

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ESTUDO DE MODELO NUMÉRICO PARA A INFLUÊNCIA DO ESCOAMENTO INTERNO NO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM RISER EM CATENÁRIA

AUTORES:

Maurício J. H. Suzuki¹, Sergio N. Bordalo¹, Celso K. Morooka¹, Cyntia G. C. Matt², Ricardo Franciss²

INSTITUIÇÃO:

¹ Departamento de Engenharia de Petróleo, Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas.

² Petrobras/CENPES

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. 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. Os autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

ESTUDO DE MODELO NUMÉRICO PARA A INFLUÊNCIA DO ESCOAMENTO INTERNO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM RISER EM CATENÁRIA

Abstract

Risers are pipes that transfer petroleum fluids and tools to and from the wellhead and floating unit. They are critical components of most offshore petroleum production systems with demanding operational and security requirements. Many different riser systems have been studied and analyzed for use in ultra deep water applications. The Steel Catenary Riser (SCR) is attractive in terms of ultra deep water depth conditions. This system is comprised of a rigid steel pipe installed in a free catenary shape. The riser behavior when subjected to extreme environmental sea conditions is critical to design of such systems. Forces resulting from current, waves and floating platform motions combined can cause dangerous levels of stress in the riser and lead to catastrophic failure from material fatigue. Another dynamic phenomenon, which influence the dynamic behavior of risers is the internal flow of two-phase oil and gas mixtures. The internal flow momentum may impose local displacements along the riser's length and thus add stress to system. It can be observed that in the literature there does not exist a great deal of work related to the internal flow influence on risers. The main objective of this work is determined and study the dynamic behavior of the riser due to the internal flow. This work's aim is develop a mathematical model to represent the effects of two-phase internal flow in risers. Analysis and discussion of the results are presented comparing the numerical procedure and experimental results of a laboratory-scale model test.

Keywords: Oil and Gas Production, Marine Production Systems

Introdução

O aumento global da demanda de derivados de petróleo gera a necessidade de se encontrar novas reservas e desenvolver novas tecnologias para produzi-las. No Brasil, segundo dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2009), a produção de petróleo em mar (óleo e condensado), no ano de 2008, foi de cerca de 105 milhões de metros cúbicos. Isto equivale a aproximadamente 90% da produção nacional. Devido a esse fato, é necessário avançar no estudo e desenvolvimento de novas tecnologias, buscando soluções viáveis, principalmente, para os sistemas marítimos de produção.

Um dos componentes críticos dos sistemas marítimos de produção são os *risers* de produção. *Risers* 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 à uma unidade flutuante de produção na superfície, escoando assim a produção de óleo e gás.

Existem basicamente dois tipos de *risers*, flexível e rígido. *Risers* flexíveis são compostos por diversas camadas metálicas e poliméricas, de forma que o conjunto das camadas proporciona resistência e torna a tubulação estanque, sem comprometer a sua flexibilidade. Já os *risers* rígidos são fabricados de materiais rígidos como, por exemplo, o aço. Diferentes configurações para os sistemas de *riser* têm sido intensamente estudadas, tais como, vertical (TTR - *Top Tensioned Riser*), em catenária (SCR – *Steel Catenary Riser*), híbrido (SSHR – *Self Standing Hybrid Riser*). Comparando com *risers* flexíveis, os *riser* rígidos apresentam melhor comportamento quando submetidos a altas pressões.

Risers de aço na configuração de catenária, conforme ilustrado na Figura 1, mostram-se muito atrativos para aplicações em águas ultra profundas. Esse sistema é composto de *riser* rígido de aço (SCR) instalado na forma de uma catenária livre. A primeira SCR foi instalada em 1994, na Auger TLP (*Tension LLeg Platform*) (Phifer *et al.* 1994). A partir desta data, SCR's têm sido utilizadas nas TLPs no Golfo do México (Auger, Mars e Ursa) (Carter e Ronalds, 1998). No Brasil, SCR's foram propostas e instaladas para as semi-submersíveis Petrobras-18 e Petrobras-36 (Sertã *et al.* 2001). Todas essas aplicações estão instaladas em lâminas de água que variam de 85 metros a 1650 metros.

Para águas ultra profundas, a SCR aparenta ser uma solução tecnicamente e economicamente viável. E por isso, é fundamental o correto entendimento do comportamento do *riser* durante sua operação. Durante a operação e instalação os *risers* estão sujeito a ação de diversos carregamentos estáticos e dinâmicos. Tais carregamentos podem ser devido à ação direta de correnteza, de ondas, de movimentos da unidade flutuante e, também, do escoamento interno do fluido. Esses carregamentos, de diferentes origens, ameaçam a integridade estrutural dos *risers*, principalmente, devido à fadiga, reduzindo assim a vida útil do sistema.

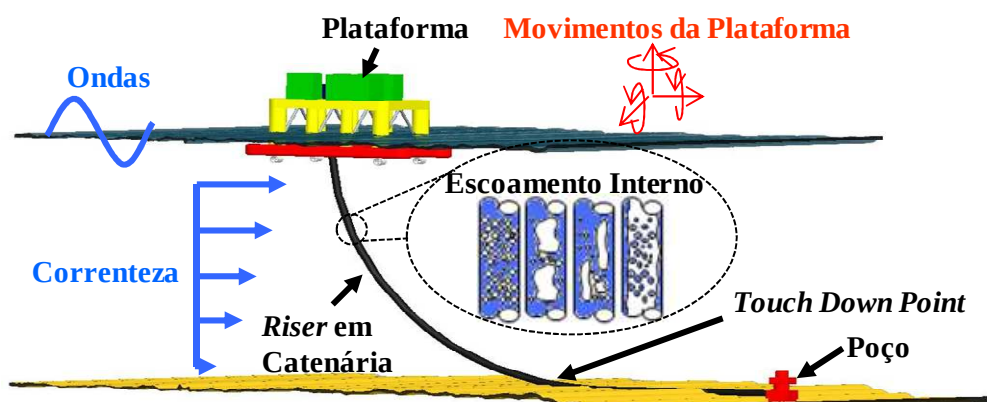


Figura 1. Esquema de um sistema de *riser*

A literatura dispõe de muitos estudos dos fenômenos envolvendo correnteza, ondas e movimentos da unidade flutuante, porém, há poucas referências à influência do escoamento interno de fluidos no *riser*.

Moe e Chucheeprasakul (1988) verificaram a influencia do escoamento interno monofásico para um *riser* vertical com tensão de topo constante. Para velocidade de escoamento alta combinada com tração de topo baixa, a influência do escoamento interno não foi considerada desprezível. Seyed e Patel (1992) apresentam as equações governantes de equilíbrio para um *riser* flexível levando em consideração o escoamento em golfadas. Eles mostram que a variação da quantidade de movimento do escoamento induz força na estrutura devido a curvatura do *riser* em catenária.

Cavalcante (2007) e Valdivia (2007) verificaram a influência do escoamento interno para um *riser* em catenária livre. Demonstraram, a partir de um aparato experimental em seco, que o escoamento bifásico impõe ao *riser* um carregamento cíclico. Esse carregamento pode causar dano na estrutura, reduzindo a vida útil do sistema.

O presente trabalho tem como objetivo principal modelar e simular o comportamento dinâmico do *riser* quando submetido a esforços oriundo do escoamento interno bifásico de fluidos. Para tanto, uma formulação matemática foi desenvolvida para estudar a influência do escoamento na dinâmica do *riser*.

Metodologia

Para a análise de projeto de um *riser* é fundamental o correto entendimento dos fenômenos envolvido. Para a análise desta estrutura, diferentes metodologias são empregadas para determinar o seu comportamento estático e dinâmico de um *riser*. Muitos estudos têm sido realizados para aperfeiçoar os métodos existentes. Dentre tais métodos, os principais são o método não linear no domínio do tempo, o método linearizado no domínio do tempo e o método no domínio da frequência (Wang *et al*, 2005).

O presente trabalho considera o método não linear no domínio do tempo e o *riser* é considerado um elemento de viga 3D não linear. Segundo Mourelle *et al.* (1995), o elemento de viga 3D é o elemento mais adequado quando leva-se em conta os efeitos de flexão e também é uma ferramenta poderosa para a análise de sistemas não lineares que apresentam grandes deformações.

As análises contidas nesse trabalho consistem em uma análise estática e outra dinâmica. Os carregamentos agindo sobre a estrutura podem ser classificados como estático ou dinâmico. Os carregamentos estáticos são o peso morto do sistema, flutuabilidade, correnteza e *offset* da unidade flutuante devido a ação de correnteza, onda e vento agindo sobre a mesma. Apenas os efeitos das ondas serão considerados carregamentos dinâmicos, movimentos de primeira ordem da unidade flutuante e o escoamento interno serão considerados carregamentos dinâmicos.

Para a análise estática, as equações fundamentais de equilíbrio estático serão resolvidas utilizando o método de Newton- Raphson. A matriz de rigidez é atualizada a cada iteração. E a análise dinâmica consiste numa análise não linear no domínio do tempo, em que a Equação 1 governa o movimento do sistema.

$$[M]\{\ddot{d}\} + [B]\{\dot{d}\} + [K]\{d\} = \{f\} \quad (1)$$

em que $[M]$ é a matriz de massa, $[B]$ é a matriz de amortecimento estrutural, $[K]$ é a matriz de rigidez global, $\{\ddot{d}\}$, $\{\dot{d}\}$ e $\{d\}$ são respectivamente os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento e $\{f\}$ o vetor de força.

No caso particular desse trabalho, o vetor de força será construído pelas forças oriundas do escoamento interno. O modelo apresentado aqui foi implementado em um simulador numérico (Mourelle, 1995) e considera apenas a variação do peso ao longo do comprimento axial do *riser*, conforme mostra a Figura 2a. A parcela da quantidade de movimento não será considerada ainda neste trabalho. A distribuição de fluido, ou seja, a distribuição de peso do fluido variando espacial e temporalmente será aproximada por uma função cosseno apresentada na Equação 2.

$$|P| = \rho_f \cdot g \cdot A_i \cdot \left[\frac{1 + \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{l} \cdot (s - v \cdot t)\right)}{2} \right] \quad (2)$$

em que $|P|$ é o módulo do peso do fluido, ρ_f é a densidade do líquido interno, A_i é a área da seção reta interna de escoamento do *riser*, s é o comprimento axial do *riser*, l é o comprimento da célula da golfada, v é a velocidade da golfada.

Para verificar o modelo proposto, os resultados obtidos a partir da simulação numérica foram comparados com os resultados experimentais presentes em Valdivia (2008). Os principais parâmetros

do sistema analisado, Figura 2b, estão presentes na Tabela 1. As coordenadas dos pontos analisados estão presentes na Tabela 2.

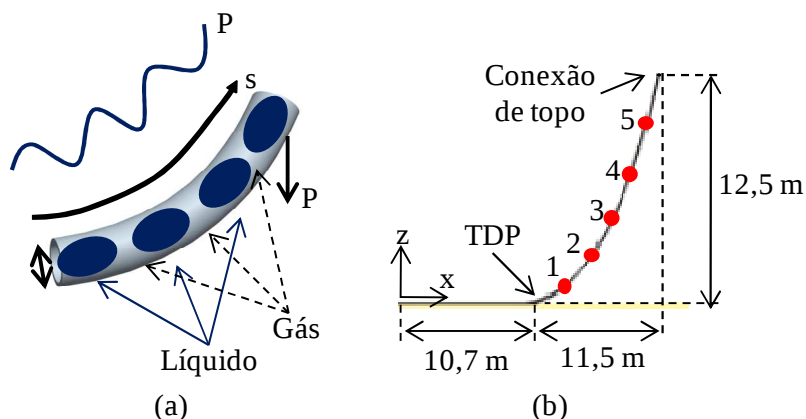


Figura 2 – Esquema (a) do modelo proposto e (b) do sistema analisado

Tabela 1 – Principais parâmetros do sistema utilizado

Parâmetro	Valor
Profundidade (H)	12,5 m
Diâmetro Externo (D_{ext})	0,025 m
Diâmetro Interno (D_{int})	0,019 m
Peso Específico do Fluido Interno (γ_{int})	9,81 kN·m ⁻³
Velocidade da Golfada (v)	1,0 m·s ⁻¹
Comprimento da Golfada (l)	0,85 m

Tabelas 2 – Coordenadas dos pontos analisados

Ponto-alvo	Coordenada horizontal	Coordenada vertical
	eixo x [m]	eixo z [m]
1	12,0	0,2
2	14,4	1,1
3	16,6	2,9
4	18,6	5,3
5	20,7	8,9

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos a partir da simulação numérica do modelo proposto foram comparados com os resultados obtidos a partir de um dos experimentos (Valdivia, 2008) utilizando água e ar. São apresentados os resultados de deslocamento nas direções x e z para cada ponto-alvo.

Os gráficos de deslocamento dos pontos alvos (δ) contra o tempo são apresentados na Figura 3. No eixo das ordenadas são mostrados os valores de amplitude das oscilações normalizados pelo diâmetro externo (δ/D_{ext}). O eixo das abscissas apresenta o intervalo de tempo, em segundos.

A análise dos resultados será limitada aos pontos 2, 3 e 4 devido à restrição de espaço neste artigo. Observa-se que as amplitudes dos deslocamentos experimentais e numéricos são próximas. Esse resultado é bom, considerando que o modelo leva em conta somente o efeito da distribuição de fluido no interior do riser. As máximas amplitudes de deslocamentos verificadas no experimento são da ordem de dois a três diâmetros para a direção x e 2 a 5 diâmetros para a direção z. Para a simulação, obtém-se uma resposta mais bem comportada, em que as máximas amplitudes têm magnitudes próximas, mas não exatamente iguais ao experimento.

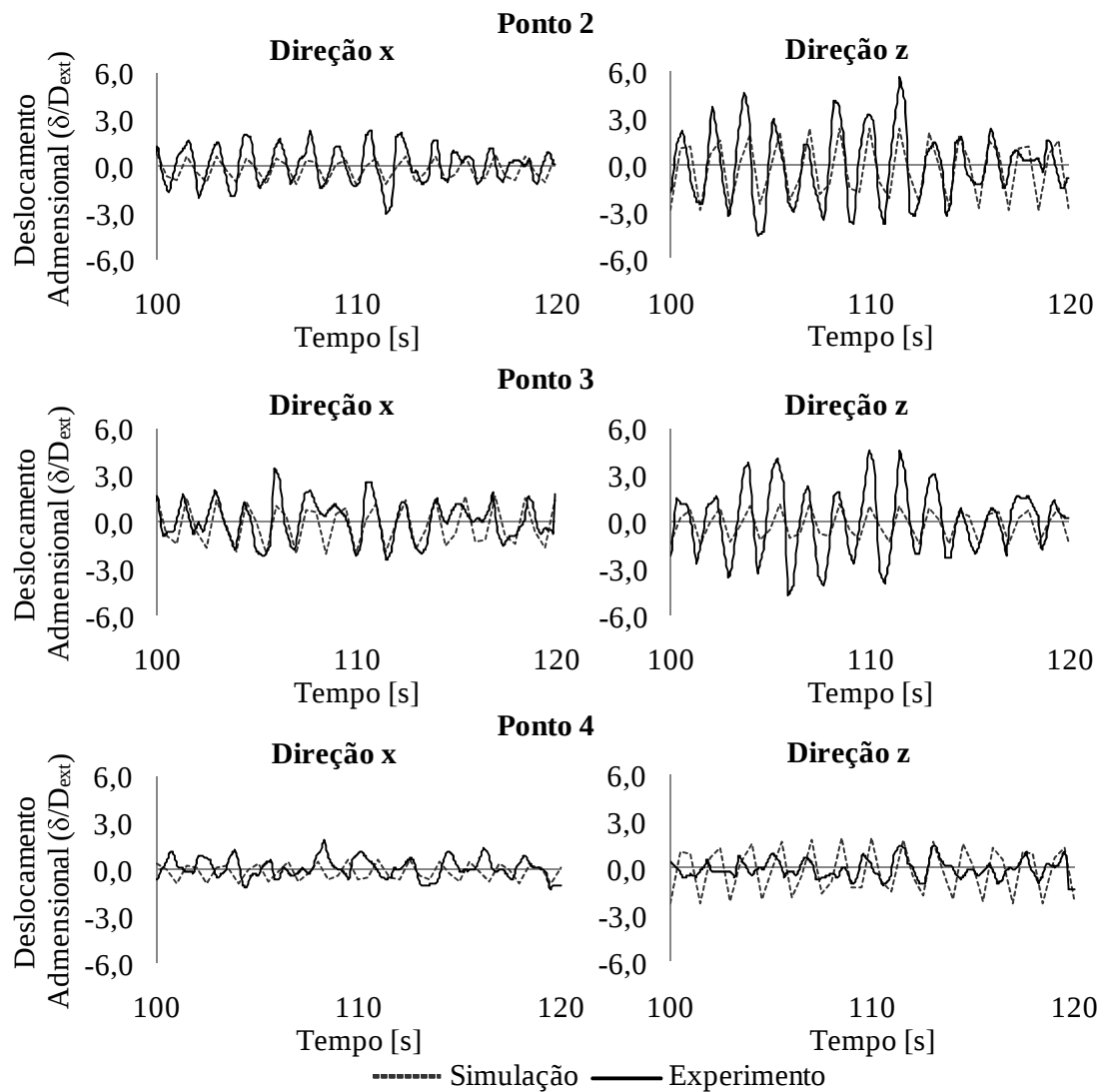


Figura 3 – Gráficos dos deslocamentos do modelo de riser.

As frequências naturais do *riser* foram determinadas a partir de um simulador numérico e os valores obtidos estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Frequências naturais obtidas numericamente para o modelo preenchido com água

Modo	Frequência [Hz]
1	0,36
2	0,51
3	0,75
4	0,88
5	1,23
6	1,72

A Figura 4 apresenta os gráficos de FFT (Transformada de Fourier) dos pontos 2, 3 e 4 em ambas as direções. Os espectros de frequência foram obtidos a partir das séries temporais de deslocamento dos pontos.

Pode-se notar a existência de mais de uma frequência para os resultados experimentais; os valores que concentram as maiores respostas são em torno de 0,48 e 0,64 Hz para deslocamento na

direção horizontal. Na direção vertical o mesmo comportamento é observado. Para os resultados numéricos o valor que concentra a maior resposta é em torno de 0,64 Hz.

Ao observar a Tabela 3 conclui-se que o modelo numérico excita próximo às frequências naturais para esse caso de vazões de líquido e gás. Visto que o modelo de escoamento implementado considera apenas a distribuição de peso do fluido interno, percebe-se que esse caso foi bem representado pelo modelo proposto, no que diz respeito às amplitudes dos deslocamentos e frequências obtidas pela simulação, comparando com os resultados experimentais.

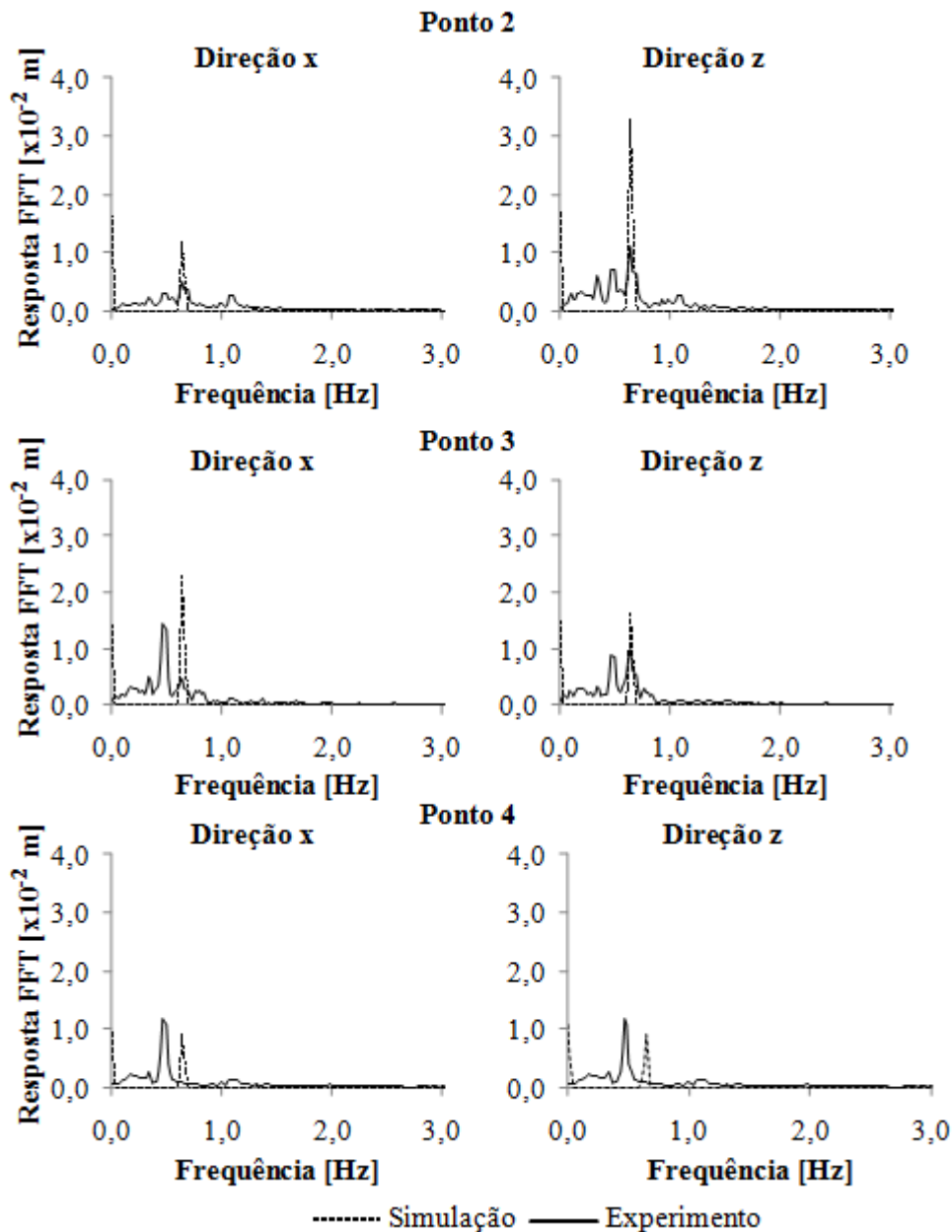


Figura 4 – Gráficos da FFT dos deslocamentos do modelo de riser.

Conclusões

O presente trabalho apresentou um estudo inicial do comportamento dinâmico para caracterização do fenômeno de oscilação imposta pelo escoamento interno a um riser de produção em forma de catenária. Um modelo matemático deste fenômeno foi implementado em rotinas computacionais existentes de simulação numérica do comportamento do dinâmico do *riser*.

O efeito do escoamento interno foi estudado de forma isolada dos outros carregamentos usuais solicitantes de um riser em operação, isto é, não foram considerados efeitos de correnteza do mar, ondas ou ainda movimentos induzidos pela plataforma flutuante, usualmente presentes, nem o efeito de amortecimento viscoso do meio aquático que envolve o *riser* real.

Os resultados obtidos foram então comparados com dados experimentais em seco. Observou-se que o modelo representou bem o comportamento dinâmico do *riser*. No entanto, aperfeiçoamentos do modelo matemático são necessários, tendo em vista que tal modelo apenas considera a distribuição de peso ao longo do *riser* e não calculou com exatidão desejada os deslocamentos do *riser*. Novos experimento também são fundamentais para validar o modelo matemático e para melhor compreensão do fenômeno,

Agradecimentos

Os autores agradecem a Petrobras, a Finep (CTPetro) e o PRH15/ANP pelo suporte ao presente trabalho.

Referências Bibliográficas

- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Produção Nacional de Petróleo e LGN (metros cúbicos). Disponível em <http://www.anp.gov.br/doc/dados_estatisticos/Producao_de_Petroleo_m3.xls>. Acesso em: 26 de maio de 2009.
- Cavalcante, C. C. P., Bordalo, S. N., Morooka, C. K., Matt, C. G. C., Franciss, R.. Influência do Escoamento Interno no Movimento de Oscilação de um Riser Rígido em Catenária. In: Congresso Brasileiro de P&D e Gás, 4º, Campinas, SP, Brasil. 2007. *Proceeding...* 4º PDPetro.
- Carter, E. M.; Ronalds, B. F.. Deepwater Riser Technology. In: SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Perth, Australia, 1998. *Proceedings...* SPE50140.
- Moe, G.; Chucheepsakul, S. The Effect of Internal Flow on Marine Risers. In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), 7, 1988, Houston, Texas. *Proceedings...* p. 375-382.
- Mourelle, M. M., Gonzalez, E. C., Jacob, B. P.. Anflex – Computational System for Flexible and Rigid Riser Analysis. In: International Symposium on Offshore Engineering, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1995. *Proceedings...*
- Phifer, E. H.; Kopp, F.; Swanson, R. C.; Allen, D. W.; Langner, C. G.. Design and Installation of Auger Steel Catenary Risers. In: of 1994 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 1994. *Proceedings...* OTC 7620.
- Sertã, O. B.; Longo, C. E. V.; Roveri, F. E.. Riser System for Deep and Ultra-Deepwaters. In: 2001 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2001. *Proceedings...* OTC 13185.
- Sayed, F. B., Patel, M. H., Mathematics of Flexible Risers Including Pressure and Internal Flow Effects. *Marine Structures*, v. 5, n. 29, p. 121-150, 1992.
- Valdivia, P. G., Morooka, C. K., Bordalo, S. N., Matt, C. G. C., Franciss, R.. Resposta Dinâmica de um Riser Rígido em Catenária devido à Excitação Induzida pelo Escoamento Interno. In: Congresso Brasileiro de P&D e Gás, 4º, Campinas, SP, Brasil. 2007. *Proceeding...* 4º PDPetro.
- Valdivia, P. G.. Estudo Experimental e Numérico da Dinâmica de Movimento de Riser em Catenária com Escoamento Interno. Pós graduação Interunidades do Programa Ciência de Engenharia de Petróleo. Universidade Estadual de Campinas. Dissertação de Mestrado, 98p..
- Wang, L., Hansen, V., Katla, E.. Independent Verification of Deepwater SCR Design. In: 2005 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2005. *Proceeding...* OTC17244