidade natural da esteira, resultando na resposta da mesma, conforme descrito em Carberry (2005). A maior amplitude da força transversal apresenta-se sempre na frequência maior de vibração. Ou seja, para razões f_e/f_o menor que a unidade, a frequência que apresenta o maior pico é sempre àquela referente o desprendimento de vórtices. Quando f_e/f_o tende à unidade, a força transversal passa a oscilar com apenas uma frequência. E, quando f_e/f_o é maior que a unidade, a frequência que apresenta o maior pico é aquela referente à oscilação forçada.

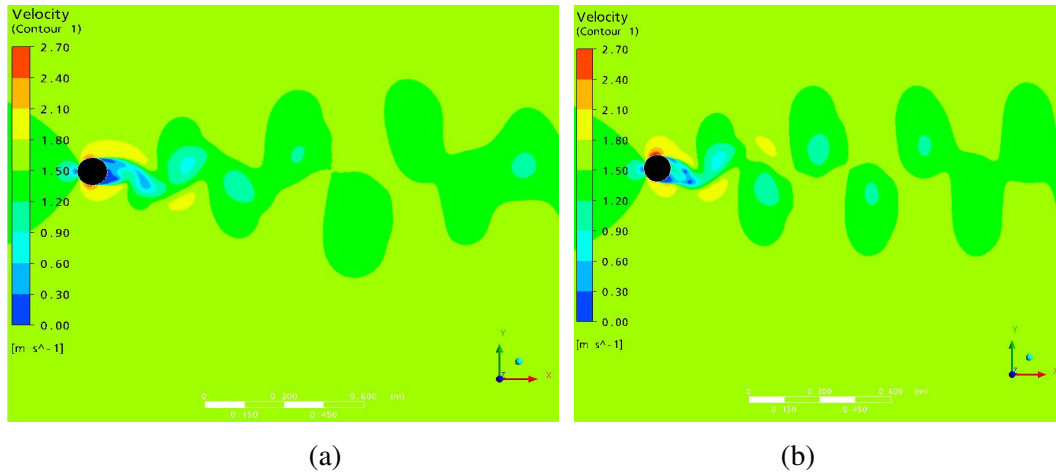


Figura 6: Campo de velocidades no instante de maior amplitude de movimento ($A=0,114m$) da seção, para as frequências de oscilação de (a) $f_e=2$ Hz e (b) $f_e=6$ Hz, respectivamente.

A Figura 6 mostra o campo de velocidade para a esteira do escoamento, considerando o instante de maior amplitude do movimento forçado, isto é, para $A=0,0114m$, para as frequências de oscilação forçada de 2 Hz e 6 Hz, respectivamente. Pode-se notar pelas imagens da Fig. 6 de que nos respectivos tempos ilustrados ($t=6,625s$ para $f_e=2Hz$, e $t=6,875s$ para $f_e=6$ Hz), há desprendimento de vórtice na parte superior da seção para ambos os casos e o campo de velocidade é diferente em cada um dos casos, sendo possível observar um campo de velocidade praticamente simétrico nos cantos superior e inferior da seção no caso (a), porém uma velocidade maior na parte superior da seção no caso (b). Este campo de velocidade influi diretamente no descolamento de vórtices. Pode-se notar também que a frequência de descolamento de vórtices é diferente em ambos os casos, que pode ser notada pela distância entre os vórtices.

Os resultados gerados para as simulações realizadas encontram-se sintetizados na Figura 7. Carberry (2005) observa em seus estudos experimentais de que quando f_e/f_0 se aproxima da unidade, há um aumento repentino no valor de C_L , o que também se observou nos resultados obtidos pelas simulações no presente estudo. Na comparação nota-se que os valores obtidos no presente trabalho apresentaram-se em geral menores do que encontrados por Carberry (2005), embora se observe a mesma tendência para a curva resultante. Simulações adicionais para a razão $A/D=0,15$ mostraram que o aumento da amplitude do movimento irá influenciar no C_L , embora se confirme a mesma tendência anterior, inclusive na região onde f_e/f_0 tende à unidade quando há a mudança abrupta de valor do C_L . Entretanto, neste caso de $A/D=0,15$ e para f_e/f_0 maiores que a unidade, o C_L apresentou-se com valores mais elevados do que mais elevado para $A/D=0,10$. Ressalta-se finalmente, de que o número de Reynolds diferentes considerados nas análises podem influenciar os resultados.

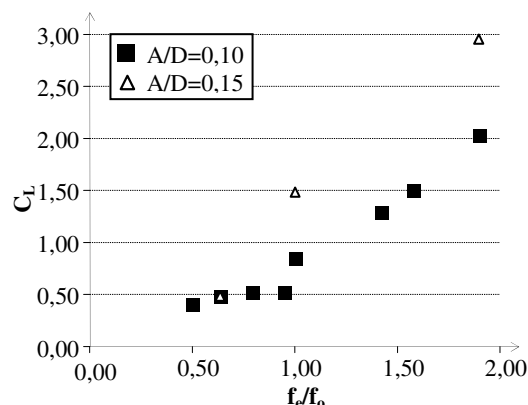


Figura 7: Resultados calculados de C_L para as diferentes frequências de oscilação.

Conclusões

Para uma seção transversal circular de um duto submarino exposto ao escoamento de correnteza uniforme incidente, com um número de Reynolds relativamente alto e com baixa amplitude de movimento de oscilação da seção, a força transversal ao escoamento incidente oscila com duas frequências. Uma frequência de oscilação corresponde à frequência do movimento forçado, e a outra à frequência de desprendimento de vórtices para uma seção estacionária. E ainda, a força transversal passa a oscilar com apenas uma frequência quando o movimento apresenta a mesma frequência de desprendimento dos vórtices (“lock-in”).

O coeficiente de sustentação C_L apresenta um crescimento com o aumento da razão f_c/f_o , sendo que quando a razão atinge a unidade, o coeficiente C_L apresenta um aumento brusco em seu valor, seguindo tendência apresentada também na literatura. E ainda, para a região de razão f_c/f_o maiores do que a unidade, o coeficiente C_L tende também a aumentar com o aumento de A/D .

Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Nacional do Petróleo (ANP) e a Petrobras pelo apoio a presente pesquisa.

Referências Bibliográficas

CARBERRY, J., SHERIDAN, J., ROCKWELL, D.: “Controlled Oscillations of a Cylinder: Forces and Wake Modes”, Journal of Fluid Mechanics, vol. 538, United Kingdom, 2005. pp. 31-69.

CONSTANTINIDES, Y.; OAKLEY, O.H.: “Numerical prediction of VIV and comparison with field experiments”, international Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Estoril, Portugal, 2008..

FARFÁN, D. C.: “Estudo do Comportamento Estático e Dinâmico de um *Riser* Vertical com Bóia de Subsuperfície”, Dissertação de Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.

FOX, R. W., MC DONALD, A. T., PROTCHARD, P. J.: “Mecânica dos Fluidos”, 4ª edição, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1995.

MENTER, F.R.: “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”, AIAA-Journal., 32(8), pp. 1598-1605, 1994.

PANTAZOPOULOS, M. S.: “Vortex-Induces Vibrations Parameters: Critical Review”, International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Osaka, Japan, 1994.

SAITO, J. S., MOROOKA, C. K.: “Simulação Computacional do Escoamento em Torno de Uma Seção de um Duto Marítimo”, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), Campina Grande, Brasil, 2010.

STRAVOPOULUS, M., CHARES WORTH, D., DIXON, M.: “The Application of CFD for Vortex Induced Vibration Analysis of Marine Risers”, Projects Marine 2005.

SUMER, B. M., FRED SOE, J.: “Hydrodynamics around Cylindrical Structures”, World Scientific, Singapore, 1997.