

# Engenharia Civil

## Estudo comparativo de análises no domínio do tempo e da frequência em *risers* flexíveis

(Comparative study of time and frequency  
domain analyses of flexible risers)

### Resumo

O procedimento mais realista para se efetuarem análises dinâmicas de *risers* flexíveis é o uso da análise no domínio do tempo. Análises no domínio do tempo conseguem levar em conta todas as não-linearidades inerentes ao sistema como a geométrica, a interação solo-estrutura, etc. Entretanto essas análises demandam um esforço computacional e um tempo de simulação muito grandes. Outros problemas associados às análises no domínio do tempo são: o sinal produzido pela simulação não é único e o comprimento do sinal deve ser grande o suficiente para garantir a estabilidade dos parâmetros estatísticos. Com o intuito de solucionar esses problemas, podem-se utilizar análises no domínio da frequência ao invés de análises no tempo por serem muito mais rápidas e necessitarem menor esforço computacional. Uma das diferenças entre as duas metodologias é que, no domínio da frequência, as não-linearidades inerentes ao sistema são linearizadas e os efeitos dessas alterações ainda não são bem conhecidos. Por essa razão, foi proposto um estudo comparativo entre análises no domínio do tempo e da frequência de estruturas flexíveis, a fim de verificar a influência da não consideração de algumas não-linearidades e tentar determinar uma faixa de utilização para análises no domínio da frequência.

**Palavras-chave:** *Risers*, domínio do tempo, domínio da frequência, análise dinâmica, offshore.

### Abstract

*The more accurate procedure for the dynamic analysis of flexible risers is time domain analysis. Time domain analyses takes into account all non linearities inherent to the system, such as geometry, soil-structure interaction etc. However, these analyses demand expensive computational effort and time. Others associated problems with time domain analyses are: the signal produced by simulation is not unique and the signal's length should be large enough to guarantee statistical parameters stability. An alternative method for this problem can be the use of frequency domain analysis instead of time domain analysis, since it is faster and requires much less effort. One of the main differences between the two methodologies is that the non linearities inherent to the system are linearized in the frequency domain and the effects of these modifications are not totally known, yet. Therefore, it was proposed to perform a comparative study between time and frequency domain analyses of flexible structures, analyzing the influence of not taking into account some non linearities and trying to find a range of applicability for frequency domain analyses.*

**Keywords:** *Risers*, time domain, frequency domain, Dynamic analysis, offshore.

### Alyson Gomes Vaillant

Petróleo Brasileiro S/A - PETROBRAS,  
Centro de Pesquisas e  
Desenvolvimento - CENPES,  
Tecnologia Submarina  
E-mail: vaillant@petrobras.com.br

### Ricardo Franciss

Petróleo Brasileiro S/A - PETROBRAS,  
Centro de Pesquisas e  
Desenvolvimento - CENPES  
Tecnologia Submarina  
E-mail: franciss@petrobras.com.br

### Marcílio Sousa da Rocha Freitas

Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, LAMEC/DECIV/  
Escola de Minas/UFOP  
E-mail: marcelio@em.ufop.br

## 1. Introdução

Com a crescente demanda por óleo combustível e gás natural, a exploração de petróleo tem se desenvolvido bastante. Atualmente, uma boa parte das jazidas petrolíferas em atividade e a maioria das jazidas recentemente descobertas no Brasil se encontram em águas profundas e ultraprofundas (*Scientific American Brasil*, 2003).

A exploração e a produção de petróleo em lâminas d'água cada vez mais profundas são, na atualidade, os principais desafios de engenheiros e projetistas, exigindo-se, para alguns componentes estruturais das plataformas, uma atenção especial (Lima et al., 2002 apud Santos, 2004). Entre esses componentes, destacam-se os *risers* (estruturas que conectam a unidade flutuante ao equipamento submarino) de perfuração, completação e produção e as linhas de ancoragem de plataformas semi-submersíveis e FPSOs (*Floating Production, Storage and Offloading*).

Novas ferramentas de análises, novas tecnologias e pesquisas de novos materiais têm sido desenvolvidas devido às severas condições impostas pela exploração e produção em águas profundas e ultraprofundas.

Os *risers*, que são elementos críticos para a produção em águas profundas e ultraprofundas, passaram a apresentar um comportamento dinâmico mais acentuado, comportamento este extremamente influenciado pelos movimentos do corpo ao qual eles se encontram conectados, que impõe em sua extremidade superior movimentos de translação e de rotação. Além desses movimentos, atuam nos *risers* cargas que incidem diretamente em sua própria estrutura, como: peso próprio, pressão externa e interna, variações de temperatura, efeitos hidrodinâmicos das ondas e correntes e cargas que agem concentradas, como as cargas de tração aplicadas no topo em sistemas de perfuração.

Há duas técnicas para se proceder à análise de *risers*; são elas: simulações no domínio do tempo, que podem ser

divididas em aleatórias e determinísticas, onde as solicitações são dadas como funções do tempo (sendo a representação das cargas hidrodinâmicas através de mar irregular muito mais realista que a representação de mar regular) e simulações no domínio da frequência, onde as solicitações são dadas como espectros de frequência.

As análises no domínio do tempo consideram de forma adequada as não-linearidades existentes devido aos efeitos dos carregamentos hidrodinâmicos, contato solo-estrutura, grandes deslocamentos, etc. Entretanto, a não-linearidade presente na parcela de arrasto da fórmula de Morison proíbe o uso da teoria de processos randômicos lineares e compromete a determinação da resposta dinâmica das estruturas *offshore* pelo método da análise aleatória no domínio da frequência (Dantas, 2000). As forças geradas pelas cargas hidrodinâmicas são avaliadas por meio da equação de Morison, que, em sua forma original, guarda uma relação não-linear quadrática com a velocidade relativa fluido-estrutura.

Sendo a velocidade do fluido uma variável aleatória, nas análises no domínio da frequência, devem ser utilizadas técnicas de linearização estatística para que possa ser utilizado esse procedimento de cálculo da resposta estrutural no domínio da frequência. Dessa forma, deve-se efetuar a linearização da equação que fornece os esforços gerados pelos carregamentos hidrodinâmicos, assim como da estrutura em uma dada posição. No ALFREQ (2006), programa não-linear de elementos finitos no domínio da frequência, o termo de arrasto da força hidrodinâmica para as análises de *risers* no domínio da frequência é traduzido por um modelo hidrodinâmico linear equivalente.

Segundo estudos realizados por Dantas (2004), as análises no domínio da frequência têm-se mostrado muito eficientes em análises de fadiga de *risers* rígidos, sendo que os resultados obtidos têm mostrado muito boa correspondência com os resultados das análises no domínio do tempo.

Entretanto, para estruturas com grandes não-linearidades geométricas, como é o caso de análises de cargas extremas para um *riser* em catenária livre, os resultados das análises no domínio da frequência podem apresentar diferenças significativas, quando comparados aos resultados obtidos pelas análises no domínio do tempo.

Uma vez que os efeitos gerados pelas linearizações que acontecem durante as análises no domínio da frequência de *risers* flexíveis, tal como a linearização do termo de arrasto na equação de Morison, ainda não são bem conhecidos, necessita-se de uma análise mais detalhada desse tipo de simulação.

As análises dinâmicas são normalmente realizadas no domínio do tempo com custo de processamento elevado, o que pode conduzir a um cronograma de projeto inviável ou a atrasos para a entrega dos resultados. Tais análises podem ser efetuadas por meio do método dos elementos finitos (MEF) a partir da utilização de alguns programas, tais como ANFLEX (ANFLEX, 2006), FLEXCOM (FLEXCOM, 2006) etc.

Já para as análises dinâmicas não-lineares no domínio da frequência, não é possível representar as não-linearidades mencionadas anteriormente. Entretanto essas análises demandam um menor esforço computacional e um tempo de simulação muito menor. Assim, diante da possibilidade de redução do custo computacional e do tempo de análise, a análise dinâmica no domínio da frequência se torna bastante atrativa e pode se constituir numa ferramenta de apoio ao projetista.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho é verificar se as análises no domínio da frequência podem ser utilizadas como uma metodologia para prever os casos de carregamentos críticos associados à tração no topo, cargas máximas e raios de curvatura mínimos para a região do TDP (*Touch Down Point*), a fim de se reduzir o tempo despendido na execução das análises dinâmicas. Para tanto, foi realizado um estudo comparativo entre análises efetuadas no domínio do

tempo e da frequência de estruturas flexíveis submetidas às mais diversas condições de carregamento, verificando qual a influência das linearizações inerentes às análises no domínio da frequência.

## 2. Metodologia

A metodologia de análise mais comumente adotada nos projetos de *riser* é baseada na análise dinâmica não-linear no domínio do tempo, determinística ou aleatória, devido à possibilidade da representação mais adequada das não-linearidades inerentes ao modelo. Este é o modelo de análise implementado no ANFLEX (2006), programa utilizado pela Petrobras e como mecanismo para as simulações no domínio do tempo realizadas nesse trabalho. Para as análises no domínio da frequência, utilizou-se o programa ALFREQ (2006), também de uso interno na Petrobras.

De um modo geral, o que se busca para as análises no domínio do tempo e da frequência é a solução da equação do movimento dada pela Eq. 1 (Torres et al., 2005).

$$\vec{M}\ddot{\vec{x}}(t) + \vec{C}\dot{\vec{x}}(t) + \vec{K}\vec{x}(t) = \vec{F}(t) \quad (1)$$

Entretanto, nas análises no domínio da frequência, se assume que as matrizes de massa,  $\vec{M}$ , de amortecimento,  $\vec{C}$ , e de rigidez,  $\vec{K}$ , são mantidas constantes ao longo da análise e assume-se, também, que a força e o deslocamento da estrutura são dados pelas seguintes expressões:

$$\vec{F}(t) = \vec{F} e^{i\omega_n t} \quad (2)$$

$$\vec{x}(t) = \vec{x} e^{i\omega_n t} \quad (3)$$

Substituindo as Eq. 2 e Eq. 3 na Eq. 1, obtém-se a Eq. 4. Assim, para obtenção do espectro de resposta nas análises no domínio da frequência, deve-se encontrar a solução da Eq. 4, considerando que os parâmetros  $\vec{M}$ ,  $\vec{C}$ , e  $\vec{K}$  não variam no tempo (Dantas, 2000).

$$[-\omega^2 \vec{M} + i\omega \vec{C} + \vec{K}]\vec{x}(\omega) = \vec{F}(\omega) \quad (4)$$

O problema é que a força dada pela equação de Morison é uma função periódica, mas não harmônica e essa forma de representação não é válida para o termo de arraste da formulação descrita por Morison. Dessa maneira, necessita-se efetuar a linearização do termo de arraste dado pela equação de Morison, a fim de suprir essa deficiência e obter uma aproximação harmônica razoável (Lane et al., 2001).

A metodologia de análise implementada no ALFREQ (2006) assume a realização de uma análise estática não-linear prévia à análise dinâmica, comum ao realizado no ANFLEX (2006), que leva a estrutura a uma posição deformada final, a partir da qual será realizada a análise dinâmica, sem a atualização da geometria do *riser*.

Nesse estudo, para efetuar a comparação entre as análises nos domínios do tempo e da frequência, foram utilizados os programas ANFLEX (ANFLEX, 2006), para análises no domínio do tempo, e ALFREQ (ALFREQ, 2006), para as análises no domínio da frequência. Foram levados em conta uma série de parâmetros que podem afetar, ou ser responsáveis, por diferenças entre as duas

metodologias de análises. Todos os casos foram avaliados para a configuração em catenária livre e foram consideradas dezesseis condições de carregamento, além da variação do espectro de onda, ver Figura 1.

Os parâmetros avaliados, assim como as premissas assumidas nas análises, se apresentados a seguir. Mais detalhes e os dados utilizados para realização das análises podem ser obtidos em Vaillant (2007).

- Altura de onda  $H_s$ : foram efetuadas análises variando esse parâmetro dentro de um intervalo de aplicação que contemple desde análises de fadiga a análises de extremo. Assim, foram efetuadas análises para as alturas significativas de onda de 2, 4, 6 e 8m.
- Período  $T_p$ : foram efetuadas análises variando esse parâmetro dentro de um intervalo de aplicação que variou entre 8 e 15 segundos, variando de 1 em 1 segundo.
- Coeficiente de arrasto  $CD$ : foram efetuadas análises com dois valores de coeficiente de arrasto: 0,9 e 1,2.

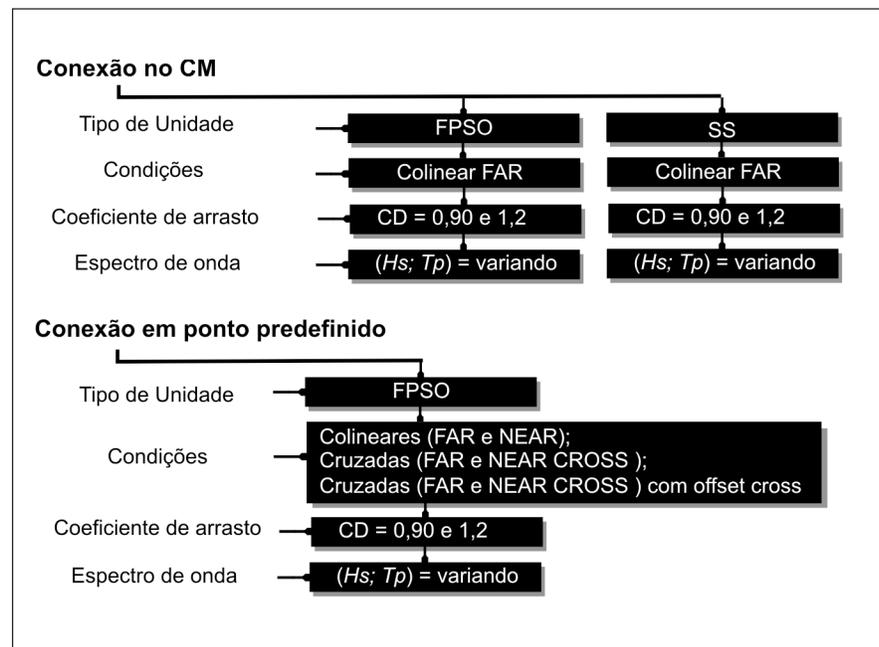


Figura 1 - Casos de carregamento utilizados para determinação do caso crítico.

- Tipo de unidade flutuante: foram realizadas análises para dois tipos de unidades flutuantes, uma plataforma do tipo FPSO e uma plataforma do tipo semi-submersível.
- Ponto de conexão utilizado coincidente com o centro de movimento da unidade (CM).
- Ponto de conexão levando em conta as dimensões do FPSO e considerando que este não esteja localizado próximo ao centro de movimento.
- Foram utilizados RAOs (*Response Amplitude Operator* - representam os movimentos de uma embarcação) que representassem os movimentos de um FPSO e uma SS (Semi-Submersível).
- Os dados de solo utilizados foram arbitrados de forma a simular as condições encontradas no campo.
- Os dados dos risers flexíveis utilizados foram gerados aleatoriamente, tomando o cuidado de manter os dados dentro de um intervalo de valores representativos.
- Foi utilizada uma profundidade de 1500m.
- Os offsets (movimentos no plano horizontal da plataforma) considerados nas análises foram 12% para o FPSO e 5% para a SS da lâmina d'água respectivamente.
- Correntes: alinhadas às ondas, utilizadas para os casos considerados colineares e defasadas de 60° das ondas para simular os casos CROSS.
- Foram levadas em conta as condições FAR, FAR CROSS, CROSSED FAR CROSS, NEAR, NEAR CROSS e CROSSED NEAR CROSS, as quais se encontram exibidas nas Figuras 2, 3 e 4.
- O duto foi considerado cheio de um fluido com densidade de 1025kg/m<sup>3</sup>.

As Figuras 2, 3 e 4 exibem graficamente as condições de carregamento utilizadas.

Na Figura 4, são mostrados os casos onde os offsets não são colineares e que possuem a mesma direção da corrente para os casos CROSS.

Para os casos de análise, todas as simulações no domínio do tempo foram realizadas para um intervalo de tempo de 10800s. Assim, os resultados dessas análises

foram diretamente confrontados com os resultados das análises na frequência. Todos os dados obtidos das simulações foram agrupados de forma a

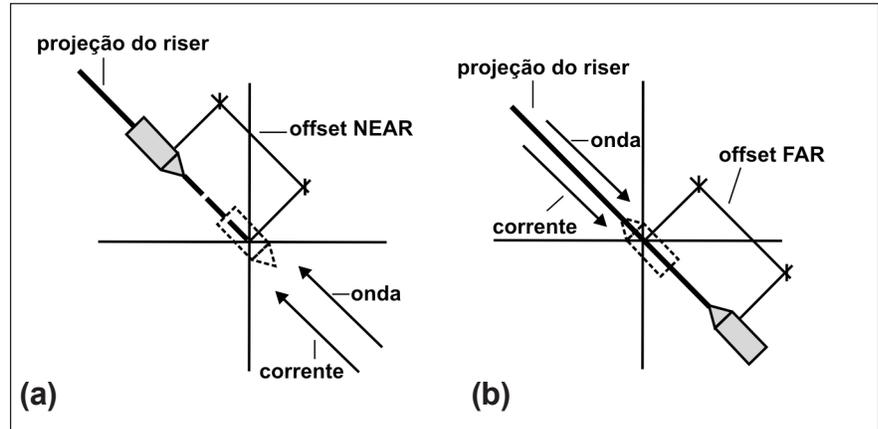


Figura 2 - Casos de análise colineares, offsets NEAR e FAR. (a) caso NEAR colinear; (b) caso FAR colinear.

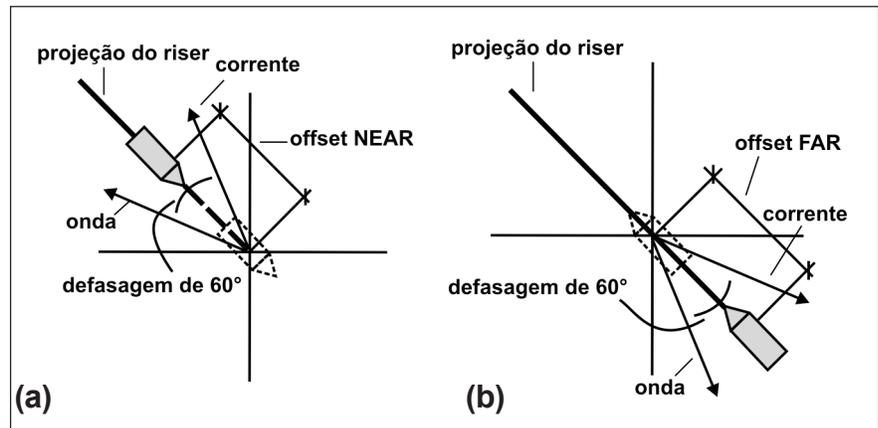


Figura 3 - Casos de análise não colineares, offsets NEAR e FAR. (a) caso NEAR CROSS; (b) caso FAR CROSS.

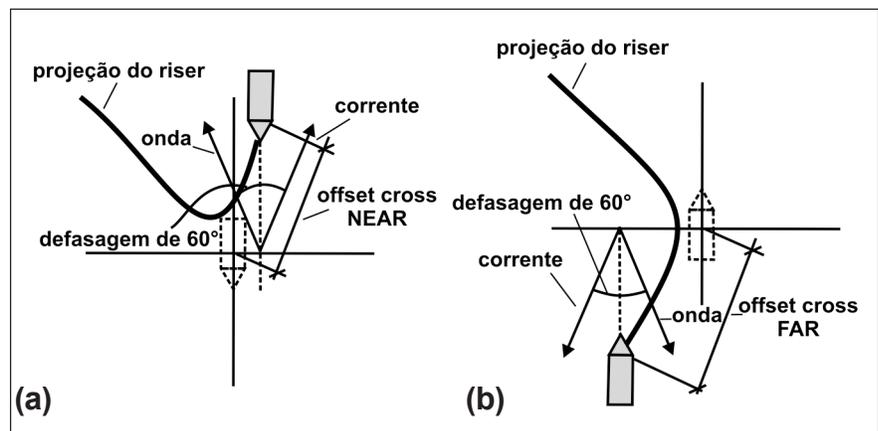


Figura 4 - Casos de análises, offsets cross NEAR e cross FAR. (a) caso CROSSED NEAR CROSS; (b) caso CROSSED FAR CROSS.

manter sempre um dos parâmetros da análise variável, por exemplo: fixando  $H_s = 2m$  e  $T = 10s$  e variando o coeficiente de arrasto, etc.

Os parâmetros comparados nas análises foram: forças de tração mínimas no topo e momentos TDP. Optou-se por obter os resultados não somente de um único elemento, mas de uma faixa de comprimento, tanto na região do topo, como no TDP, assim foi considerado um comprimento de 5m no topo e 200m no TDP. Para a região do TDP, a região de maior interesse em nossa avaliação ocorre em torno do TDP estático devido ao fato de as análises no domínio da frequência não variarem este ponto durante a fase dinâmica do carregamento.

Para as comparações entre as diferentes metodologias foi utilizada a Eq. 5:

$$E(\%) = -\frac{(R_{Tempo} - R_{frequência})}{R_{Tempo}} \times 100\% \quad (5)$$

onde:

$E(\%)$ : é a diferença entre os resultados no domínio do tempo e da frequência.

$R_{Tempo}$ : é o resultado de uma simulação no tempo com um tempo  $T = 10800s$ .

$R_{Frequência}$ : é o resultado na frequência com projeção  $T = 10800s$ .

### 3. Resultados

Foi obtida uma grande quantidade de gráficos que traduzem o comportamento das diferenças entre as metodologias de análise considerando os parâmetros citados no item anterior.

As Figuras 5 (a e b) exibem os esforços de tração e os desvios-padrão no topo, obtidos para análises nos domínios do tempo e da frequência para o caso FAR colinear, considerando unidade do tipo FPSO,  $CD = 0,9$ ,  $H_s = 8m$  e  $T_p = 15s$ , em uma comparação direta entre os esforços e desvios-padrão, sem aplicação da Eq. 5.

As curvas onde consta a letra "f" representam as análises no domínio da frequência. De uma maneira geral, as Figuras obtidas exibiram uma boa aproxima-

ção entre os resultados das análises no domínio do tempo e da frequência. Contudo o comportamento apresentado nas Figuras 5 (a) e (b) não representa o comportamento geral de todos os casos analisados, principalmente no que tange ao conservadorismo, que pode variar entre simulações no tempo e na frequência, como pode ser visto na Figura 6, onde, ao invés da força mínima média das N simulações, foram comparados os resultados de apenas uma simulação, ocorrendo a inversão de conservadorismo. Entretanto as diferenças obtidas entre os resultados foram muito pequenas.

As Figuras 7 e 8 exibem curvas de momento e desvio-padrão de momento na região do TDP, mostrando as disparidades entre as diferentes metodologias.

Pode-se observar desses gráficos os picos de momento que ocorrem quando consideramos as análises no domínio da frequência, uma vez que o ponto em contato com o solo não varia com o tempo. Deve-se atentar para o fato de que as diferenças metodológicas adotadas não permitem que sejam realizadas essas comparações, necessitando se utilizar nas análises no domínio da frequência de artifícios para compensar essas diferenças.

O comportamento das diferenças, conforme Eq. 5, entre as respostas obtidas no domínio do tempo e da frequência frente à variação de  $H_s$ , pode ser visto na Figura 9. Pode-se verificar que ocorrem inversões nas declividades das curvas para períodos constantes, indicando uma tendência, ora conservadora, ora

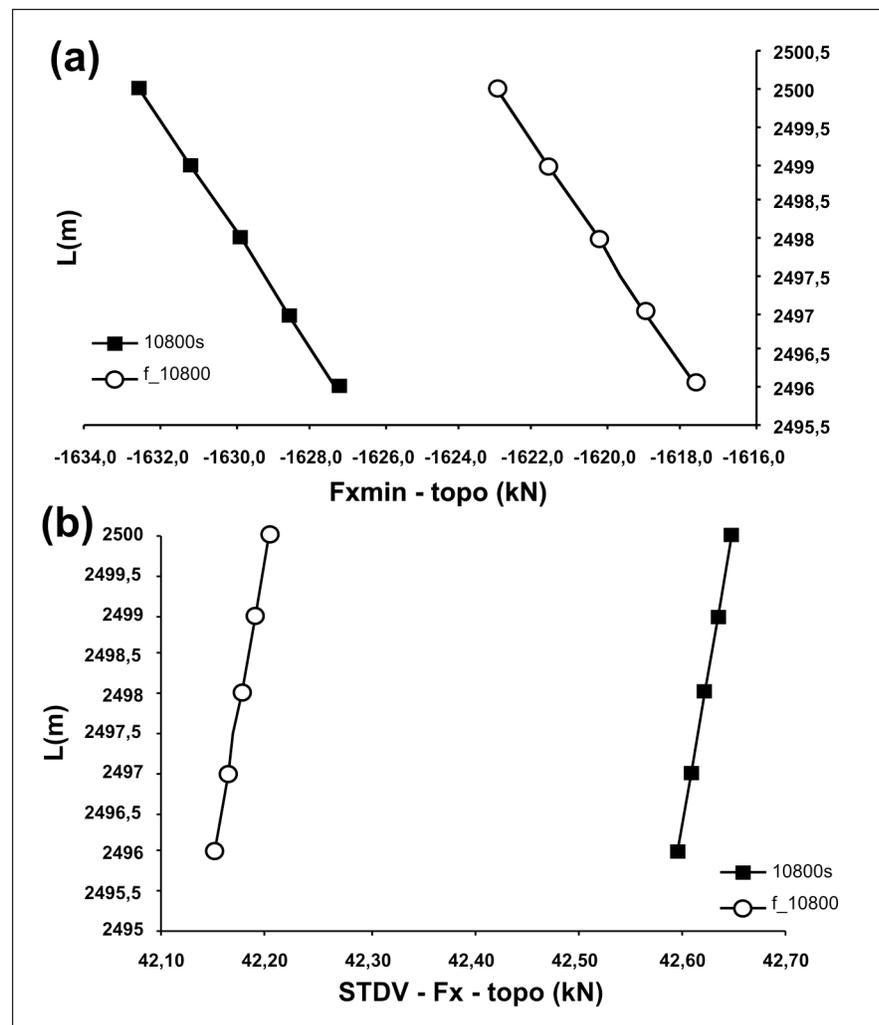


Figura 5 - Envoltórias de força mínima e desvio-padrão médio no topo para 10 simulações. (a) força mínima média; (b) desvio-padrão médio.

não conservadora. Essas mesmas conclusões podem ser retiradas da Figura 10, onde o parâmetro variável passa a ser o período do espectro.

Também se observou que o comportamento descrito pelo aumento do  $CD$  é influenciado pelo aumento da altura significativa e pelo período associado de forma não-linear, não havendo uma tendência bem definida no que tange ao seu aumento, podendo os resultados associados a esse aumento ser conservadores ou não.

Para visualização de outras Figuras e de mais resultados para os parâmetros citados, consultar Vaillant (2007).

Um resumo dos resultados obtidos nas análises está exibido na Tabela 1. As diferenças exibidas na Tabela 1 seguem a Eq. 5 e a referida Tabela foi dividido da seguinte forma:

- *Coluna 1* - exibe os casos de carregamento analisados, conforme Figura 1.
- *Coluna 2* - exibe para a carga de tração mínima no topo, a confirmação se as análises no domínio da frequência identificaram ou não o caso crítico e o valor da diferença obtida, segundo a Eq. 5, entre os resultados de análise no domínio do tempo e da frequência. Quando ocorre a identificação do caso crítico, preenche-se o quadro com o texto "OK" e, quando não, preenche-se o quadro com o texto "Não".
- *Colunas 3 e 4* - exibem para a carga de tração máxima e momento no TDP a confirmação se as análises no domínio da frequência identificaram ou não o caso crítico.

As outras colunas seguem o mesmo padrão descrito para as colunas 2, 3 e 4.

De acordo com a Tabela 1, pode-se notar que as análises no domínio da frequência foram capazes de identificar, para os casos FAR, menos de 50% dos casos mais críticos, fornecendo diferenças cada vez maiores à medida que as não-linearidades aumentaram. Para os casos NEAR, foi possível a identificação de mais do que 50% dos casos, estando os resultados na frequência com uma melhor acur-

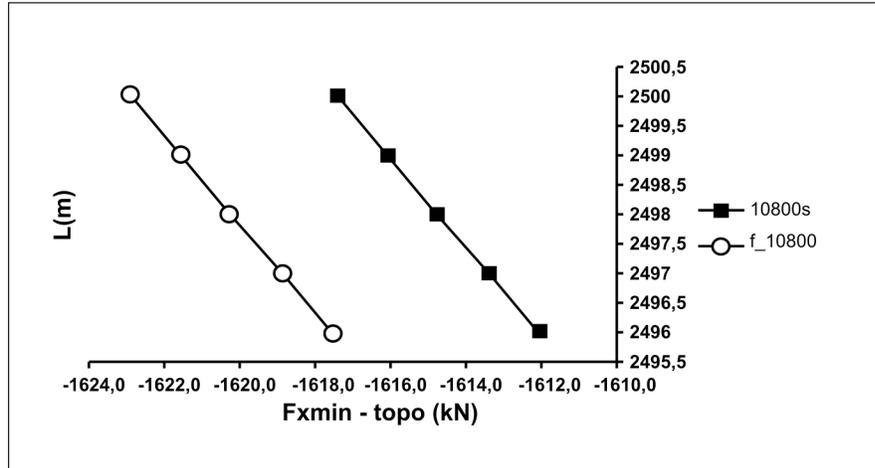


Figura 6 - Envoltória de força mínima para 1 simulação.

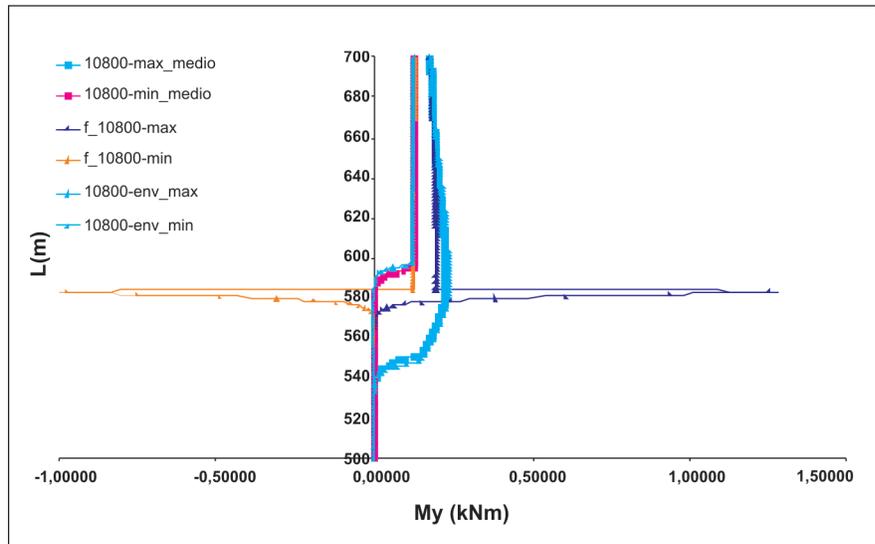


Figura 7 - Curvas de momentos no TDP.

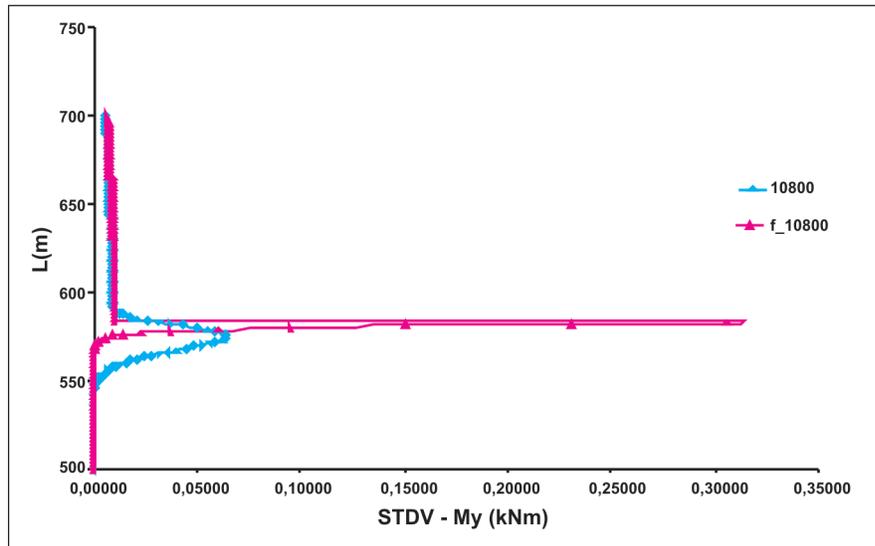


Figura 8 - Curvas de desvio-padrão de momentos no TDP.

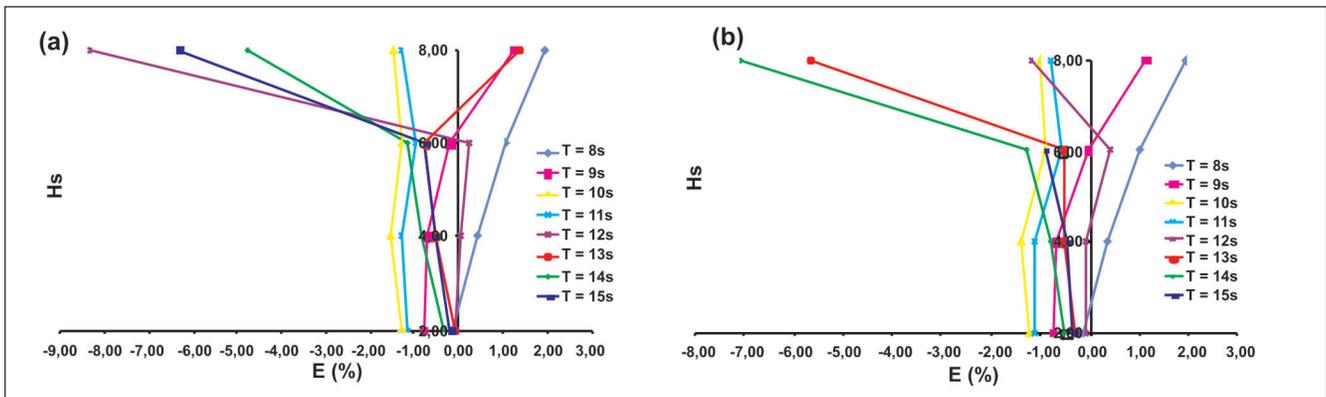


Figura 9 - Influência do  $H_s$  para o FPSO na condição FAR CROSS com conexão no turrete. (a) CD = 0,9; (b) CD = 1,2.

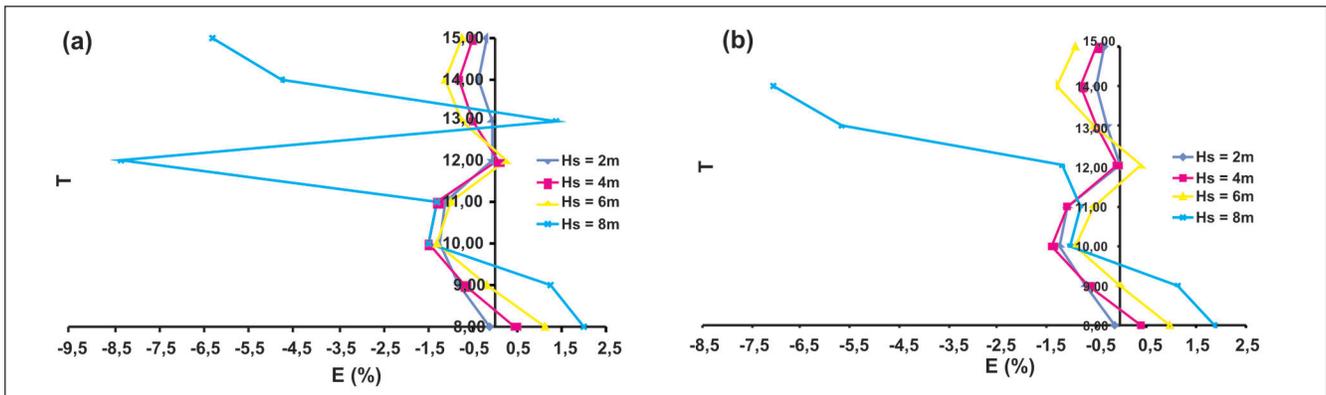


Figura 10 - Influência do  $T_p$  para o FPSO na condição FAR CROSS com conexão no turrete. (a) CD = 0,9; (b) CD = 1,2.

Tabela 1 - Comparação dos resultados obtidos no domínio do tempo e frequência.

Casos	Offset											
	FAR						NEAR					
	CD = 0,9			CD = 1,2			CD = 0,9			CD = 1,2		
	Topo	TDP		Topo	TDP		Topo	TDP		Topo	TDP	
$F_{xmin}$	$F_{xmax}$	$M_{ymin}$	$F_{xmin}$	$F_{xmax}$	$M_{ymin}$	$F_{xmin}$	$F_{xmax}$	$M_{ymin}$	$F_{xmin}$	$F_{xmax}$	$M_{ymin}$	
FPSO-colinear com conexão no CM	OK	OK	OK	OK	OK	OK	-	-	-	-	-	-
	-0,97%			-1,32%			-	-	-	-	-	-
SS-colinear com conexão no CM	Não	OK	Não	Não	Não	Não	-	-	-	-	-	-
	-1,63%			-1,88%			-	-	-	-	-	-
FPSO-colinear com conexão no Turret	Não	Não	OK	OK	OK	OK	OK	Não	OK	OK	OK	OK
	-2,41%			-3,50%			3,70%			2,90%		
FPSO-cruzada com conexão no Turret	Não	Não	OK	OK	Não	OK	Não	Não	Não	Não	Não	OK
	-8,34%			-7,06%			1,20%			1,40%		
FPSO-cruzada com conexão no Turret e offset cross	Não	Não	Não	Não	Não	Não	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	-6,89%			-8,83%			-4,65%			-2,99%		
Todos *	Não	Não	OK	OK	Não	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	-8,34%			-7,06%			-4,65%			-2,99%		

NOTA: foram avaliadas as cargas de tração mínimas no topo, as cargas de tração máximas e momentos mínimos no TDP.

\* Todos representam a comparação entre cada condição, por exemplo, FAR inclui as condições FAR, FAR CROSS e CROSSED FAR CROSS. Para NEAR funciona da mesma forma.

rácia, fato que se dá em função dos resultados obtidos no domínio do tempo e devido à redução das não-linearidades no topo.

Considerando todos os casos FAR (FAR, FAR CROSS, etc.), as análises no domínio da frequência identificaram a condição mais crítica no topo para  $CD = 1,2$ , considerando os esforços de tração mínimos, entretanto isto não foi possível para  $CD = 0,9$ . Já para os casos NEAR (NEAR, NEAR CROSS, etc.), as análises no domínio da frequência identificaram a condição mais crítica para ambos os CDs, 0,9 e 1,2.

A identificação do caso mais crítico entre as condições NEAR ou FAR é satisfatória devido à maior diferença nos resultados, que, normalmente, são muito superiores às diferenças encontradas, diferentemente de quando se está avaliando os casos dentro de uma mesma condição, por exemplo, FAR, variando-se somente um parâmetro, que pode levar a resultados muito próximos, dificultando a identificação do caso crítico pelas análises no domínio da frequência.

Dessa forma, há uma boa utilização das ferramentas de análise no domínio da frequência, uma vez que as análises conseguem identificar os casos mais críticos, quando os resultados esperados por meio de análises no domínio do tempo não se encontrarem próximos. Foi verificado das comparações realizadas que as análises no domínio da frequência são capazes de identificar os casos mais críticos, desde que os resultados obtidos não se encontrem dentro de uma margem de segurança de  $\pm 10\%$  do maior valor de tração.

## 4. Discussão dos resultados

Não foi possível prever o comportamento das cargas de tração no topo por meio das análises da frequência quando comparadas ao domínio do tempo, indicando haver ou não conservadorismo, mas, de acordo com os resultados das análises, foi verificado que as diferenças entre as análises não foram significativas.

Nas análises no domínio do tempo, o fato de se considerar a atualização da geometria da estrutura faz com que exista uma região do riser, que ora entra em contato com o solo, ora se afasta do solo, conhecida como TDZ (*Touch Down Zone*). Entretanto a não atualização da estrutura nas análises no domínio da frequência incorre em manter um único ponto em contato com o solo durante a realização da análise dinâmica, ponto conhecido como TDP.

A comparação para a região do TDP foi realizada com o intuito de mostrar as diferenças entre os resultados obtidos para simulações no tempo e na frequência e de demonstrar a incapacidade das análises no domínio da frequência de representar as não-linearidades implícitas à região do TDP. Dessa forma, as análises no domínio da frequência, para a região do TDP, não conseguiram reproduzir com acurácia os resultados obtidos por meio das simulações no domínio do tempo, uma vez que as diferenças obtidas para as diferentes metodologias de simulação se traduzem em valores completamente discrepantes e conservadores. Entretanto, conforme mencionado anteriormente, essas diferenças metodológicas não permitem que sejam realizadas essas comparações, sendo necessário desenvolverem-se, para as análises no domínio da frequência, artifícios, como a calibração das molas de solo, etc., para compensar tais diferenças. Caso contrário, ao se efetuarem análises de fadiga no domínio da frequência, para a região do TDP, poderá ocorrer uma grande concentração de dano no elemento que corresponde ao TDP.

## 5. Conclusões

As análises no domínio da frequência demonstraram ser viáveis em substituição ao domínio do tempo nas fases preliminares de projeto para a determinação dos casos de carregamento mais críticos, visando à tração no topo, desde que os resultados obtidos não se encontrem dentro de uma margem de segurança de  $\pm 10\%$  do maior valor de tração. Caso os resultados se encontrem dentro dessa faixa, todos os casos deverão ser avaliados no domínio do tempo.

Uma vez que os casos analisados não cobrem todas as situações, sugere-se que mais estudos sejam realizados para comparar as análises nos domínios do tempo e da frequência levando em conta outras condições de projeto.

## 6. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer imensamente a Petrobras, em especial ao CENPES/PDP/Tecnologia Submarina, pelo apoio técnico e financeiro recebidos e também por permitir que as informações contidas nesse documento fossem publicadas.

## 7. Referências bibliográficas

- ALFLEQ - Versão 6.5.3, Petrobras, 2006.  
ANFLEX - Versão 6.5.3, Petrobras, 2006.  
DANTAS, C. M. S. *Análise de técnicas de linearização da força de arrasto em estruturas offshore*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000. (Dissertação de Mestrado).  
DANTAS, C. M. S. *Metodologia de análise de fadiga de risers rígidos no domínio da frequência com utilização de modelos hidrodinâmicos tridimensionais linearizados*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2004. (Tese de Doutorado).  
FLEXCOM - Version 7.1, MCS, 2006.  
LANE, M., O'SULLIVAN, T., GREALISH, F. et al. *Advanced frequency domain analysis techniques for steel catenary risers*. OTC - Offshore Technology Conference, 13017, Houston, Texas, 2001.  
LIMA, E. C. P., ELLWANGER, G. B., JACOB, B. P. *Tecnologias de exploração de petróleo*. Rio de Janeiro: Pós-Graduação Executiva em Petróleo, MBP - Master Business in Petroleum, COPPE/UFRJ, 2002.  
SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL. *Petróleo: a ciência de extrair energia da Terra*. Scientific American Brasil. (3. ed.). São Paulo: Editora Duetto, 2003.  
TORRES, A. L. F. L., DANTAS, C. M. S., SIQUEIRA, M. Q. et al. *Utilização do ANFLEX, ALFREQ e POSFAL na análise de fadiga de SCR*. Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, 2005.  
VAILLANT, A. G. *Estudo comparativo de análises no domínio do tempo e da frequência em risers flexíveis*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, 2007. (Dissertação de Mestrado).  
**Artigo recebido em 23/08/2007 e aprovado em 11/05/2009.**