

ESTUDO DE PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DA OPERAÇÃO E PROJETO DE *RISERS* DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO.

Maurício J. H. Suzuki¹ (UNICAMP), Caio M. R. Frizzone² (UNICAMP)
Celso K. Morooka (UNICAMP), Sergio N. Bordalo (UNICAMP).

¹DEP-FEM-UNICAMP Cx. P. 6122, 13083-970, Campinas-SP,
msuzuki@dep.fem.unicamp.br

²DEP-FEM-UNICAMP Cx. P. 6122, 13083-970, Campinas-SP,
frizzone@dep.fem.unicamp.br

Risers de produção são elementos tubulares que conectam a cabeça de um poço no fundo do mar a uma plataforma de petróleo, escoando a produção de óleo e gás. Para o estudo de uma sistemática para análise de operação e projeto de *risers*, faz-se muito importante o entendimento da modelagem matemática para previsão de seu comportamento estático e dinâmico e avaliação de sua vida útil. O objetivo dessa previsão é buscar uma melhor configuração para sua operação e projeto em função, principalmente, da profundidade de operação e das condições ambientais. Procedimentos numéricos e rotinas computacionais têm sido desenvolvidos para determinar comportamento de um *riser*. Forças hidrodinâmicas, devido aos carregamentos ambientais, tais como esforços de ondas e correntezas marítimas, influenciam o comportamento de *risers*, e ainda, quando são conectados a plataformas flutuantes de produção, estas estando também sujeitas a ondas e correntezas, apresentam movimentos que se transferem aos *risers*. Estas excitações de diferentes origens geram esforços e tensões na estrutura dos *risers*. Outro fenômeno muito importante é oriundo dos esforços oscilatórios devido ao escoamento interno. Devido à variação da quantidade de movimento do fluxo bifásico interno à tubulação do *riser*, levando este a movimentar, acaba solicitando a estrutura do *riser* de forma a reduzir também a sua vida útil. O presente trabalho envolve a descrição dos pontos principais do estudo dos fundamentos teóricos relacionados ao comportamento de *risers* sob a ação do meio ambiente e movimentos de plataformas flutuantes. Envolve, também, a aplicação de desenvolvimentos numéricos disponíveis para consolidar os conhecimentos teóricos adquiridos e apresentação de algumas comparações com medições em laboratório para aprimoramento dos conceitos estudados. E, finalmente, apresenta uma análise e discussão dos resultados do presente estudo relacionados a procedimentos de análise da operação e do projeto de *risers* de produção de petróleo em lâminas de água de grande profundidade.

Palavras-chaves – 1. Produção de Óleo e Gás 2. Sistema Marítimo de Produção 3. *Risers*.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a exploração e a produção de petróleo ocorrem, principalmente, no mar e em profundidades cada vez maiores. Segundo dados da Agência Nacional de Petróleo (2007), cerca de 88 milhões de metros cúbicos de petróleo (óleo e condensado) foram produzidos no mar no ano de 2006. Isso equivale a cerca de 90% da produção nacional no período. Devido a esse fato, é comprovada a necessidade de se avançar no estudo de novas tecnologias e na solução para sistemas marítimos de produção. Um dos componentes fundamentais nesse sistema são os *risers* marítimos de produção.

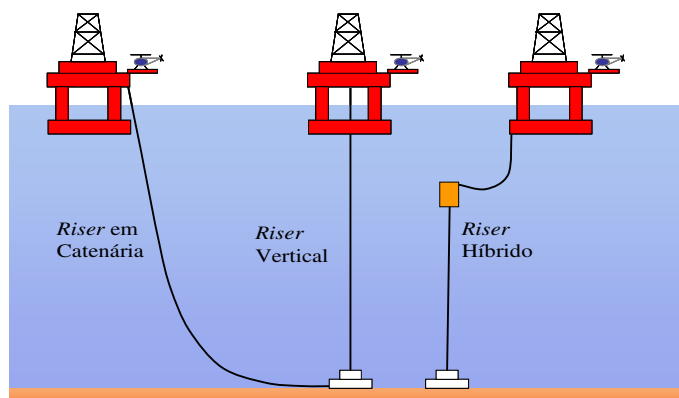


Figura 1 – Configuração de *riser* rígidos

Risers marítimos de produção são elementos tubulares conectados entre si, formando uma tubulação muito esbelta de longo comprimento, a qual tem como objetivo interligar o poço de petróleo localizado no fundo do mar a uma plataforma na superfície, e também servindo para escoar a produção de óleo e gás. Normalmente, *risers* podem ser de dois tipos: flexível ou rígido.

Risers flexíveis são compostas por várias camadas metálicas e poliméricas, cujo conjunto das camadas proporciona resistência e torna a tubulação estanque, sem comprometer a sua flexibilidade. Os *risers* flexíveis são empregados, principalmente, com sistemas flutuantes de produção e completação submarina.

Já os *risers* rígidos, como o próprio nome diz, são fabricados de materiais mais rígidos como, por exemplo, o aço, e podem ser configurados na vertical, na conformação de catenária, ou ainda, combinado com partes flexíveis na forma híbrida, conforme Figura 1. Na configuração vertical, os *risers* geralmente estão submetidos a uma tração de topo para estar constantemente sob tração, evitando a flambagem do *riser*. E ainda, o sistema de *risers* deve atender a certos limites operacionais, tais como não de sofrer grandes deslocamentos, ou atender a limites de resistência de material estabelecidos por suas normas de fabricação e operação.

A vantagem de *risers* flexíveis em relação à *risers* rígidos é suportar mais facilmente as flexões a que normalmente estão submetidas durante sua operação. No entanto, a grande desvantagem é a limitação para sua produção em grandes diâmetros e dificuldades de armazenamento em carretéis para sua instalação, através de operações marítimas.

O comportamento dinâmico do *riser* é influenciado pelos movimentos da plataforma, os quais são causados, principalmente, pelas ondas marítimas. Esses movimentos podem ocorrer através dos seis graus de liberdade de um corpo flutuante, isto é, três translações e três rotações. Sua análise deve ser conduzida com extremo cuidado, pois os movimentos oriundos da plataforma flutuante ou navio mais o carregamento oriundo das ondas e correntezas marítimas no *riser* podem provocar o seu rompimento, resultando eventualmente em graves impactos ambientais e perdas financeiras.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A análise do comportamento dinâmico de um *riser* pode ser abordada a partir de dois métodos: o analítico e o numérico. Devido à dificuldade de obtenção de uma solução analítica exata, em geral, o método analítico demanda, muitas vezes, simplificações que produzem modelos matemáticos mais simplificados e, em geral, lineares, dificultando considerações de geometria mais complexa e propriedades dos materiais variáveis e/ou descontínuos. Por outro lado, o método numérico permite calcular soluções aproximadas aceitáveis através de programas de cálculo numérico desenvolvidos em computadores. O método numérico permite solução de modelos matemáticos não-lineares, inclusive com considerações de geometrias e configurações mais complicadas de um sistema de *riser*.

A solução do comportamento dinâmico pode ser obtida para o domínio do tempo ou da frequência. A solução numérica no domínio do tempo se obtém através da integração numérica na variável tempo, das equações do comportamento dinâmico do *riser*. A equação de uma viga sob tração é normalmente adotada para a modelagem matemática do *riser*, e se aplica usualmente o método dos elementos finitos. O método dos elementos finitos tem como base o método de Rayleigh-Ritz que consiste na divisão do domínio de integração, contínuo, em um número finito de pequenas regiões denominadas de elementos finitos, tornando o meio contínuo em discreto, e a solução encontrada de forma aproximada à solução analítica.

Como uma ferramenta auxiliar no processo da análise do comportamento dinâmico de *risers*, a utilização de procedimentos experimentais é fundamental nesse processo. Através de técnicas de redução de escala do protótipo e construção de modelos, instrumentação do modelo, aquisição de sinais obtidos de sensores dimensionados e instalados no modelo e o tratamento adequado das medições realizadas complementam, de forma importante, a análise do comportamento de *risers*. Ressalta-se ainda a importância das premissas básicas de semelhança entre modelo e protótipo a serem obedecidas, particularmente no que se refere aos escoamentos de fluidos, tanto interno ao *riser* (petróleo) como externo, devido à correnteza marítima, isto é, deve atender aos requisitos da semelhança geométrica, cinemática e dinâmica.

Assim sendo, a análise experimental possibilita o diagnóstico de processos de interesse mais prático, o qual permite a interpretação física do problema, e ainda, avaliar e aperfeiçoar os métodos de cálculo aplicado. Finalmente, possibilitam a aferição e validação dos métodos analítico e numérico de análise.

3. METODOLOGIA

3.1. Abordagem analítica

No estudo de *risers* na configuração em catenária, o conceito de tração efetiva tem papel muito importante, particularmente na determinação da configuração de equilíbrio estático do *riser*. A configuração de equilíbrio estático é imposta pelo próprio peso imerso do tubo, pelas coordenadas do ponto de suspensão (*offset* da plataforma) e pelas cargas hidrodinâmicas estacionárias relacionadas à correnteza e à pressão hidrostática.

No presente trabalho, como exemplo de aplicação na modelagem e determinação das trações efetivas do *riser*, seguem hipóteses adotadas por simplicidade, entretanto, sem alterar de forma significativa os resultados e conclusões finais. Segundo Bai (2001), a aproximação de “cabo” para análise estática de linhas permite considerar a rigidez à flexão desprezível (infinitamente flexível), e apresenta resultados bastante satisfatórios.

Neste caso, a equação da configuração estática pode ser dada por:

$$z(x) = \frac{T_0}{w} \cosh\left(\frac{w}{T_0} x\right) \quad (1)$$

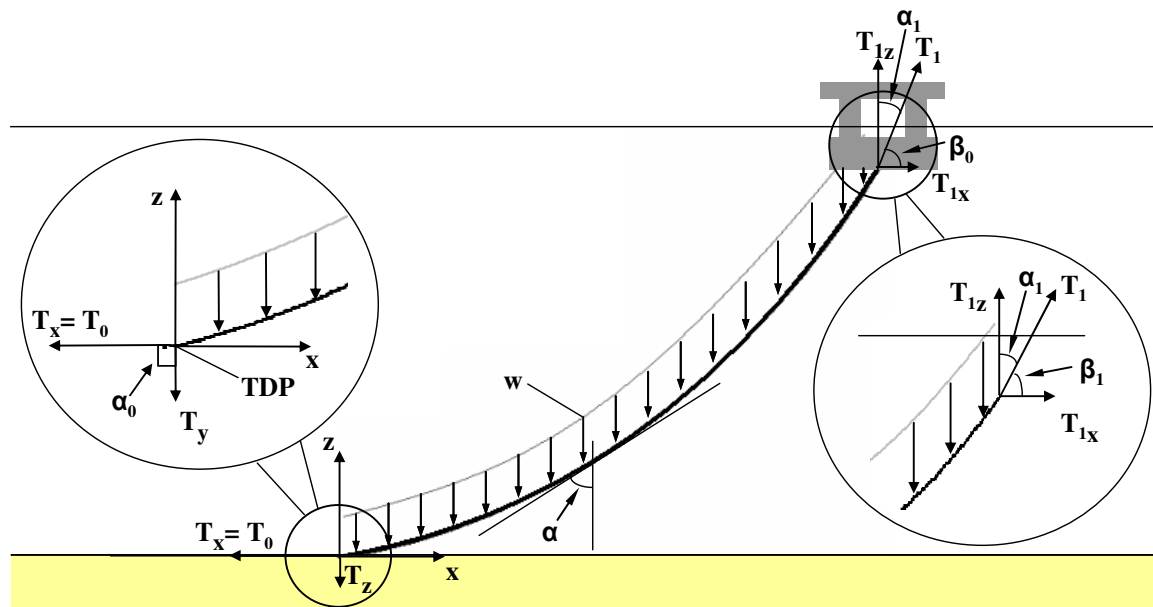


Figura 2 – Diagrama de Corpo Livre simplificado de *riser* rígido em catenária.

E tendo em vista a relação $\frac{dz(x)}{dx} = \tan(\beta)$, o ângulo da inclinação de cada elemento do *riser* também pode ser calculado. A tração efetiva resultante, na direção axial da linha, pode ser obtida também para qualquer ponto do *riser*, a partir dos balanços de força nas direções x e z entre as regiões do topo e ponto de toque no fundo (TDP- *Touch Down Point*).

3.2. Abordagem numérica

O comportamento estático e o dinâmico de um *riser* podem ser modelados representando o elemento tubular do *riser* com uma viga sob tração sujeita a forças hidrodinâmicas e a pressões tanto interna quanto externa, além da força peso. O *riser* está sujeito a translações e a rotações, reações de uma viga quando submetida a ações de forças transversais e axiais. A análise, em geral, está restrita a duas dimensões com uma geometria arbitrária (Martins *et al.* 2002).

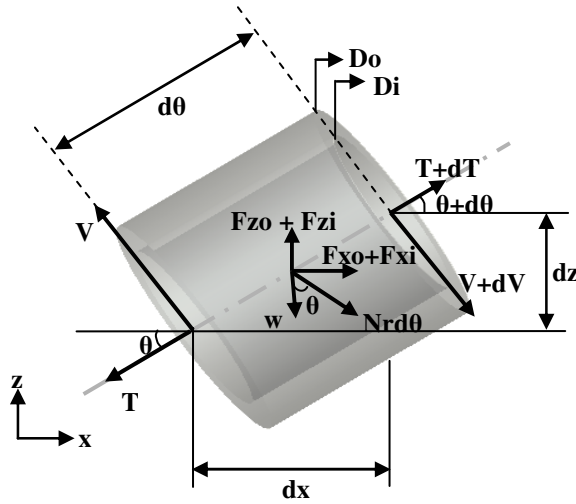


Figura 3 – Diagrama de corpo livre para um segmento infinitesimal do *riser*.

Na Figura 3 estão mostradas T = Tensão axial, $F_{xo} + F_{xi}$ = Força horizontal resultante devido a pressões interna e externa, $F_{zo} + F_{zi}$ = Força vertical resultante devido a pressões interna e externa, N = Força de arrasto devido à correnteza, W = Peso próprio, V = Força cortante, D_o = Diâmetro externo e D_i = Diâmetro interno. Assim, utilizando as equações de equilíbrio para segmento infinitesimal (Figura 3) em que a resultante do seu peso, pressão interna e externa age no centro de elemento e assumindo pequenas deflexões, tem-se que:

$$\frac{d^2}{dz^2} \left(EI \frac{d^2 x}{dz^2} \right) - (T + A_o P_o - A_i P_i) \frac{d^2 x}{dz^2} - (\gamma_s A_s + \gamma_i A_i - \gamma_o A_o) \frac{dx}{dz} = N \quad (2)$$

A Equação (2) representa a equação diferencial da deflexão estática do *riser* rígido sob a ação de carregamento lateral, em que EI representa a rigidez; T é a tensão axial; P_o e P_i são pressões externa e interna, respectivamente; γ_o, γ_i e γ_s são, respectivamente, peso específico do fluido interno e externo e material do *riser*; A_o é a área da secção transversal externa do *riser* e A_i é a área a secção transversal interna do *riser*. O sistema global de coordenadas considera z medido a partir do fundo positivo para cima, e x representa a deflexão horizontal em relação à linha vertical que passa pela base do *riser*.

Para a determinação da força na direção *in-line*, ou seja, na direção do carregamento incidente, utiliza-se a equação de Morison modificada (Martins *et al.*, 2003):

$$f_x = A_i \dot{u} + C_D A_D |V_r| (u + U_c - \dot{x}) + C_A A_i (\dot{u} - \ddot{x}) \quad (3)$$

em que, f_x é a força *in-line* por unidade de comprimento; C_D é o coeficiente de arrasto; C_A é o coeficiente de massa adicional; U_c é a velocidade da correnteza; u é a velocidade da partícula de água; $A_i = \rho \pi D^2 / 4$ e $A_D = \rho D_o / 2$. Os coeficientes podem ser obtidos em Sarpkaya (1981).

Devido ao fenômeno de separação da camada limite num determinado ponto do *riser*, ocorre formação de vórtices. Esse fenômeno causa vibração induzida (VIV - *Vortex Induced Vibration*) (Blevins *et al.*, 1977). A força devido ao VIV é uma parcela da força transversal, que é calculada segundo Martins (2003):

$$f_y = \frac{1}{2} \rho ((u - \dot{x}) + U_c)^2 D_o C_L \cos(2\pi \bar{f}_s t + \phi) - C_D A_D |\dot{y}| \dot{y} - C_A A_i \ddot{y} \quad (4)$$

em que, U_c é a velocidade da correnteza; C_L é o coeficiente da amplitude da força transversal; $\bar{f}_s$ é a média da frequência da formação de vórtices; ϕ é a diferença de fase entre a força transversal e o deslocamento transversal do *riser*; S_t é o número de Strouhal; f_y é a força transversal por unidade de comprimento; e $\dot{y}$ e $\ddot{y}$ são a velocidade e aceleração do *riser* na direção transversal, ou seja, direção transversal ao carregamento.

Finalmente, aplicando-se a condição de equilíbrio dinâmico, obtém-se a equação para o comportamento dinâmico para o *riser*:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [B]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (5)$$

onde, $[M]$ é a matriz de massa; $[B]$ é a matriz de amortecimento; $[K]$ é a matriz de rigidez; $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ e $\{u\}$ são respectivamente os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento e $\{F\}$ é o vetor de forças externas.

4. RESULTADOS

A Figura 4 apresenta os cálculos obtidos por solução analítica das coordenadas x e z de um *riser* em catenária sob uma carga estática (Equação 1), assim como os ângulos de inclinação em cada ponto do *riser*. O peso linear w do *riser* considerado é de 2,49 N/m e 5,29N/m, representando *riser* vazio e preenchido de água, respectivamente. Tais condições foram reproduzidas em laboratório, num modelo em escala reduzida, com profundidade e projeção horizontal, referência no TDP de 12,5m e 11,5m, respectivamente, e suspenso no ar. Com isso, foram possíveis de determinar, através de medições, os valores das coordenadas de cada ponto e de suas respectivas inclinações. Conforme se observa na comparação entre o cálculo e a medição em laboratório, na Figura 4, para o caso estático, é admissível desconsiderar a rigidez à flexão do *riser* e considerá-lo inextensível para alguns casos práticos.

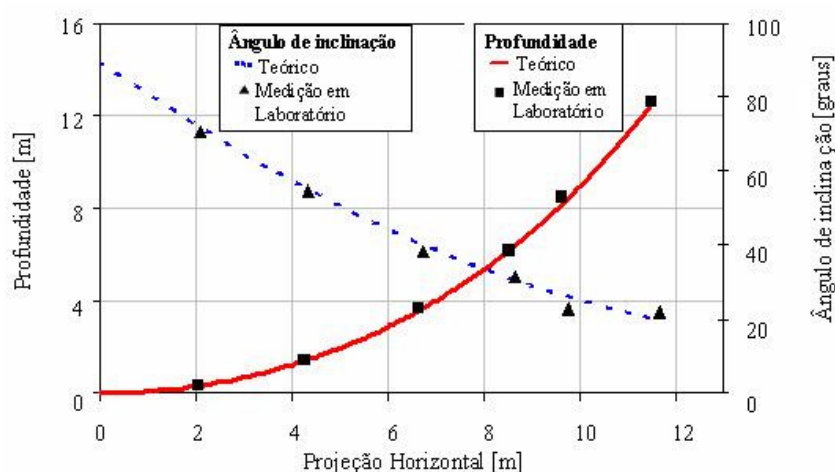


Figura 4 – Comparação entre resultados obtidos analiticamente e em laboratório

Com finalidade de verificar e consolidar os conceitos e fundamentos estudados, diversos cálculos foram realizados para o comportamento dinâmico de *riser* para diferentes condições ambientais. Esses cálculos foram realizados aplicando-se ferramentas computacionais disponíveis (Coelho *et al.*, 2005; Martins *et al.*, 2003). Os resultados foram obtidos para duas configurações de *riser*, em catenária livre (SCR – *Steel Catenary Riser*) e vertical (TTR – *Top Tensioned Riser*), conforme esquemas da Figura 1. Os resultados estão apresentados na forma de envoltórias de deslocamentos máximos e mínimos do *riser*.

As características e propriedades da estrutura do *riser* estudado estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características Principais e Propriedades do *Riser*

	Catenária (SCR)	Vertical (TTR)
Diâmetro externo [m]	0,27305	0,27305
Diâmetro interno [m]	0,23180	0,23180
$C_M - C_D - C_L - St$	2,0-1,2-1,2-0,2	2,0-1,2-1,2-0,2
Diâmetro hidrodinâmico [m]	0,27305	0,27305
Módulo de elasticidade [kN/m^2]	$2,1 \times 10^8$	$2,1 \times 10^8$
Peso específico do material [kN/m^3]	77,0	77,0
Comprimento do <i>riser</i> [m]	2066	900
Peso específico do fluido interno [kN/m^3]	6,00	6,00
Lâmina d'água [m]	900	900

Tração de topo [kN]	---	2200
---------------------	-----	------

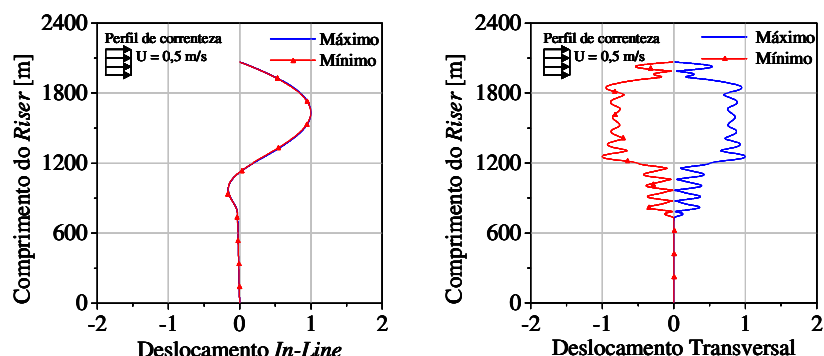


Figura 5 – Deslocamentos máximos e mínimos normalizados para um perfil de correnteza constante ao longo da profundidade para as direções *in-line* e transversal do *riser* (SCR).

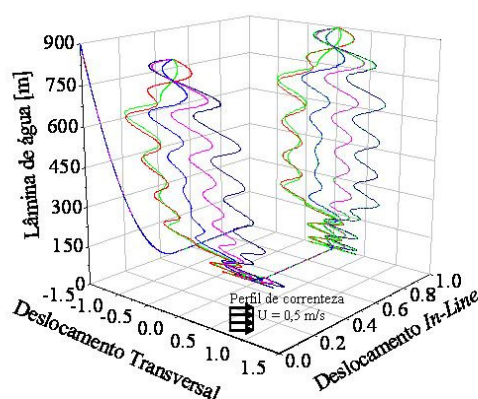


Figura 6 – Deslocamentos *in-line* e transversal normalizados para um “ciclo” de oscilação do *riser* (SCR).

Os resultados de exemplo de cálculo para uma SCR estão apresentados através das Figuras 5 e 6. A Figura 5 ilustra os deslocamentos máximos e mínimos (envoltórias) normalizados pelo valor máximo para as direções *in-line* e transversal obtidos de simulação numérica no domínio do tempo. Considerou-se um perfil de correnteza constante de 0,5 m/s em toda profundidade.

A Figura 6 apresenta a configuração espacial do *riser*, indicando os deslocamentos *in-line* e transversal, também normalizados para um “ciclo” de oscilação transversal devido à VIV. O tempo total apresentado corresponde à aproximadamente 1,0 s, em passos de tempo de 0,25 s. Na direção *in-line* observa-se quase nenhuma amplitude de oscilação, prevalecendo o *riser* deslocado na sua posição da solução da estática, isto é na sua conformação devido ao seu peso próprio, ao empuxo e à ação da correnteza.

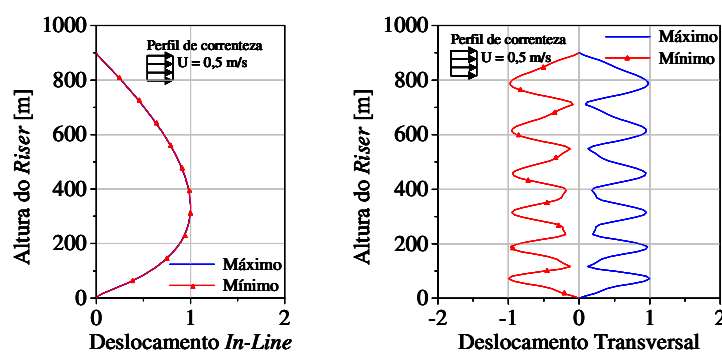


Figura 7 – Deslocamentos máximos e mínimos normalizados para um perfil de correnteza constante ao longo da profundidade nas direções *in-line* e transversal do *riser* (TTR).

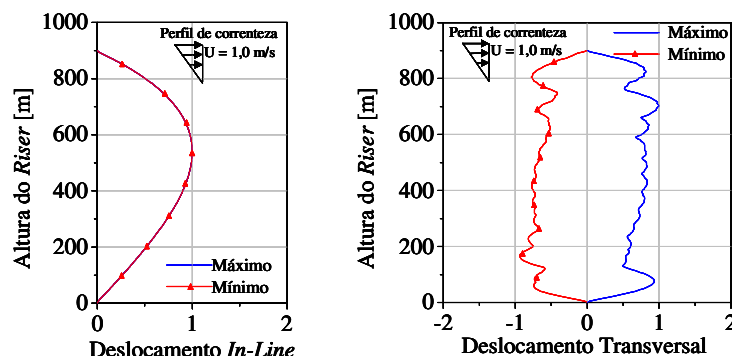


Figura 8 – Deslocamentos máximos e mínimos normalizados para um perfil de correnteza triangular ao longo da profundidade nas direções *in-line* e transversal do *riser* (TTR).

Os resultados do exemplo de cálculo para um TTR estão ilustrados nas Figuras 7 e 8. Apresenta-se nestas figuras os deslocamentos máximos e mínimos (envoltórias) normalizados, das oscilações do *riser* para as direções *in-line* e transversal, apenas sob a ação de correnteza. Os resultados da Figura 7 são obtidos para a ação de correnteza com um perfil constante ao longo da profundidade de 0,5 m/s. Enquanto que os resultados da Figura 8 são obtidos para um perfil triangular de correnteza, com 1.0 m/s no topo e 0.0 m/s no fundo.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho envolve a descrição dos pontos principais do estudo, com a finalidade de apresentar a análise e a discussão dos resultados relacionados a procedimentos de análise da operação e do projeto de *risers* de produção de petróleo em lâminas de água de grande profundidade.

Com base nos fundamentos teóricos relacionados ao comportamento de *risers* sob a ação de correnteza, ondas e movimentos de plataformas flutuantes, foram realizadas aplicações para alguns casos práticos com o uso de códigos computacionais disponíveis para validar e consolidar os conceitos estudados. Medidas de configuração geométrica de *riser* foram obtidas em laboratório para aprimoramento dos resultados. Foram estudados a estática e a dinâmica de *risers* rígidos em TTR e SCR, visando ao correto entendimento do comportamento de *riser* durante sua operação. Isso é muito importante para projetos de operação, particularmente no aspecto da previsão da vida útil do sistema de *riser*.

Conclui-se que ferramentas computacionais de simulação e métodos teóricos são extremamente úteis e viáveis para a avaliação de procedimentos de análise da operação e do projeto de *risers* de produção de petróleo em lâminas de água de grande profundidade. A execução de ensaios e medições em laboratório com modelos e protótipos de *riser* constitui ferramenta complementar ao processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e FINEP (CTPetro) e a PETROBRAS, pelo apoio ao presente estudo. Os agradecimentos são estendidos também aos membros do grupo de pesquisa do Laboratório de Sistemas Marítimos de Produção e *Riser* da UNICAMP, pela dedicação no desenvolvimento conjunto dos diversos componentes computacionais no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. **Produção nacional de petróleo em metros cúbicos**. Disponível em <http://www.anp.gov.br/petro/desenvolvimento_dados.asp>. Acesso em: 12 fevereiro 2007.
- BAI, Y.. *Pipelines and Risers*. Kidlington: Elsevier Science, 2001.
- BLEVINS, R. D.. *Flow-Induced Vibration*. 2ª edição. New York: Van Nostrand & Reinhold Company. 1977.
- CHAKRABARTI, S. K.. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Southampton Boston: Computational Mechanics Publications, 1987.
- COELHO, F. M., VIEIRA, S. C., MOROOKA, C. K., COSTA, C. G., FRANCISS, R.. Simulação Numérica do Comportamento de *Risers* de Produção em Águas Ultra Profundas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3o. Salvador, 2005. **Anais do 3º PDPetro**.

MARTINS, F. M., VIEIRA, S. C., MOROOKA, C. K., COSTA, C. G., FRANCISS, R.. Estudo do Comportamento Dinâmico “*In Line*” e Transversal de “*Riser*” Rígido de Produção In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D E GÁS, 2º, Rio de Janeiro, 2003. **Anais do 2º PDPetro**.
SARPKAYA, T.; ISAACSON, M.. *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*. New York: Van Nostrand & Reinhold Company, 1981.

THE STUDY OF PROCEDURES FOR THE ANALYSIS OF THE OPERATION AND DESIGN OF PETROLEUM PRODUCTION RISERS IN ULTRA-DEEP WATER

Production risers are tubular elements that connect the head of an undersea well to the floating petroleum production facility. They transport oil, water and gas. For the study of a systematic approach to the analysis of the operation and the design of risers, the agreement of the mathematical models that predict the static and dynamic behavior and the evaluation of its service life are important. The objective of these models is to search for the best configuration for the operation and design of the riser. A critical concern is the complexity of operation and the environmental conditions. Numerical procedures and computational simulations have been implemented to determine the behavior of the riser. Hydrodynamic forces such as induced by waves and ocean currents influence the behavior of risers. Moreover, the risers are connected the floating platforms which also exerts further forces on the riser. These platforms also are affected by the waves and current, which produce motion that is then transferred to the risers generating stresses and tensions in the riser's structure. Another very important phenomenon is the oscillatory stresses due to variations in the two-phase internal flow. These excitations also reduce the riser's service life. This work involves the description of the theoretical effort related to the behavior of risers under the action of the environment and movements of the floating platforms. It presents the application of numerical methods to consolidate the studied theories and presents some comparisons with measurements in the laboratory with the aim to improve our understanding of the underlying concepts. Finally, an analysis and discussion of the results of the study, related to the procedures for the analysis of the operation and design of petroleum production risers in ultra-deep water will be present.

Keyword-1, Production Risers 2, Maritime System of Petroleum Production 3, Dynamic Behavior

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.