

## ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO “IN LINE” E TRANSVERSAL DE “RISER” RÍGIDO DE PRODUÇÃO

Fernanda Pinheiro Martins<sup>1</sup>, Hélio Y. Kubota<sup>1</sup>, Celso K. Morooka<sup>1</sup>, João Alfredo Ferrari Jr.<sup>2</sup>, Elton J. B. Ribeiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP/FEM/DEP, C.P.-6122, 13083-970  
Campinas-SP, [fernanda@dep.fem.unicamp.br](mailto:fernanda@dep.fem.unicamp.br)

<sup>2</sup> Petróleo Brasileiro AS, PETROBRAS, [jferrari@petrobras.com.br](mailto:jferrari@petrobras.com.br)

**Resumo** – Tendo em vista o grande número de campos de petróleo descobertos, principalmente em águas profundas, no Brasil tem sido abordadas diferentes fronteiras de estudos em análise do comportamento de sistemas marítimos de produção. No presente trabalho é analisado o comportamento de um “riser” rígido vertical de produção, tubulação de conexão do fundo do mar a uma instalação de produção com completação seca (plataforma flutuante) localizado na superfície do mar. São apresentados os fundamentos do comportamento “in-line” e transversal do “riser”. Os resultados obtidos ilustram os deslocamentos do “riser” submetido à ação direta das ondas do mar, correnteza e movimentos da plataforma flutuante na superfície do mar. É estudada a influência dos diferentes parâmetros do sistema nos deslocamentos do “riser”, comparando-se estes resultados com dados experimentais e outros disponíveis na literatura.

Palavras-Chave: sistemas marítimos de produção; “riser” rígido de produção; correnteza; ondas

**Abstract** –Due to the great number of petroleum reserves discovered, principally at deep water, in Brazil has been broached different frontiers of studies in analysis of the offshore production systems. In the present work is analyzed the behavior of a vertical rigid production riser, pipeline connection from the bottom of the sea to a production installation with dry completion (floating platform) at the sea surface. It is presented fundamentals of the inline and transversal riser behavior. The results obtained show the riser displacements under the direct action of the waves sea, current and motions of floating platform at the sea surface. It is studied the influence of different system parameters on the riser displacements, and this results are compared with experimental data and others available from the literature.

Keywords: offshore production systems; rigid production riser; current; waves

## 1. Introdução

Em sistemas marítimos flutuantes de produção com completação seca, o “riser” rígido vertical surge como uma alternativa ao “riser” flexível, particularmente para instalações de produção de petróleo em águas profundas. No entanto, o seu comportamento mecânico deve ser analisado exaustivamente, tendo em vista a possibilidade de sua aplicação em águas ultraprofundas, com mais de 1500 metros de lâmina d’água. Os deslocamentos e esforços máximos ao longo do “riser”, assim como a redução da vida útil (fadiga) causada pelos carregamentos alternados são pontos fundamentais a serem investigados para diversas condições ambientais de operação do sistema.

A modelagem matemática adotada para o “riser” rígido neste trabalho considera um elemento tubular esbelto sob a ação direta dos movimentos induzidos pelo navio ou plataforma flutuante no topo, e com a ação direta de ondas marítimas e correntezas. A ação da onda, no presente trabalho, é considerada unidirecional, ou seja, assume-se que as ondas atingem a estrutura segundo uma única direção de propagação, na qual se concentra toda a energia (Batelochi, 2000).

Em geral os modelos matemáticos disponíveis na literatura consideram apenas o comportamento bidimensional do “riser”. Um modelo mais realista considera a tridimensionalidade do problema abordado, isto é, consideram-se as forças hidrodinâmicas em cada secção do “riser” ao longo do seu comprimento, tanto as co-lineares como as transversais em relação à direção do carregamento ambiental, agindo no “riser” a cada instante. O presente trabalho tem como base, o modelo de Ferrari&Bearman (1999) para a solução numérica do problema do escoamento 3-D levando-se em consideração a interação fluido-estrutura ao longo do “riser”.

## 2. “Riser” Rígido de Produção

O “riser” rígido de produção é um elemento tubular esbelto que interliga o poço no fundo marinho à embarcação de processo na superfície do mar, para fins de escoamento da produção de óleo e gás do reservatório de petróleo, ou ainda, utilizado para conduzir a água de injeção ao reservatório, como ilustrado na Figura 1.

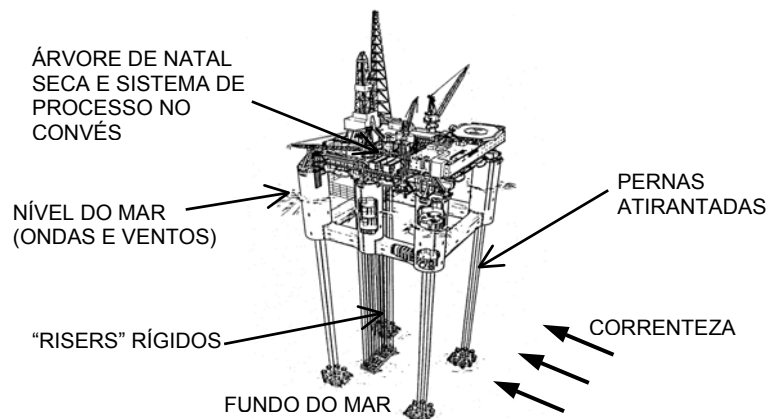


Figura 1. Típica configuração de “riser” e plataforma

O seu projeto é diretamente dependente de fatores como condições operacionais e ambientais, profundidade, diâmetros e pressão interna de trabalho. Todos estes componentes têm de ser considerados no projeto dos vários componentes de sistemas de “riser” incluindo o tubo principal, as linhas auxiliares, os conectores, a distribuição dos módulos de flutuação, e eventuais sistemas de tensionamento. Dentre vários fatores que influenciam o comportamento do “riser”, talvez o mais importante seja a ação das forças de correnteza e de onda agindo diretamente, e o movimento induzido pela embarcação sob o efeito de ondas. Além disso, as propriedades mecânicas do “riser”, assim como a pressão hidrostática do fluido interno e externo tem efeitos que não podem ser desprezados.

### 2.1. Mecânica do “Riser” Rígido

As equações de equilíbrio para um segmento tubular inclinado (Figura 2) e os carregamentos estaticamente equivalentes em seu centro, resultantes de pressão interna e externa do fluido, e do peso do segmento são derivadas e acopladas de forma a resultarem na seguinte equação final governante do movimento de um “riser” rígido:

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( EI \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} \right) \right] - \left[ (T(z) + A_0(z) \bar{P}_0(z) - A_1(z) \bar{P}_1(z)) \right] \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} - \left[ (\gamma_s (A_0(z) - A_1(z)) - f_{zs}(x, z, t) - A_0(z) \gamma_0 + A_1(z) \gamma_1) \right] \frac{\partial x}{\partial z} + m_x \ddot{x} = f_{xs}(x, z, t) \quad (1)$$

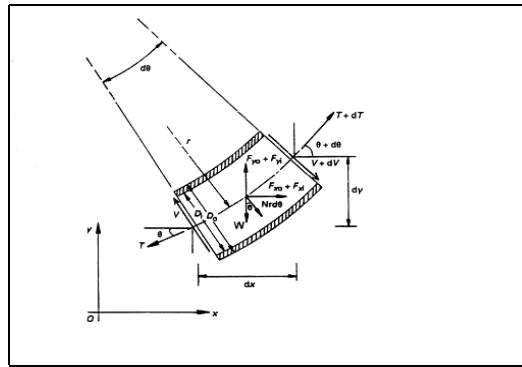


Figura 2. Diagrama de equilíbrio estático para um elemento de “riser”

A resolução para o carregamento do “riser” pode ser obtida através da resolução da equação acima, acoplada às condições de contorno e à previsão correta dos carregamentos de ondas e correnteza ( $f_{XS}$  e  $f_{ZS}$ ). A variação da tensão ao longo do comprimento do “riser” é assumida constante. Desta forma, temos:

$$\left[ \frac{d^2}{ds^2} \left( EI \frac{d\theta}{ds} \right) - (T + A_0 \bar{P}_0 - A_I \bar{P}_I) \frac{d\theta}{ds} \right] \sec\theta - \tan\theta \left[ (\gamma_S (A_0 - A_I) - f_{ZS} - A_0 \gamma_0 + A_I \gamma_I) \right] + m_x \ddot{x} = f_{XS} \quad (2)$$

### 2.2. Equação de Morison

Adotou-se a aplicação da equação de Morison para a descrição das forças hidrodinâmicas de correnteza e de ondas, agindo perpendicularmente ao “riser” vertical, considerado como um elemento cilíndrico. A força hidrodinâmica total que ondas exercem sobre um elemento é composta de duas partes, inercial e de arraste.

A força de inércia refere-se à aceleração e posterior desaceleração de uma determinada partícula de água ao passar pela superfície de um cilindro, sobre um pequeno segmento,  $dl$ , deste. Para que tal aceleração ocorra, é necessário que uma força aplicada na superfície gere trabalho. O aumento de tal força em um pequeno segmento ( $dl$ ), é proporcional à aceleração da partícula de água ao centro do cilindro. Em fluxos permanentes, o coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) é dependente do número de Reynolds. Além disso, o aumento da rugosidade contribui para o aumento do  $C_D$ .

Para descrever a força por unidade de comprimento do cilindro temos a seguinte equação (Ferrari, 1998):

$$f = C_M A_I \frac{\partial u}{\partial t} + C_D A_D |u| u \quad (3)$$

Foi utilizada a teoria de onda de Stokes de 5ª ordem para a obtenção dos termos de velocidade.

### 2.3. Definição do Modelo Hidrodinâmico “Inline”

Para o deslocamento in-line a equação da força externa agente tem a forma:

$$F_x = C_M A_I \frac{\partial u}{\partial t} + C_D A_D |V_r| (u - x) - C_A A_I \ddot{x} \quad (4)$$

A precisão dos resultados obtidos com a utilização da Equação 3 depende da escolha dos coeficientes hidrodinâmicos ( $C_D$ ,  $C_M$ ,  $C_A$ ), os quais são normalmente determinados empiricamente como pode ser visto em Sarpkaya & Isaacson (1981).

Em termos gerais, as forças hidrodinâmicas são funções do número de Reynolds, rugosidade superficial do “riser” e do número de Keulegan-Carpenter (KC). A força por unidade de comprimento devido a ação da onda no “riser” definido pela dimensão característica  $D$  (diâmetro do “riser”) pode ser escrita na forma de  $F = \psi(t, T, D, L, k, u_0, v_0, \rho, \nu)$ . Através da análise dimensional, considerando-se apenas o efeito de onda, chega-se a seguinte expressão adimensional:

$$\frac{F}{\rho u_0^2 D} = \psi \left( \frac{t}{T}, \frac{k}{D}, \frac{u_0 T}{D}, \frac{u_0 D}{\nu}, \frac{u_0}{v_0}, \frac{D}{L} \right) \quad (5)$$

Assim sendo,  $KC$  e  $Re$  estão relacionados com a importância da força de arrasto viscoso, enquanto que o parâmetro de difração determina a importância do efeito da difração da onda. Nota-se que quando o  $KC$  é grande, o parâmetro de difração é pequeno e vice-versa, isso significa que para grandes efeitos de difração necessariamente a componente de arrasto é pequena, e inversamente quando a componente de arrasto é grande a difração pode ser

desprezada. E, portanto, para o caso particular do “riser”, a componente de arrasto é predominante na força hidrodinâmica agente.

Estudos mostraram que a frequência de vibração do “riser” na direção “inline” é normalmente menor do que na direção transversal, no entanto, com o deslocamento ocorre o inverso, como pode ser observado nos gráficos de deslocamentos máximos e mínimos (Figura 4).

#### 2.4. Definição do Modelo Transversal

Assim como na solução do deslocamento in-line, utiliza-se a Equação de Morison na obtenção do modelo hidrodinâmico transversal, desde que se conheça a forma para a estimativa de forças VIV. As matrizes básicas podem ser estimadas da mesma forma que foi feito para a direção in-line. O coeficiente de massa adicionada, necessário para estimar-se a matriz de amortecimento estrutural, terá que ser consistente com o comportamento transversal (Ferrari, Bearman 1999).

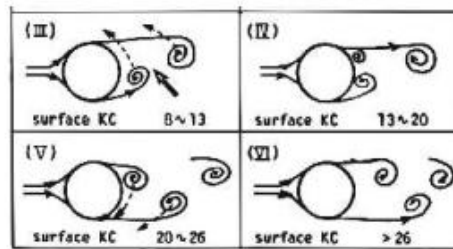


Figura 3. Formação de vórtices devido à onda em função de KC (Chakrabarti, 1987)

De acordo com (Kubota, Morooka e Ferrari, 2002) no escoamento ao redor de um cilindro ocorre diferença de pressão na sua superfície o que promove a separação do fluxo e a formação de vórtices em ambos os lados do cilindro, formando camadas cisalhantes que se opõem ao fluxo gerando os vórtices. A Figura 3 mostra esquematicamente o fenômeno de formação de vórtices em função do KC. A formação alternada de vórtices gera forças assimétricas em cada lado do cilindro que podem causar o deslocamento do cilindro causando o efeito de vibração induzida por vórtice (VIV). Particularmente, estruturas esbeltas, tais como o “riser” rígido de produção e perfuração, condutores e linhas em geral, estão sujeitas ao VIV. A consequência mais importante do VIV é a elevação dos níveis de tensão na estrutura contribuindo para redução de sua vida operacional. Assim sendo, a equação a seguir governa a força causada pelo VIV.

$$F_{VIV} = \frac{1}{2} \rho ((u - \dot{x}) + U_c)^2 D \bar{C}_l \cos(2\pi \bar{f}_s t' + \varphi) \quad (6)$$

Aplicando a Equação de Morison para a direção transversal, obtém-se a seguinte equação (Ferrari, 1998):

$$F_y = F_{VIV} - C_D A_D |\dot{V}_r| \dot{y} - C_A A_I \ddot{y} \quad (7)$$

onde  $F_y$  é a força transversal devido à onda e  $F_{VIV}$  = Força devido à vibração induzida por vórtices (VIV).

As vibrações axiais são um produto de vibrações transversais ao fluxo e são observadas quando a deformação axial devida às vibrações axiais de fluido em um nodo de ressonância axial.

### 3. Deslocamentos do “Riser” Rígido de Produção

A Equação de Morison utilizada para estruturas livres, oscilando sob a ação de ondas e correntezas, corresponde a um acoplamento entre as equações que descrevem: a oscilação do cilindro na presença de correntezas e na presença de ondas. Tal equação pode ser escrita somando-se as Equações 4 e 7:

$$\bar{F}_r = C_M A_I \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{F}_{VIV} + C_D A_D |\bar{V}_r| \bar{V}_r - C_A A_I (\ddot{x} + \ddot{y}) \quad (8)$$

sendo que  $|\bar{V}_r| = \sqrt{(u - \dot{x})^2 + \dot{y}^2}$ , e  $|\bar{F}_r| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ .

Neste trabalho aplicou-se a solução no domínio do tempo, utilizando-se a integração numérica direta das equações de movimento, com a inclusão de todas as não-linearidades presentes no modelo. A análise no domínio do tempo consiste basicamente na solução das equações de equilíbrio estático do “riser”, incluindo parcelas inerciais, de amortecimento e cargas aplicadas, em pontos particulares do “riser”. Neste procedimento de solução, a estabilidade e a precisão da integração no tempo devem ser cuidadosamente estudadas. Em geral, todos os métodos requerem que o intervalo de tempo seja pequeno o suficiente para representar corretamente as frequências contidas nos carregamentos ou nas respostas. Grandes intervalos de tempo resultam em análises mais rápidas e precisas para as frequências

representadas, mas podem estar perdendo contribuições importantes de frequências mais altas (Souza, Veritas e Estefen, 2002). Assim sendo, os métodos de integração no tempo têm como característica fundamental aproximar as derivadas que aparecem, no sistema de equações do movimento e gerar uma solução passo a passo com intervalos de tempo  $\Delta t$  e a solução dos deslocamentos, no final de cada intervalo, fornece as condições iniciais para o intervalo seguinte. No presente trabalho, foi aplicado o Método de Newmark- $\beta$ , com  $\beta = 1/4$ .

#### 4. Resultados

Além da análise para o “riser” em toda a sua extensão, foi feito um estudo para o comportamento de três nós distintos, correspondentes a 30m, 60m e 90m de profundidade, sob períodos de onda variados. Os parâmetros analisados para cada nó são os comportamentos hidrodinâmicos “inline” e transversal.

Para esta análise, considerou-se uma onda com a altura de 2m e um “riser” de 120m de comprimento. A Figura 5 mostra o histórico de deslocamentos para ondas com períodos (T) de 4s, 6s e 8s, respectivamente.

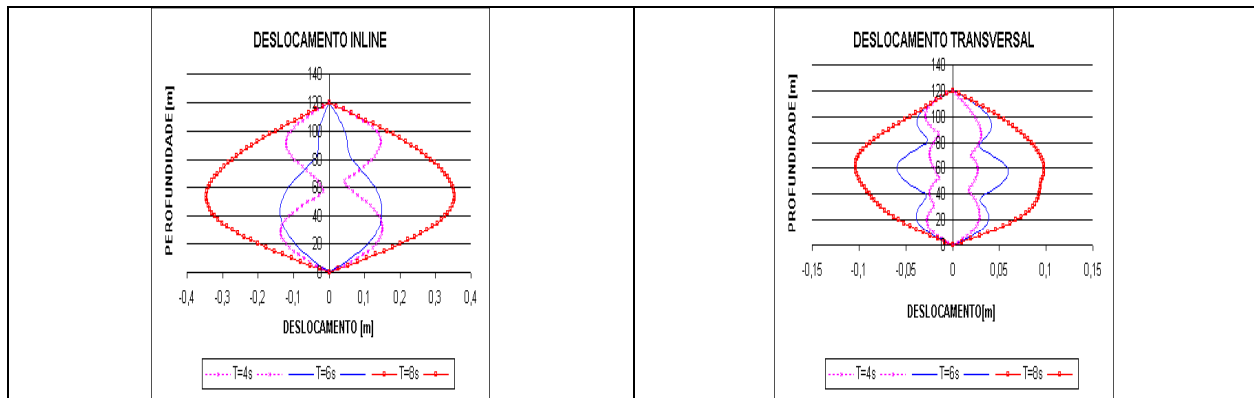


Figura 4. Deslocamentos “inline” e transversal em função da profundidade

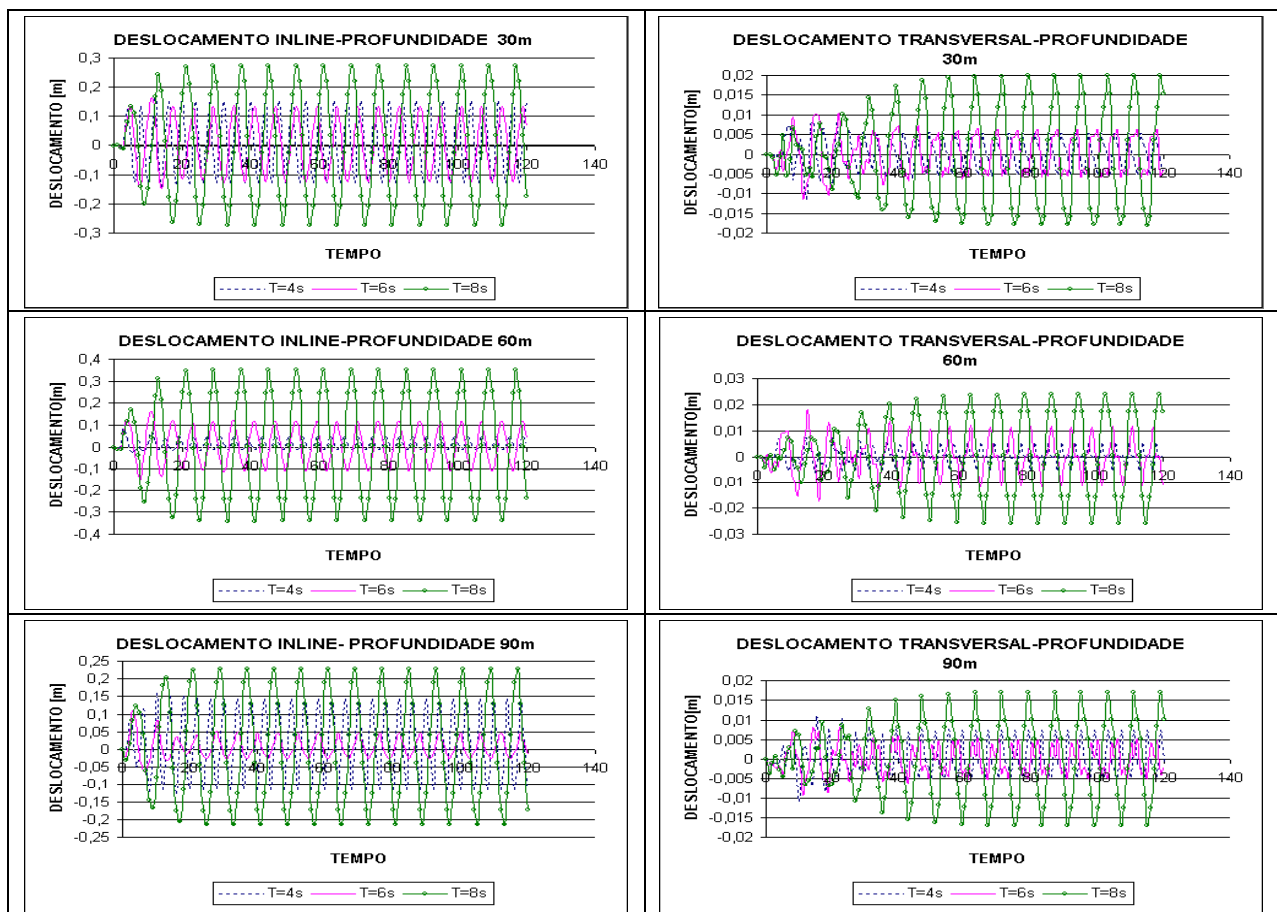


Figura 6. Gráficos dos deslocamentos para os três casos de períodos analisados

## 5. Conclusões

Verificou-se em testes realizados com o simulador numérico desenvolvido para calcular o comportamento dinâmico do “riser”, que os resultados estão compatíveis com os disponíveis na literatura. Uma verificação mais completa do programa está apresentada em Kubota et al (2002).

De uma forma geral, através da observação dos resultados obtidos neste estudo, os deslocamentos “inline” apresentam uma ordem de grandeza maior em relação aos transversais. Entretanto, o estudo do comportamento transversal é importante, pois a vibração transversal causada pelo VIV tende a diminuir a vida útil do “riser” devido a efeitos de fadiga.

Como era esperada, a análise dos históricos temporais demonstra que os deslocamentos diminuem com a profundidade, acompanhando a tendência da energia da onda que diminui com o aumento da profundidade, para os casos analisados.

## Nomenclatura

$EI$  = Rigidez à flexão da estrutura  
 $T$  = Tensão axial na parede do “riser”  
 $P_0$  = Pressão externa  
 $P_i$  = Pressão interna  
 $A_0$  = Área transversal interna do “riser” e espessura  
 $A_i$  = Área transversal do furo do “riser”  
 $A_s$  = Área transversal da parede do “riser”  
 $\gamma_0$  = Peso específico do fluido externo  
 $\gamma_i$  = Peso específico do fluido interno  
 $\gamma_s$  = Peso específico do material do “riser”  
 $N$  = Força resultante  
 $\theta$  = ângulo de deflexão  
 $t$  = tempo  
 $D$  = Diâmetro do “riser”  
 $L$  = comprimento da onda  
 $k$  = Dimensão característica de rugosidade

$\rho$  = densidade da água  
 $\nu$  = viscosidade cinemática  
 $F_x$  = Força “inline” devido à onda  
 $C_M$  = Coeficiente de inércia  
 $C_D$  = Coeficiente de arrasto  
 $C_A$  = Coeficiente de massa adicional  
 $u_0 D / \nu$  = número de Reynolds  
 $u_0 / v_0$  = parâmetro de velocidade da partícula de onda  
 $D/L$  = parâmetro de difração  
 $\rho$  = Densidade do fluido  
 $U_c$  = Velocidade da correnteza  
 $\bar{C}_t$  = Amplitude média do coeficiente transversal de força.  
 $\bar{f}_s = \frac{|\bar{U}| St}{D}$  = Freqüência média dos vórtices  
 $\varphi$  = Diferença de fase entre a resposta do “riser” e a força transversal.

$St$  = Número de Strouhal

$$\bar{U} = \frac{\int_0^t U dt}{t} = \text{Velocidade média do fluxo oscilatório.}$$
 $U$  = Velocidade instantânea do fluxo oscilatório.  
 $A_D = \rho \pi D^2 / 4$   
 $A_I = \rho D / 2$   
 $t / T$  = tempo adimensional  
 $k / D$  = parâmetro de rugosidade  
 $V_r$  = Velocidade relativa  
 $u_0 T / D = KC$   
 $u_0$  = máxima velocidade horizontal da partícula de água  
 $v_0$  = máxima velocidade vertical da partícula de água

## Agradecimentos

Os autores agradecem a PRH-ANP, Petrobrás e Finep/CTPetro pelo apoio à presente pesquisa.

## Referências

- CHAKRABARTI, S. K. , FRAMPTON, R. E., Review of “Riser” Analysis Techniques, *Chicago Bridge and Iron Co, Plainfield , IL 60544, USA*
- CHAKRABARTI, S. K., Hydrodynamics of Offshore Structures, *Computational Mechanics Publications, Springer-Verlag, 1987*
- DE A. E SOUZA, L. F. , VERITAS, D. N. , ESTEFEN, S. F., “Risers” Rígidos em Catenária: Aspectos da Verificação à Fadiga, *SOBENA 2002*.
- FERRARI, J. A , BEARMAN, P. W. , A Quasi 3-D Model for the Hydrodynamic Loading and Response of Offshore “risers” *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference of Offshore and Polar Engineering, Brest, France, June 1999.*
- KUBOTA, H. Y. , MOROOKA, C. K. , JR FERRARI, J. A. , NISHIMOTO, K., Cálculo Quase 3D do Comportamento de “Riser” Rígido de Produção, *SOBENA 2002*
- GUESSNON, J. , GAILLARD, CH. , RICHARD, F.: Ultra Deep Water Drilling “Riser” Design and Relative Technology