

Estudos da Solução do Comportamento Dinâmico de um *Riser* Rígido Vertical no Domínio do Tempo e da Frequência

D.A. Shiguemoto¹, C.K. Morooka²
P.S.D. Pereira³, C.G.C. Matt⁴, R. Franciss⁵

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

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

³PETROBRAS/CENPES, 21941-598, Rio de Janeiro, RJ, paulod@petrobras.com.br

⁴PETROBRAS/CENPES, 21941-598, Rio de Janeiro, RJ, cyntiagc@petrobras.com.br

⁵PETROBRAS/CENPES, 21941-598, Rio de Janeiro, RJ, franciss@petrobras.com.br

A simulação numérica no domínio do tempo é geralmente necessária para analisar as não-linearidades da dinâmica dos *risers* devido aos carregamentos ambientais e ao comportamento estrutural do *riser*. Contudo, este tipo de simulação demanda um elevado custo computacional, uma vez que necessita de procedimentos iterativos para solucionar as equações do comportamento dinâmico do sistema. Assim, a solução no domínio da frequência é apresentada como uma alternativa para a análise do comportamento dinâmico do *riser*. Os carregamentos não-lineares do termo quadrático da Equação de Morison são linearizados, tornando a solução geralmente mais rápida que a análise no domínio do tempo. No presente estudo, serão descritas as principais equações do comportamento dinâmico de um *riser* rígido vertical com tração de topo e a teoria envolvida na solução no domínio da frequência e do tempo. Serão realizadas simulações da estrutura sujeita à ação de onda regular considerando variações no comprimento do *riser*, na lâmina d'água e a tração de topo mantendo relação direta com o peso da estrutura. Comparações dos resultados, no domínio da frequência e do tempo, em termos de máximas amplitudes de deslocamento adimensionalizadas pelo diâmetro externo do *riser* serão apresentadas e discutidas para um *riser* rígido vertical com tração de topo em águas ultra-profundas. Assim, objetiva-se entender e verificar as diferenças entre as soluções no domínio do tempo e da frequência. Também, resultados para um sistema em configuração Torre (*riser* rígido vertical suportado por uma bóia de sub-superfície) para condição de onda e diferentes velocidades de correnteza serão apresentados para ilustrar as diferentes configurações que podem ser analisadas por abordagem numérica.

Exploração de Petróleo, Sistemas Marítimos de Produção, Risers

1. INTRODUÇÃO

Risers rígidos podem ser considerados elementos tubulares esbeltos confeccionados com aço, podendo em alguns casos específicos ser de titânio, que possuem a função de transportar (elevar) o petróleo produzido até as unidades flutuantes de produção. São classificados como rígidos pois possuem maior resistência à deflexão que os *risers* ditos flexíveis, que são confeccionados com camadas intercaladas de aço e de polímeros. Quando comparados aos *risers* flexíveis, os *risers* rígidos possuem um menor custo e são capazes de resistir a altas pressões, o que os tornam interessantes para utilização em águas profundas e ultra-profundas. Porém, são mais suscetíveis à falha por fadiga quando submetidos a carregamentos cíclicos devido à onda e aos movimentos da unidade flutuante.

Com o desenvolvimento tecnológico, muitos tipos de configurações de *risers* foram desenvolvidas objetivando viabilizar a produção de petróleo em campos *offshore*. Dentre os vários tipos de configuração, podemos destacar as que utilizam *risers* rígidos, como por exemplo: *Riser* Rígido com Tração de Topo (TTR, do inglês *Top Tensioned Riser*), SCR (*Steel Catenary Riser*) e configurações híbridas constituídas de partes de *riser* rígido e partes de flexível.

A principal vantagem da utilização de um sistema de *riser* rígido vertical com tração de topo é a possibilidade de utilizar completação seca, reduzindo os custos envolvidos. Morooka *et al.* (2005) analisam o comportamento dinâmico deste tipo de estrutura e sua vida útil devido à fadiga.

Vieira *et al.* (2002), Pereira *et al.* (2005) e Roveri e Pessoa (2005) discutem os benefícios da utilização de um sistema de configuração híbrida. Basicamente, estes sistemas são compostos por *risers* flexíveis na parte superior do sistema e de *risers* rígidos na inferior. Estes *risers* rígidos podem adquirir a configuração vertical ou catenária. Uma das maiores vantagens deste tipo de configuração é que os efeitos devido aos movimentos dinâmicos da unidade flutuante no *riser* rígido são minimizados, buscando assim minimizar a falha por fadiga. Em particular, o *Riser* Híbrido Auto-Sustentável (RHAS), constituído de um *riser* rígido vertical suportado por

uma bóia de sub-superfície e conectado à unidade flutuante através de um *riser* flexível (*jumper*) é uma configuração em estudo para aplicação em águas ultra-profundas (Pereira *et al.*, 2006a; Pereira *et al.*, 2006b).

No presente trabalho, serão apresentadas comparações entre as análises determinísticas no domínio do tempo e da frequência, de um TTR instalado em diferentes lâminas d'água com os contornos restritos para deslocamentos e livres para rotações e sujeitos a ação de onda regular. Os resultados serão apresentados em termos de máximas amplitudes de deslocamentos adimensionalizados pelo diâmetro externo do *riser*. Também, serão apresentados resultados para uma parte do sistema RHAS, denominada de torre (*riser* rígido vertical suportado por uma bóia de sub-superfície) sob a ação de ondas do mar e diferentes velocidades de correnteza objetivando ilustrar outro tipo de configuração que pode ser analisada por esta abordagem numérica. Assim sendo, o presente estudo apresenta inicialmente o resultado do estudo dos fundamentos envolvidos nas soluções no domínio do tempo e da frequência, e apresenta-se resultados de comparações entre as duas soluções para *riser* vertical na configuração TTR, com finalidade de compreender as diferenças em cada uma das abordagens.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A definição das principais características do TTR é uma das mais importantes decisões no processo de desenvolvimento de um projeto de sistema de produção petrolífera usando este tipo de configuração de *riser*. O estudo do comportamento dinâmico do TTR é muito importante para este propósito, e usualmente, pode ser realizado através de simulação numérica ou experimentos. Experimentos em laboratórios realizados com modelos truncados ou em escala reduzida não é uma tarefa fácil e envolvem elevados custos. Normalmente, esta abordagem é utilizada em um estágio final de projeto e como complemento da simulação numérica. Através da simulação numérica é possível realizar modificações nos parâmetros geométricos e propriedades do *riser* de uma forma mais rápida e prática. Uma abordagem bastante utilizada para a solução numérica é a utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF). Nesta abordagem, a estrutura pode ser dividida em pequenos elementos de viga onde as propriedades de cada elemento podem ser concentradas nos seus extremos. Isto permite a consideração de diferentes geometrias e propriedades ao longo do comprimento do *riser*.

A análise numérica pode ser dividida em dois tipos: determinística (solução no domínio da frequência ou do tempo) e não-determinística (estocástica). A análise não-determinística é baseada em análise estatística para obtenção de parâmetros que serão utilizados na determinação do comportamento dinâmico do *riser*. A análise determinística no domínio do tempo ou da frequência determina a resposta do sistema devido a um dado carregamento ambiental.

A solução no domínio do tempo é recomendada quando as não-linearidades do sistema são relevantes na obtenção da resposta. A importância das não-linearidades estrutural e hidrodinâmica no comportamento dinâmico de um TTR foram discutidas por Bae e Bernitsas (1995) através de desenvolvimentos de modelos matemáticos e algoritmos de solução.

Por outro lado, a análise no domínio da frequência é utilizada quando as não-linearidades do sistema podem ser simplificadas por linearizações. Basu (1995) considera as não-linearidades contidas na força de arrasto e utiliza um procedimento de solução iterativa baseado no MEF.

Outro parâmetro importante para o desenvolvimento de um projeto de sistema de produção petrolífera é a correta determinação dos esforços devido ao carregamento hidrodinâmico. Frequentemente, dois métodos têm sido utilizados para descrever os carregamentos hidrodinâmicos de um sistema de *risers*: CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*), que resolve diretamente as equações de Navier-Stokes (Yamamoto *et al.*, 2001), e modelos semi-empíricos (Ferrari e Bearman, 1999; Park *et al.*, 1999) baseados em experimentos realizados com *risers* e cilindros. Estes esforços calculados são adicionados à equação do comportamento do *riser*. A maioria dos métodos de predição do comportamento do *riser* é baseada em modelos estruturais obtidos através do MEF.

Martins *et al.* (2003) e Coelho *et al.* (2005a) realizam simulações numéricas, no domínio do tempo, de um *riser* rígido de produção sob ação de ondas e correntezas. Na simulação, é considerado o efeito das vibrações induzidas por vórtices (VIV), e os resultados são avaliados nas direções *in-line* (direção do carregamento) e transversal.

Morooka *et al.* (2006) e Coelho *et al.* (2005b) comparam a solução do comportamento dinâmico do *riser* rígido vertical, no domínio do tempo e da frequência, para variações da tração de topo, do período de oscilação forçada e da altura e período de onda incidente. Nestes trabalhos, o efeito do VIV não é considerado. É verificada também a influência da densidade do material no comportamento dinâmico da estrutura através da análise na frequência.

Discussões sobre o efeito viscoso nas forças e respostas dos *risers* em cada abordagem é muito importante. Chaplin e Ikeda (1999) apresentam uma revisão através de exemplos de uma grande variedade de problemas sobre este tipo de efeito em estruturas *offshore*.

Desde a década de 80, diversos autores discutem e propõem diversas configurações de *riser* híbrido. Dentre elas podemos destacar a configuração RHAS e a configuração que utiliza uma SCR conectada a uma bóia de sub-superfície e um *riser* flexível conectando a bóia à unidade flutuante de produção (Vieira *et al.*, 2002). Pereira *et al.* (2006a) realizam estudos para verificar a influência do comportamento dinâmico da bóia de sub-superfície na redução da vida útil da estrutura.

3. DESCRIÇÃO DO MODELO

3.1 Comportamento Mecânico do *Riser*

Um *riser* rígido vertical pode ser analisado como um elemento de viga sob efeito de tração, carregamentos laterais e pressões hidrostáticas devido aos fluidos interno e externo. Se a carga total devido ao peso do *riser* e às pressões externa e interna forem consideradas atuantes no centro de um elemento infinitesimal do *riser*, e considerando como pequenas as deflexões angulares do elemento, conforme ilustrado na Figura 1, a equação do comportamento do *riser*, para um caso bidimensional, pode ser obtida através de um balanço de forças e momentos, conforme apresentado na Equação 1.

$$\frac{d^2}{dz^2} \left(EI \frac{d^2 x}{dz^2} \right) - (T + A_0 P_0 - A_1 P_1) \frac{d^2 x}{dz^2} - [\gamma_S (A_0 - A_1) - f_{zS} - A_0 \gamma_0 + A_1 \gamma_1] \frac{dx}{dz} + m \ddot{x} = f_{xS} \quad (1)$$

onde, z é a coordenada axial da viga, x é o movimento do *riser*, $\ddot{x}$ é a aceleração do *riser*, EI representa o módulo de elasticidade, T é a tração no elemento, P_1 (P_0) é a pressão interna (externa), A_1 (A_0) é a área interna (externa) da seção transversal do *riser*, γ_S , γ_0 e γ_1 são, respectivamente, o peso específico do *riser*, do fluido externo (água do mar) e do fluido interno.

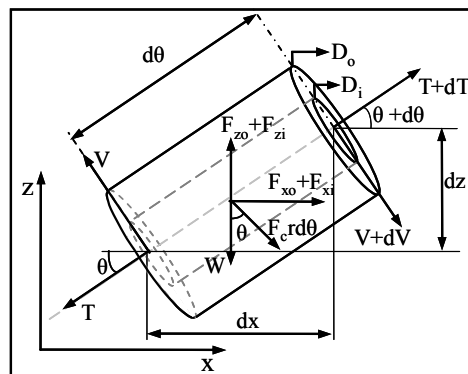


Figura 1. Elemento infinitesimal do *riser*

A Equação 1 pode ser utilizada para descrever o comportamento estático e dinâmico. Contudo, para o comportamento estático, o termo da aceleração no lado esquerdo da equação deve ser desprezado e o lado direito será composto apenas pela força constante devido à correnteza.

3.2 Carregamentos Hidrodinâmicos

No presente estudo o *riser* é considerado um elemento esbelto sem os efeitos de difração. Assim, as forças hidrodinâmicas devido à onda em um segmento infinitesimal ds do *riser* podem ser calculadas através da Equação de Morison descrita na Equação 2 (Chakrabarti, 1987). O primeiro termo do lado direito da Equação representa a força devido à inércia e o segundo representa a força devido ao arrasto causado pela dinâmica da partícula de água.

$$df = C_M \rho \frac{\pi}{4} D^2 \dot{u} ds + \frac{1}{2} C_D \rho D |u| u ds \quad (2)$$

onde, C_M e C_D são respectivamente os coeficientes de inércia e arrasto, ρ é a densidade do fluido externo, D é o diâmetro externo do *riser* e u e $\dot{u}$ são, respectivamente, a velocidade e aceleração da partícula de água.

A velocidade e a aceleração da partícula fluida, descritas nas Equações 3 e 4, podem ser calculadas utilizando a Teoria Linear de Onda (Airy). Esta abordagem é adequada quando a altura de onda é pequena quando comparada com o seu comprimento e será adotada no presente estudo para a análise em ambos os domínios.

$$u = \frac{gkH}{2\omega} \frac{\cosh ks}{\cosh kd} \cos \phi \quad (3)$$

$$\dot{u} = \frac{gkH}{2} \frac{\cosh ks}{\cosh kd} \sin \phi \quad (4)$$

onde H é a altura de onda, ω é a frequência da onda dada pela relação de dispersão $\omega^2 = gk \tanh(kd)$, g é a aceleração da gravidade, k é o número de onda, s é a distância entre a superfície do mar e o ponto onde a velocidade e a aceleração são calculadas, d é a lâmina d'água e ϕ é o ângulo de fase dado por $(z - \omega t)$.

Integrando a Equação 2 através de todo o comprimento do *riser* e somando todos os termos, a Equação de Morison modificada considerando a velocidade relativa entre o fluido e a estrutura (Sarpkaya e Isaacson, 1981), para o caso bidimensional, é dada pela Equação 5:

$$f_{wave} = A_I \dot{u} + C_A A_I (\dot{u} - \dot{x}) + C_D A_D |u - \dot{x}| (u - \dot{x}) \quad (5)$$

onde, $A_I = \frac{\rho \pi D}{4}$, $A_D = \frac{\rho D}{2}$ e $C_A = C_M - 1$ é o coeficiente de massa adicional.

3.3 Análise no Domínio da Frequência

Na análise no domínio da frequência, o *riser* é discretizado em elementos de viga e o termo devido ao amortecimento viscoso é linearizado (Morooka e Yokoo, 1992). A análise no domínio da frequência é recomendada para o estágio inicial de um desenvolvimento de projeto de sistemas de *risers*, uma vez que é sabido que este procedimento demanda menos tempo computacional quando comparado com o domínio do tempo.

O processo de cálculo se inicia dividindo a estrutura em vários elementos e determinando as velocidades e acelerações para cada um destes elementos. As forças hidrodinâmicas são então estimadas e as matrizes de massa, rigidez e amortecimento de cada elemento são calculadas. Finalmente, resolve-se a equação do comportamento dinâmico do *riser* através do MEF e as respostas são obtidas em termos de amplitude de movimento do *riser* para a frequência de incidência da onda no sistema.

A equação do comportamento dinâmico pode ser escrita no domínio da frequência através da Equação 6.

$$\left[-\omega^2 ([m] + [M]) - i\omega \left([B] + \frac{8}{3\pi} \omega \{X\} [B^*] \delta \right) + ([R] + [K]) \right] \{X\} e^{i\beta} = \{f\} e^{i\alpha} \quad (6)$$

onde ω é a frequência de incidência da onda, $[M]$ e $[m]$ são, respectivamente, as matrizes de massa e massa adicional, $[B]$ é a matriz de amortecimento estrutural global, $[B^*]$ é a matriz de amortecimento viscoso, δ é o Delta de Kronecker, $[R]$ é a matriz de rigidez hidrostática, $[K]$ é a matriz de rigidez, $\{X\}$ é o vetor de movimento do *riser*, $\{f\}$ é o vetor de forças externas totais, β é a fase do movimento do *riser* e α é a fase da força de excitação. O vetor de forças externas é calculado considerando todas as forças que agem no sistema.

Como os elementos são definidos de forma sequencial, as matrizes globais do sistema são obtidas somando o quarto quadrante da matriz de um elemento com o segundo quadrante da matriz do elemento seguinte.

A partir da Equação 6 também é possível calcular as frequências naturais e os modos de vibração do sistema (autovalores e autovetores). Porém, neste caso, os termos de amortecimento e forças externas devem ser considerados nulos.

3.4 Análise no Domínio do Tempo

A solução no domínio do tempo produz resultados mais próximos do real, porém, conforme relatado anteriormente, necessita de maior tempo computacional que a análise no domínio da frequência. Nesta abordagem também será utilizado o MEF.

A Teoria Linear de Onda e a Equação de Morison também são utilizadas para estimar a cinemática da onda e as forças hidrodinâmicas, respectivamente. Contudo, nesta abordagem, as não-linearidades devido à parte viscosa são consideradas.

Assim, substituindo a Equação 5 na Equação 1 e reescrevendo na forma matricial teremos a Equação 7, que representa o comportamento dinâmico do *riser* no domínio do tempo. Neste modelo é adotado o modelo concentrado (*lumped*) para as matrizes de massa e rigidez.

$$[M]_x \ddot{x} + [B]_x \dot{x} + [K]_x x = C_M A_I \frac{\partial u}{\partial t} + C_D A_D |V_r| (u - \dot{x}) - C_A A_I \ddot{x} \quad (7)$$

onde $|V_r| = \sqrt{(u - \dot{x})^2}$ representa a velocidade relativa entre o fluido e a estrutura, desconsiderando o movimento transversal do *riser*.

Morooka *et al.* (2005) apresentam de forma detalhada os fundamentos teóricos envolvidos na simulação do domínio do tempo.

4. RESULTADOS

Foi simulado um sistema típico de *riser* rígido vertical com tração de topo com os extremos restritos para deslocamentos e livres para rotações. Casos com variações no comprimento do *riser* e da lâmina d'água foram realizados tanto no domínio do tempo quanto no da frequência. A tração de topo utilizada foi de 1,2 vezes o peso do *riser*. Foi considerado uma onda regular de altura (H) 4 metros e período (T) de 12 segundos. Os resultados foram analisados em termos de máxima amplitude de deslocamento na direção *in-line* adimensionalizado pelo diâmetro externo do *riser*. Os principais parâmetros do sistema são mostrados nas Tabelas 1 e 2. Na modelagem numérica, foram utilizados 102 elementos para representar a estrutura. Para a solução no domínio do tempo foi utilizado um tempo total de 150 segundos com passo de 0,05 s.

Também foi realizada uma simulação numérica no domínio do tempo de um sistema de *riser* rígido vertical suportado por uma bóia de sub-superfície (Torre) sob ação de onda regular de 14,6 m de altura e 12,2 s de período e diferentes velocidades de correnteza. A correnteza adotada possui perfil constante e atua entre 50 m e 200 m de profundidade. Esta simulação tem por objetivo ilustrar a utilização numérica para a solução de outros tipos de configurações. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 1. Parâmetros comuns a todos os casos de TTR simulados numericamente.

Diâmetro Externo / Interno [m]	0,25 / 0,21106
Densidade do <i>Riser</i> [kg/m ³]	7860,0
Densidade da Água do Mar [kg/m ³]	1025,0
Densidade do Fluido Interno [kg/m ³]	800,0
Módulo de Elasticidade [GPa]	210,0
Coefficiente de Arrasto (C _D) / Massa Adicional (C _A)	1,0 / 0,6

Tabela 2. Parâmetros de TTR que foram variados nos casos analisados.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Lâmina D'água [m]	900,0	1500,0	1800,0	2800,0
Comprimento do <i>Riser</i> (L) [m]	920,0	1520,0	1820,0	2820,0
Tração de Topo (T _{TOP}) [kN]	1200,0	2000,0	2400,0	3700,0

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos para os casos simulados no domínio da frequência e do tempo. É possível notar que ambas as soluções possuem boa concordância. A pequena diferença observada em alguns casos pode ser entendida como eventuais diferenças na linearização do termo devido ao amortecimento viscoso na solução no domínio da frequência. Para casos onde existe alta velocidade relativa entre o fluido e a estrutura esta linearização proporciona um desvio maior, uma vez que o termo viscoso é dependente da velocidade relativa. Assim, quanto maior a frequência de excitação da estrutura, maior será a velocidade relativa entre o fluido e a estrutura e, consequentemente, maior será a diferença entre as duas abordagens.

Tabela 3. Parâmetros utilizados para simulação numérica da Torre.

Tabela 3: Parâmetros adotados para simulação numérica da TCRB.		
Lâmina D'água [m]	2800	
Densidade da Água do Mar [kg/m ³]	1025	
Densidade do Fluido Interno [kg/m ³]	925,0	
Coeficiente de Arrasto (C _D) / Massa Adicional (C _A)	1,2 / 1,0	
Bóia de Sub-superfície	Comprimento [m]	37,0
	Diâmetro Externo / Interno [m]	6,4 / 0,4572
	Peso por unidade de metro [kN/m]	80,41
	Empuxo por unidade de metro [kN/m]	321,62
Riser Rígido Vertical	Comprimento [m]	2700
	Diâmetro Externo / Interno [m]	0,4572 / 0,4064
	Módulo de Elasticidade [GPa]	204,0
	Peso Específico do Material [kN/m ³]	76,9698

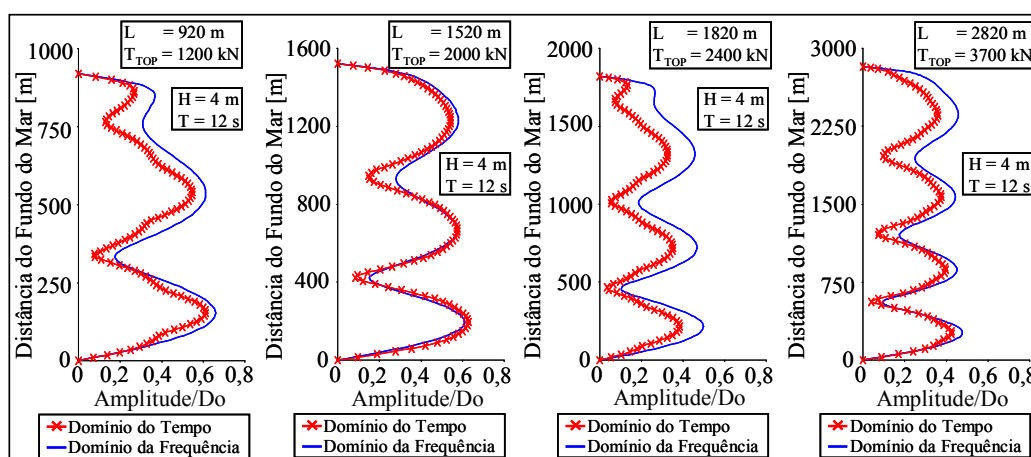


Figura 2. Resultado de máximas amplitudes de deslocamentos obtidos pelo cálculo no domínio da frequência e do tempo, adimensionalizadas pelo diâmetro externo do riser para um TTR em diferentes lâminas d'água

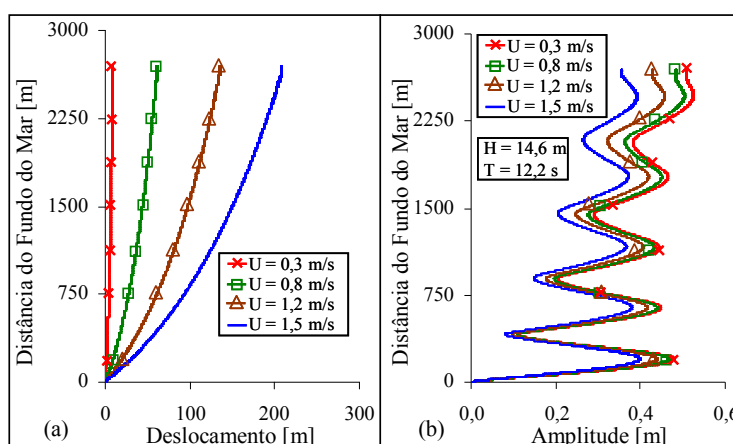


Figura 3. Deslocamentos e amplitudes da Torre sujeita a diferentes carregamentos. (a) Deslocamento devido à ação de correnteza com diferentes velocidades. (b) Máxima amplitude de deslocamento sob ação de onda regular e correnteza com diferentes velocidades

A Figura 3 (a) ilustra o resultado de deslocamentos da Torre devido à ação de correnteza. Consideraram-se quatro velocidades de correnteza de perfil constante atuando entre 50 m e 200 m de profundidade e, conforme esperado, o deslocamento da estrutura aumenta à medida que se aumenta a velocidade. Por se tratar de um caso onde não há carregamentos oscilatórios (onda), como já era de se esperar, não vai haver amplitudes de deslocamento oscilatórios da estrutura do *riser*. Apenas se observa o máximo deslocamento horizontal estático. Quando se adiciona a ação das ondas do mar a este sistema, temos as máximas amplitudes de deslocamento conforme é ilustrado na Figura 3 (b). Para este caso, observa-se que, conforme esperado, as amplitudes de deslocamento em geral diminuem com o aumento da velocidade de correnteza.

5. CONCLUSÕES

A simulação numérica de um sistema de *risers* envolve muitas não-linearidades, como a geometria do *riser* e a viscosidade devido à onda. A análise no domínio do tempo representa de maneira mais apropriada estas não-linearidades do comportamento de um *riser*. Por outro lado, a linearização realizada no domínio da frequência proporciona um resultado aceitável com um menor custo computacional que a análise no domínio do tempo, sendo bastante útil em um estágio inicial de um projeto de sistemas de *risers*.

No presente trabalho, foi realizado o estudo dos fundamentos envolvidos nas soluções do domínio do tempo e da frequência e indicado uma breve descrição para estas duas abordagens. Apresentou-se resultados de simulação para diversos casos para o entendimento de eventuais diferenças entre as duas abordagens. De uma forma geral, em resultados para baixas frequências de excitação, a resposta da estrutura do *riser* de ambas as soluções, domínio da frequência e tempo, estão mais próximas.

Foi constatado que as abordagens no domínio da frequência e do tempo produzem resultados próximos para situações onde o efeito do VIV não é considerado. Porém, para o desenvolvimento de um modelo numérico que represente significativamente todos os fenômenos responsáveis pelo comportamento dinâmico de *risers* de produção, ainda há a necessidade de comparação com resultados obtidos experimentalmente ou em campo.

Para trabalhos futuros, pretende-se realizar comparações das soluções no domínio da frequência e do tempo para outros tipos de configurações.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao PRH/ANP, à FINEP e CNPq (CTPetro) e à Petrobras pelo apoio no desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- BAE, Y. S. e BERNITSAS, M. M. *Importance of Nonlinearities in Static and Dynamic Analyses of Marine Risers*. In: *5th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Hague, USA, 1995. **Anais do 5º ISOPE**, Vol 2, pp 209-218.
- BASU, A. K. *Iterative Frequency Domain Solution for Nonlinear Riser Response*. In: *5th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Hague, USA, 1995. **Anais do 5º ISOPE**, Vol 2, pp 219-226.
- CHAKRABARTI, S. K. *Hydrodynamic of Offshore Structures*. *Computational Mechanics Publications*, Springer-Verlag, 1987.
- CHAPLIN, J. R. e IKEDA, Y. *Viscous Forces on Offshore Structures and their Effects on the Motion of Floating Bodies*. In: *9th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Brest, USA, 1999. **Anais do 9º ISOPE**, Vol 3, pp 1-11.
- COELHO, F. M.; VIEIRA, S. C.; MOROOKA, C. K.; MATT, C. G. C. e FRANCISS, R. *Simulação Numérica do Comportamento de Risers de Produção em Águas Ultra-profundas*. In: *3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*, Salvador, Brasil, 2005a. **Anais do 3º PDPetro**.
- COELHO, F. M.; SHIGUEMOTO, D. A. e MOROOKA, C. K. *Description of a Vertical Riser Behavior in Frequency and Time Domain*. In: *18th International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto, Brasil, 2005b. **Anais do 18º COBEM**.
- FERRARI Jr., J. A. e BEARMAN, P. W. *Hydrodynamic Loading and Response of Offshore Risers*. In: *18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, St. John's, Canadá, 1999. **Anais do 18º OMAE**.

- MARTINS, F. P.; KUBOTA, H. Y.; MOROOKA, C. K.; FERRARI Jr., J. A. e RIBEIRO, E. J. B. Estudo do Comportamento Dinâmico “In Line” e Transversal de “Riser” Rígido de Produção. In: 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, Brasil, 2003. **Anais do 2º PDPetro**.
- MOROOKA, C. K. e YOKOO, I. H. *Behavior of Floating Platform with Marine Riser in Directional Waves*. In: 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference, São Francisco, EUA, 1992. **Anais do 2º ISOPE**.
- MOROOKA, C. K.; COELHO, F. M.; RIBEIRO, E. J. B.; FERRARI Jr., J. A. e FRANCISS, R. *Dynamic Behavior of a Vertical Riser and Service Life Reduction*. In: 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Grécia, 2005. **Anais do 24º OMAE**.
- MOROOKA, C. K.; COELHO, F. M.; SHIGUEMOTO, D. A.; FRANCISS, R. e MATT, C. G. C. *Dynamic Behavior of a Top Tensioned Riser in Frequency and Time Domain*. In: 16th International Offshore and Polar Engineering Conference, São Francisco, EUA, 2006. **Anais do 16º ISOPE**.
- PARK, H.; JUN, D. e PIAO, C. 3-D Numerical Solution Analysis of a Long Slender Marine Structure under Combined Axial and Lateral Excitations. In: 9th International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, USA, 1999. **Anais do 9º ISOPE**, Vol 2, pp 294-301.
- PEREIRA, P. S. D.; MAEDA, K.; MOROOKA, C. K.; TAMURA, K. e ITOH, K. *Experimental Study on a Self Standing Hybrid Riser System Throughout Test on a Deep Sea Model Basin*. In: 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Grécia, 2005. **Anais do 24º OMAE**.
- PEREIRA, P. S. D.; MOROOKA, C. K.; SHIGUEMOTO, D. A. e COELHO, F. M. *Self Standing Hybrid Riser System in Wave and Current*. In: 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburgo, Alemanha, 2006a. **Anais do 25º OMAE**.
- PEREIRA, P. S. D.; MOROOKA, C. K.; SHIGUEMOTO, D. A. e COELHO, F. M. Análise da Sistemática de Projeto para um Riser Híbrido de Uso em Águas Ultraprofundas. In: *Rio Oil & Gas Conference*, Rio de Janeiro Brasil, 2006b.
- ROVERI, F. E. e PESSOA, P. R. F. *Free Standing Hybrid Riser for 1800 m Water Depth*. In: 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Grécia, 2005. **Anais do 24º OMAE**.
- VIEIRA, L. T.; JACOB, B. P.; FERNANDES, A. C. e FRANCISS, R. *Studies on V.I.V Fatigue Behavior in SCRs of Hybrid Riser Systems*. In: 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Oslo, Noruega, 2002. **Anais do 21º OMAE**.
- SARPKAYA, T. e ISAACSON, M. *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*. Van Nostrand & Reinhold Company. 1st Ed., 1981.
- YAMAMOTO, C. T.; MENEGHINI, J. R.; SALTARA, F.; FERRARI Jr., J. A. e MARTINS, C. A. *Hydroelastic Response of Offshore Risers Using CFD*. In: 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 2001. **Anais do 20º OMAE**.

A Study of the Dynamic Behavior of a Vertical Rigid Riser in Frequency and Time Domain

Nonlinearities in *riser* dynamics due to environmental loads and the *riser* structural behavior itself, in general, lead to time domain *riser* analysis. However, time domain analysis shows a high computational cost, once it uses iterative procedures in order to solve equations for dynamic behavior of the *riser* system. Then, the frequency domain solution is presented as an alternative for *riser* dynamic behavior analysis. Non-linear hydrodynamic loads in the quadratic terms of Morison Equation are simplified by a linearization procedure obtaining faster the solution when compared with time domain approach. In the present work, main equations for the dynamic behavior of a top tensioned vertical *riser* (TTR) and the theory for solution in frequency and time domain is introduced. Simulations of a TTR under regular wave load and considering different water depth, riser length and top tension are realized. The top tension considered is 20% greater than the riser weight. Comparisons between both approaches in terms of maximum amplitudes of motion normalized by riser external diameter are presented and discussed. Also, results for a Tower system (sub-surface buoy supporting a rigid vertical riser) under regular wave and different current velocities are presented as an example of another configuration that can be analyzed by numeric approach.

Petroleum Production, Offshore Production Systems, Risers

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.