

**Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP**

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

---

## **Simulação Numérica do Comportamento de *Risers* de Produção em Águas Ultra Profundas**

Fabio Moreira Coelho<sup>1</sup>, Saon Crispim Vieira<sup>2</sup>, Celso Kazuyuki Morooka<sup>3</sup>

Cyntia Gonçalves da Costa<sup>4</sup>, Ricardo Franciss<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Universidade Estadual de Campinas, DEP-FEM-UNICAMP Cx. P. 6122 Campinas, SP 13083-970, [fabio@dep.fem.unicamp.br](mailto:fabio@dep.fem.unicamp.br)

<sup>4, 5</sup> PETROBRAS / CENPES, Rio de Janeiro, RJ 21949-900, [cyntiagc@petrobras.com.br](mailto:cyntiagc@petrobras.com.br)

**Resumo** – Em águas ultra-profundas, uma das limitações encontradas pelos projetistas de Sistemas Marítimos de Produção é a utilização de *risers* flexíveis tanto pelo custo quanto pelas dificuldades operacionais. O *riser* vertical rígido tem se mostrado uma alternativa interessante quando utilizado em conjunto com plataformas do tipo TLP's e Spars, podendo ser inclusive utilizado em configurações híbridas em conjunto com plataformas do tipo Semi-submersível. O presente trabalho tem por objetivo analisar o comportamento dinâmico de um *riser* vertical de produção com tensionamento no topo submetido ao carregamento de onda e correnteza na direção *in line*, ou seja, na direção do carregamento. A vibração induzida por vórtices na direção transversal ao carregamento, conhecida como VIV, também é considerada na análise. São apresentados resultados em termos de envoltórias máximas e séries temporais de deslocamento e tensão, assim como os pontos de máxima tensão em cada seção transversal ao longo do comprimento do *riser*.

Palavras-Chave: *Riser* Vertical de produção; VIV; Tensões.

**Abstract** – An important limitation in offshore petroleum production systems design is the use of flexible production risers mainly due to its cost and operational difficulties in ultra deep waters. The rigid vertical riser connected to TLP's and Spars has been an interesting alternative, and also if used in hybrid configurations with Semi-submersible platforms and FPSOs. The present work has as objective the analysis of dynamic behavior of top tensioned vertical production risers submitted to the environment, such as wave and current loads in the riser *in line* direction and vortex induced vibration (VIV) in the riser transverse direction. Results and discussions are presented in terms of maximum envelopes of riser displacements and bending moments along its length, and times series of axial stress, as well as, maximum axial stress locations are shown along the riser length.

Keywords: Vertical production riser, VIV, Stresses.

## 1. Introdução

Nos dias atuais, as fronteiras de exploração petrolífera estão se expandindo para ambientes marítimos de águas profundas e ultra-profundas sob condições ambientais adversas. Nestes cenários os diversos tipos e configurações de *risers* são peças fundamentais na elevação do petróleo do fundo do mar à plataforma, sendo que estudos e simulações de suas características operacionais são de extrema importância para a indústria petrolífera quando são submetidos a condições ambientais extremas como ondas, correntezas e movimentos de plataforma. Neste cenário, modelos que reproduzem o comportamento dinâmico e estrutural do *riser* representam um auxílio considerável aos critérios de projeto.

No presente trabalho serão estudados os efeitos que diversas configurações de carregamento ambientais, tais como de correnteza e onda, assim como a influência da vibração induzida por vórtices têm sobre deslocamentos e tensões ao longo do *riser*. Os pontos de máxima tensão em cada seção transversal também são objetos de estudo neste trabalho. São apresentados os respectivos deslocamentos, momentos e tensões em forma de envoltórias máximas e séries temporais. Pretende-se com tal estudo auxiliar considerações posteriores quanto à redução de vida útil por fadiga devido à natureza cíclica dos esforços atuantes na seção transversal do *riser*.

## 2. Comportamento Mecânico do *riser*

### 2.1. Comportamento Estático e Dinâmico

O comportamento estrutural do *riser* é obtido utilizando-se de um modelo bidimensional de viga, sendo o *riser* considerado como uma viga de geometria arbitrária sujeita à carregamentos laterais e efeitos das pressões internas e externas como apresentado na Figura 1:

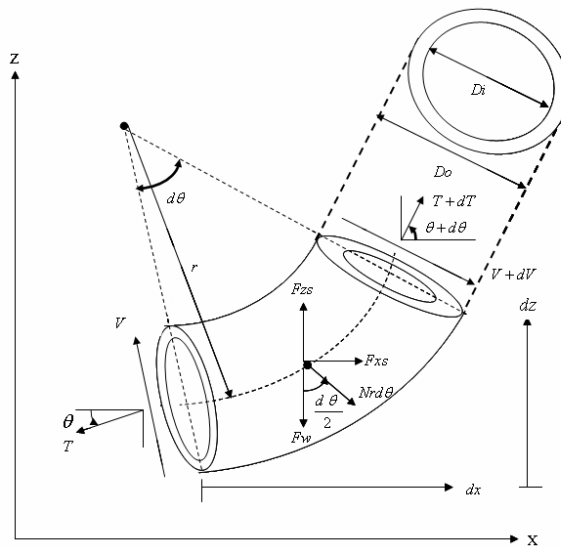


Figura 1. Equilíbrio Estático do *Riser*

Do diagrama de equilíbrio acima e considerando que a resultante do peso de uma seção elementar infinitesimal do *riser*, bem como a resultante das pressões internas e externas agem no centro do elemento, e assumindo que as deflexões são de ordem infinitesimal, obtemos a seguinte equação estática para os deslocamentos do *riser*:

$$\frac{d^2}{dz^2} \left( EI \frac{d^2 x}{dz^2} \right) - (T + A_0 P_0 - A_I P_I) \frac{d^2 x}{dz^2} = \left[ (\gamma_s (A_0 - A_I) - f_{zs} - A_0 \gamma_0 + A_I \gamma_I) \right] \frac{dx}{dz} + N \quad (1)$$

onde,  $EI$  representa a rigidez à flexão,  $T$  é a tensão axial na parede do *riser*,  $P_0$  e  $P_I$  são as pressões externa e interna,  $\gamma_0$ ,  $\gamma_i$  e  $\gamma_s$  são respectivamente o peso específico dos fluidos externo e interno e do material do *riser*,  $A_0$  é a área da seção transversal externa do *riser* e  $A_I$  é a área da seção transversal interna.

A Equação de Morison modificada para as velocidades relativas é a utilizada para a obtenção das forças hidrodinâmicas na direção *in line*, como mostrado na Equação 2:

$$F_x = A_I \dot{u} + C_A A_D (\dot{u} - \ddot{x}) + C_D A_O |u + U_c - \dot{x}| (u + U_c - \dot{x}) \quad (2)$$

onde,  $A_I = \rho\pi D_I^2/4$ ,  $A_O = \rho\pi D_O^2/4$ ,  $A_D = \rho D_O/2$ ,  $F_x$  é a força “in-line” por unidade de comprimento,  $C_M$  é o coeficiente de inércia,  $C_D$  é o coeficiente de arrasto,  $C_A$  é o coeficiente de massa adicionada,  $U_c$  é a velocidade de correnteza, e  $u$  é a velocidade da partícula de água sujeita à onda. A teoria utilizada para a obtenção da cinemática da onda foi a Teoria de Stokes de 5ª. ordem.

Para calcular as forças transversais ao longo do *riser*, o presente estudo adota-se a metodologia apresentada em Ferrari & Bearman (1999), conforme apresentado na Equação 3:

$$F_{VIV} = \frac{1}{2} \rho [(u - \dot{x}) + U_c]^2 D_O \bar{C}_t \cos(2\pi \bar{f}_s t + \varphi) \quad (3)$$

onde,  $\bar{f}_s = \frac{|\bar{U}| St}{D}$  e  $\bar{U} = \frac{\int_0^t (u - \dot{x} + U_c) dt}{t - t_0}$ ,  $\bar{C}_t$  é a amplitude média da força transversal,  $\bar{f}_s$  é a frequência média de desprendimento de vórtices,  $\varphi$  é a diferença de fase entre a força transversal e a resposta do *riser* em termos de deslocamento nesta direção,  $St$  é o número de Strouhal,  $\bar{U}$  é a velocidade média cumulativa do fluxo oscilatório,  $U_c$  é a velocidade da correnteza e  $F_{VIV}$  é a força por unidade de comprimento devida à VIV. Adotando novamente a Equação de Morison podemos encontrar a força transversal considerando-se os termos de inércia do fluido e do amortecimento viscoso :

$$F_y = F_{VIV} - C_D A_O |V_r| \dot{y} - C_A A_I \ddot{y} \quad (4)$$

onde,  $F_y$  é a força transversal por unidade de comprimento,  $\dot{y}$  e  $\ddot{y}$  são a velocidade e aceleração do *riser* na direção transversal, respectivamente.

As Equações 2 e 4 podem ser adicionadas vetorialmente resultando na força hidrodinâmica bidimensional para o *riser* como apresentado abaixo:

$$\vec{F}_r = C_M A_D \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{F}_{VIV} + C_D A_O |\vec{V}_r| \vec{V}_r - C_A A_D (\ddot{\vec{x}} + \ddot{\vec{y}}) \quad (5)$$

onde,  $|V_r| = \sqrt{(u - \dot{x})^2 + \dot{y}^2}$ , e  $|\vec{F}_r| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ . No presente trabalho, a estrutura do *riser* é dividida em elementos finitos e a massa de cada elemento é considerada como concentrada em seus nós. O comportamento dinâmico do *riser* é obtido para as direções *in line* e transversal. Massa, rigidez e amortecimento estrutural são considerados na solução numérica da equação do comportamento dinâmico do *riser*, em termos de deslocamentos no domínio do tempo. O comportamento dinâmico do *riser* na forma matricial, pode ser representado pelas seguintes equações:

$$[M]_x \ddot{x} + [B]_x \dot{x} + [K]_x x = C_M A_I \frac{\partial u}{\partial t} + C_D A_D |V_r| (u + U_c - \dot{x}) - C_A A_I \ddot{x} \quad (6)$$

$$[M]_y \ddot{y} + [B]_y \dot{y} + [K]_y y = -C_A A_I \ddot{y} - C_D A_D |V_r| \dot{y} + \frac{1}{2} \rho [(u - \dot{x}) + U_c]^2 D \bar{C}_t \cos(2\pi \bar{f}_s t + \varphi) \quad (7)$$

O método de solução das Equações do comportamento dinâmico envolve a integração das equações por intervalos discretos do tempo, considerando o termo não linear do amortecimento viscoso. O acoplamento entre os deslocamentos nos dois sentidos considerados aqui ocorre de acordo com a formulação para as forças externas.

O carregamento de ondas, correntezas, movimentos da plataforma e a vibração induzida por vórtices são responsáveis por esforços cíclicos que causam uma redução significativa na vida útil do *riser*. O trabalho atual faz uma análise da tensão axial presente nas seções transversais ao longo do comprimento do *riser*. Para tal a descrição dos esforços aos quais o *riser* é submetido torna-se necessária. Os valores das tensões axiais presentes em uma seção transversal localizada em um ponto qualquer ao longo do comprimento do *riser* e ao longo do tempo podem ser obtidos de acordo com a Equação 8, conforme a seguir:

$$S(t) = FCT \left\{ \pm \left[ \frac{M_y(t)}{I_y} \right] X_i \pm \left[ \frac{M_x(t)}{I_x} \right] Y_i \pm \left[ \frac{F_z(t)}{A} \right] \right\} \quad (8)$$

onde,  $S(t)$  é a tensão ao longo do tempo em um determinado ponto de uma seção transversal do *riser*,  $M_Y(t)$  e  $M_X(t)$  são os momentos devidos à flexão proveniente dos carregamentos na direção *in line* e transversal, respectivamente, ao longo do tempo,  $I$  é o momento da inércia em relação ao eixo da seção; FCT é o fator de concentração de tensão;  $Y_i$ ,  $X_i$  são as distâncias de um ponto qualquer em uma determinada seção transversal em relação à linha neutra naquela seção,  $A$  é a área da seção transversal e  $F_Z(t)$  é a força de tração agindo na seção transversal. Portanto, para cada um dos diversos pontos da extremidade de uma determinada seção transversal considerados nos cálculos, a composição da tensão axial é feita considerando-se as flexões devidas aos carregamentos *in line* e transversal e a distribuição linear de tração na parede do *riser*.

A rotina numérica que trata da análise de tensões em uma determinada seção transversal determina o ponto de valor máximo de tensão  $S(t)$  pela variação do índice  $i$ . Com isso é possível determinar os pontos em diversas seções transversais ao longo do *riser* em que haveria uma possível ruptura por fadiga. Este estudo é um dos objetivos deste trabalho e resultados referentes são apresentados.

### 3. Resultados

Foram realizados cálculos utilizando-se uma ferramenta numérica baseada no modelo descrito acima para investigar o comportamento do *riser* considerando diferentes carregamentos de onda e correnteza. Os resultados são apresentados na forma de envoltórias de máximos valores de deslocamentos e momentos devidos à flexão. As séries temporais das tensões também são apresentadas para um determinado ponto de uma seção transversal. Os pontos das seções transversais ao longo do *riser* onde ocorrem os valores máximos de tensão também são apresentados.

Para todos os cálculos foi considerado um *riser* de 1800 m de comprimento, com um diâmetro externo de 0.25 m e um diâmetro interno de 0.21106m e com uma tração aplicada no topo com o valor de 2200 KN. O material do *riser* possui um módulo de elasticidade de 210 GPa e uma densidade de 7860 Kg/m<sup>3</sup>. A densidade do fluido interno ao *riser* é 800 Kg/m<sup>3</sup> e a densidade da água é 1025 Kg/m<sup>3</sup>. Foi considerado também um fator de amortecimento estrutural igual a 0.02. No que diz respeito aos coeficientes hidrodinâmicos, foi considerado um valor para  $C_D$  igual a 1.2,  $C_A$  igual a 1.0 e  $C_L$  igual a 1.2. O número de *Strouhal* utilizado no cálculo da frequência de desprendimento de vórtices foi adotado como sendo igual a 0.17.

São apresentados cinco diferentes configurações de carregamento para o *riser* descrito acima conforme apresentado na Tabela 1:

Tabela 1: Tipos de carregamentos considerados na análise

|        |                                                                                          |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caso 1 | Somente onda de 4 metros de altura e 8 segundos de período                               |
| Caso 2 | Somente onda de 4 metros de altura e 12 segundos de período                              |
| Caso 3 | Somente perfil linear de correnteza com velocidade no topo de 1.5 m/s e no fundo 0.1 m/s |
| Caso 4 | Somente perfil linear de correnteza com velocidade no topo de 1.0 m/s e no fundo 0.1 m/s |
| Caso 5 | Somente perfil constante de correnteza com velocidade de 1.0 m/s                         |

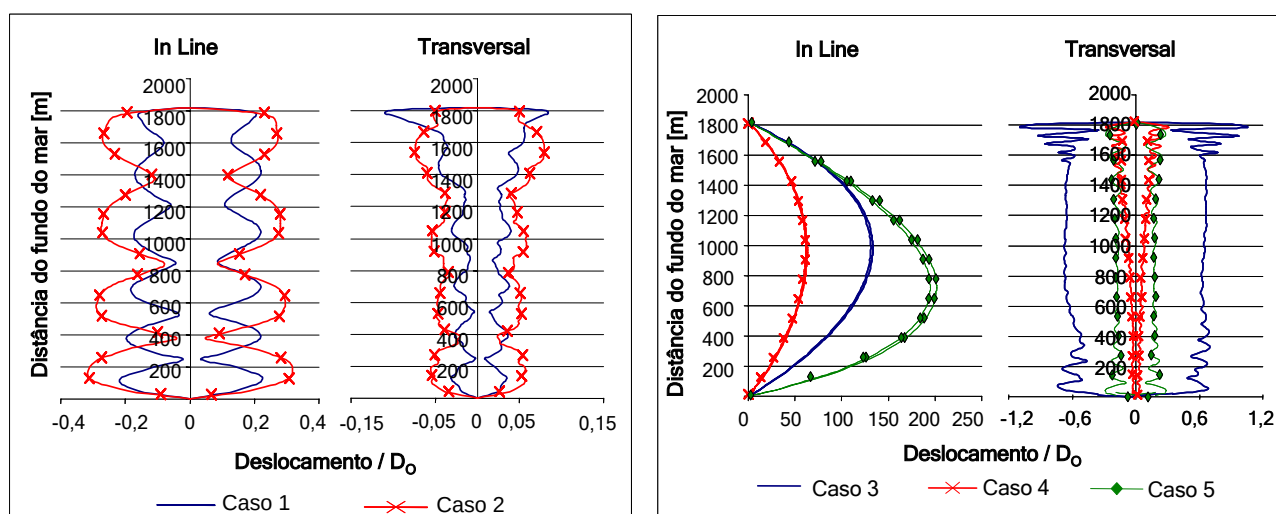


Figura 2: Deslocamentos *in line* e transversal para os Casos de 1 a 5

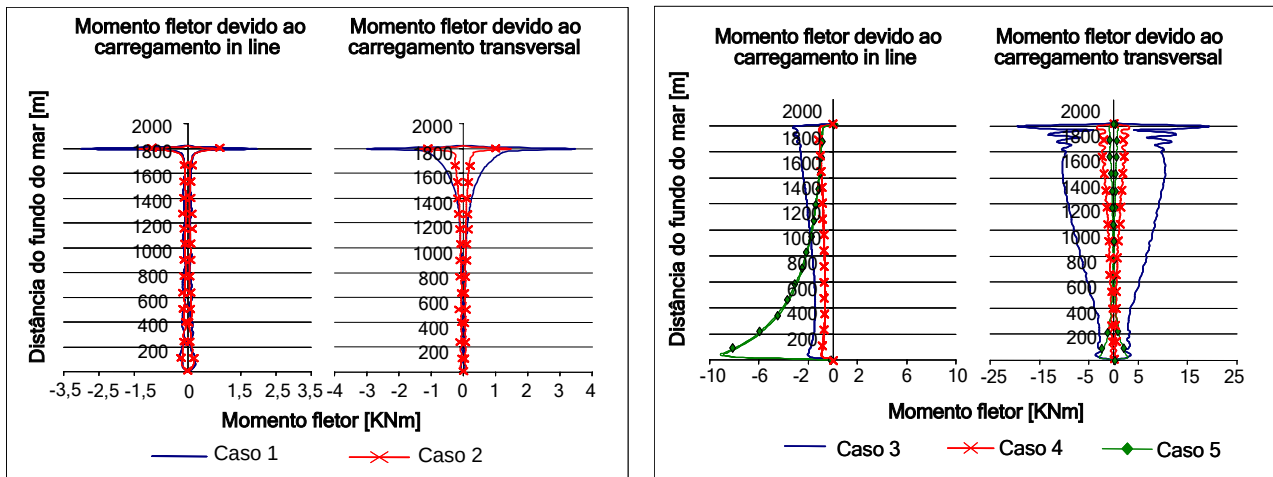


Figura 3: Momentos fletores devidos aos carregamentos *in line* e transversal para os Casos de 1 a 5

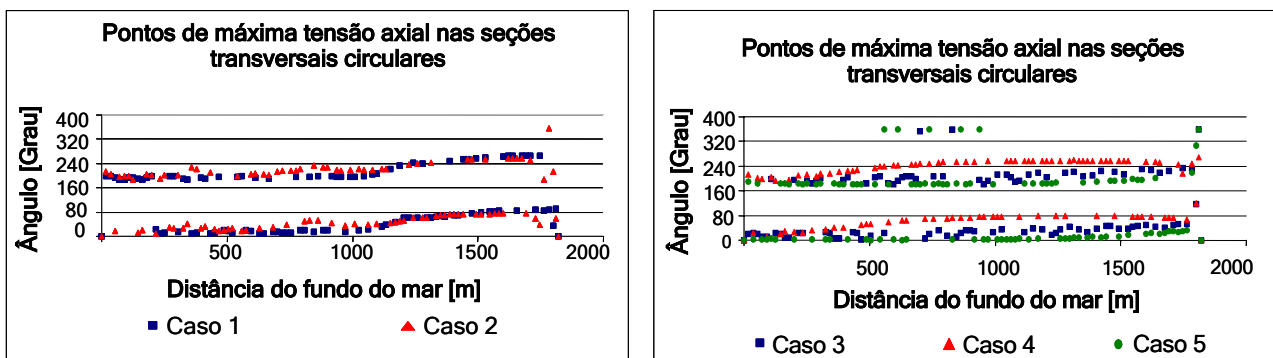


Figura 4: Pontos de máxima tensão axial nas seções transversais ao longo do *riser* para os Casos de 1 a 5

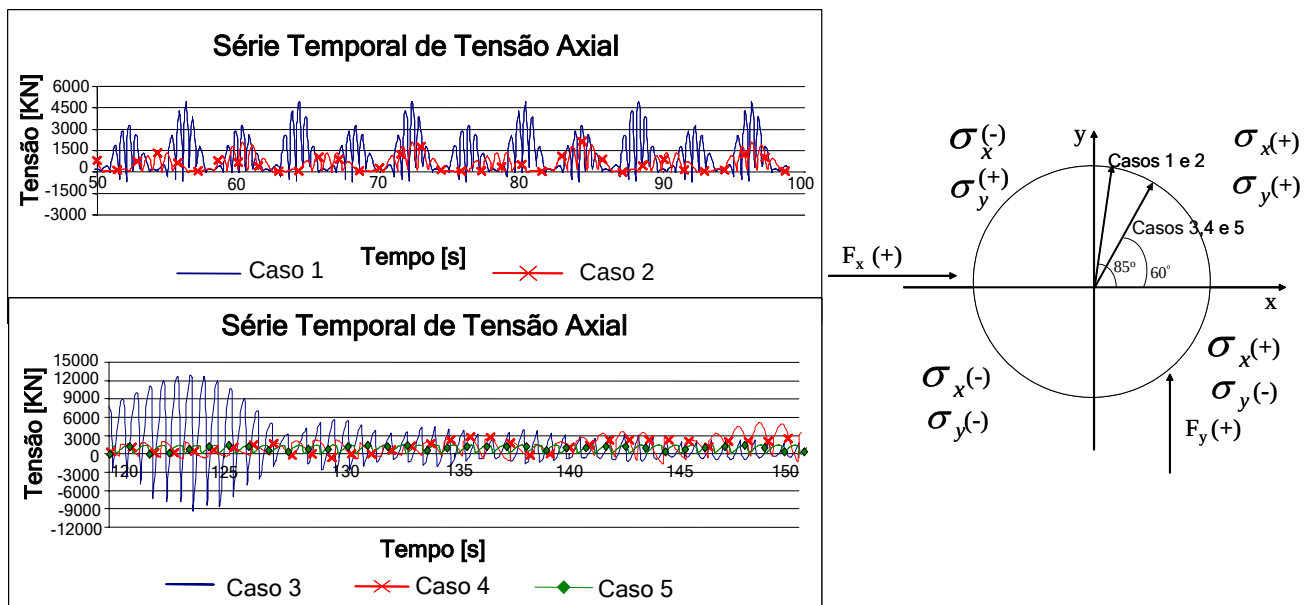


Figura 5: Séries Temporais de tensão axial e convenção de sinais utilizada na composição das tensões, respectivamente.

A Figura 1 apresenta os resultados em termos de deslocamento dividido pelo diâmetro do *riser*. Percebe-se que nos Casos 1 e 2, somente carregamento de onda, com o aumento do período da onda e a conseqüente diminuição na frequência de excitação na direção *in line* há uma diminuição no número de modos de vibração excitados. O mesmo se

observa para a direção transversal, uma vez que com a diminuição na frequência da onda há uma diminuição na velocidade da partícula de água  $u$ , causando uma diminuição na frequência de desprendimento de vórtices e causando conseqüentemente, uma diminuição na frequência de excitação na direção transversal. Com relação aos Casos 3,4 e 5 percebe-se que há um aumento no deslocamento na direção *in line* quando se considera um perfil constante de correnteza em comparação aos outros dois perfis de distribuição linear. Na direção transversal, observa-se que um aumento na amplitude de deslocamento e no número de modos excitados com o aumento da velocidade de correnteza. O primeiro se dá pelo fato de que a força de VIV é proporcional ao quadrado da velocidade de correnteza em um determinado ponto do *riser*, e o segundo se dá devido ao aumento da frequência de excitação através da frequência de desprendimento de vórtices acarretado pelo aumento na velocidade de correnteza.

A Figura 3 apresenta os respectivos momentos fletores para os diversos casos considerados. Nos Casos 1 e 2 percebe-se um aumento do momento próximo à superfície do mar, principalmente devido ao aumento da influência do carregamento de onda nestas proximidades. Já nos Casos 3, 4 e 5, percebe-se que para o perfil de correnteza constante há um momento grande próximo à base do *riser* na direção *in line*. Isto pode ser explicado pelo fato da força de carregamento ser constante ao longo de todo o *riser*, e a região próxima de sua base possuir uma tensão efetiva menor com conseqüente rigidez à flexão menor e apresentar deslocamentos maiores. Observando-se os momentos devidos ao carregamento na direção transversal nota-se que a flexão devida a VIV é significativa, causando grandes momentos e conseqüentemente influenciando significativamente nos componentes das tensões devidos à flexão.

A Figura 4 apresenta em forma de ângulos de posição, os pontos de cada seção transversal ao longo do *riser* em que há um valor máximo de tensão axial, considerando-se as componentes de flexão devidas aos carregamentos *in line* e transversal e a componente devida à força de tração. O sistema de coordenadas das seções transversais está ilustrado na Figura 5. Nos casos 1 e 2 percebe-se que a influência da VIV nos valores de máxima tensão cresce à medida que nos aproximamos da superfície da água já que a influência da onda aumenta neste ponto, aumentando a velocidade da partícula de água que por sua vez aumenta não só a amplitude da força de VIV, mas também como já dito a frequência de desprendimento de vórtices. Para os casos 3, 4 e 5 percebe-se que quanto menor o deslocamento do *riser* na direção *in line* maior a influência da VIV nos valores das tensões axiais.

A Figura 5 apresenta as séries temporais de tensão axial para todos os casos em estudo. Para os casos 1 e 2, a seção transversal escolhida para a visualização da série temporal localiza-se exatamente na lâmina d'água e o ponto desta seção analisado é apresentado também na Figura 5. Para os Casos 3, 4 e 5, a seção transversal escolhida localiza-se no ponto de 1350m, do fundo para o topo e o ponto escolhido nesta seção transversal é também apresentado na convenção na Figura 5. As tensões são compostas conforme a Equação 8. Em todos os casos, como é de se esperar, o número de ciclos das tensões aumenta na medida em que se aumentam as frequências de excitação *in line* e transversal.

## 4. Conclusões

O estudo do comportamento do *riser* vertical de produção tem produzido ferramental e métodos importantes para efetuar cálculos de previsão necessários em critérios de projeto para *risers* de produção, considerando-se a redução de vida útil devido à fadiga.

O modelo hidrodinâmico utilizado neste trabalho tem se mostrado útil permitindo calcular tensões devidas à flexão na direção transversal causadas pelo desprendimento de vórtices. Tais tensões são de importante consideração como apresentado neste trabalho, uma vez que tendem a aumentar não só a amplitude da composição de tensões como também o número de ciclos de tensão. Em geral, estas tensões apresentam forma altamente irregular, e assim, estas tensões devem receber tratamento estatístico e probabilístico de análise adequado, para cálculo de eventuais danos à fadiga de *riser*. O que se pretende realizar em estudos posteriores.

## 5. Referências Bibliográficas

- CHAKRABARTI, S.K., "Hydrodynamics of Offshore Structures", Computational Mechanics Publications, Southampton, Great Britain.
- 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.
- MARTINS, F.P.; KUBOTA, H.Y.; MOROOKA, C.K.; FERRARI JR. J.A.; RIBEIRO, E.J.B.; "Estudo do Comportamento Dinâmico *in line* e transversal de Riser Rígido de Produção", "2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás, 2003".