

# ANÁLISE DINÂMICA DE PLATAFORMA MARÍTIMA SEMI-SUBMERSÍVEL EM ALTO MAR

**Marcelo Cavalcanti Rodrigues**

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Departamento de Engenharia Mecânica  
CEP 58109-970 - Campina Grande – Paraíba, e-mail: [celo\\_cr@hotmail.com](mailto:celo_cr@hotmail.com).

**Natanael Victor de Oliveira**

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Departamento de Engenharia Mecânica  
CEP 58109-970 - Campina Grande – Paraíba, e-mail: [natanaelvo@yahoo.com.br](mailto:natanaelvo@yahoo.com.br)

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma análise do comportamento dinâmico de plataformas marítimas sob excitações provenientes do meio ambiente, onde o efeito ambiental mais considerado como causadora de danos às colunas de sustentação da plataforma e aos dutos marítimos (riser's) são as excitações provenientes das ondas em alto mar. Para a análise do comportamento dinâmico da estrutura utilizou-se o software ADINA 7.5 que utiliza o método dos elementos finitos e o método da análise modal (cálculo dos autovalores e autovetores), obtendo as configurações das deformações da coluna de sustentação da plataforma. Em seguida, a coluna da plataforma é excitada com sinais periódicos que representam a excitação da onda do mar e por um sinal que caracteriza a onda do mar e a Interação Fluído – Estrutura. Os resultados gráficos das respostas no tempo e seus espectros em freqüência são analisados para as demais situações de excitações utilizadas. A análise dinâmica dos movimentos da coluna da plataforma que são geradas pela incidência das ondas do mar é de grande importância nas análises de danos estruturais nos dutos (riser') conectados a plataforma marítima.

**Palavras chave:** Simulação, Comportamento Dinâmico, Plataforma Semi-Submersível.

## 1. INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo no mar é realizada utilizando-se plataformas marítimas, que nada mais são que estruturas flutuantes de aço. Em profundidades maiores que 150m, empregam-se unidades de perfuração flutuantes: plataformas semi-submersíveis que são mantidos na vertical do poço, através de um sistema de âncoras. O casco das plataformas semi-submersíveis é formado de dois flutuadores submersos, posicionados paralelamente, onde se apoia o convés superior por meio de colunas verticais obtendo assim, estabilidade considerada maior que os navios sonda utilizados (Rodrigues, 2002).

A plataforma semi-submersível é uma estrutura flutuante que possui movimentos no plano horizontal limitado por um sistema de posicionamento dinâmico ou por um sistema de ancoragem composto por cabos de aço ou corrente. As plataformas estão conectadas aos riser's (dutos marítimos que transportam óleo, gás e água produzida) que estão sujeitos a ação de ondas, correntezas e movimentos provenientes da plataforma. No projeto de tal estrutura alguns requisitos devem ser satisfeitos para que as atividades de perfuração e produção sejam realizadas com máxima segurança e economia. No projeto deve-se garantir que a estrutura mantenha uma posição de equilíbrio estável nas mais diversas condições de operação e solicitações do meio ambiente. E também, que a estrutura permita movimentos que estejam dentro do limite, para as operações de perfuração e produção de petróleo.

Utilizando a equação de Morison (Morison, et al. 1950), é demonstrado que as componentes de inércia e arrasto são expressas em termos dos movimentos da superfície do mar, sendo importante para obter as respostas dinâmicas da estruturas “offshore” quando excitadas por ondas do mar (Chang & Hahn, 1995).

A forma geral da equação de Morison é obtida somando a força de inércia e a força de arrasto como segue na Eq. (1):

$$F_T = \int_L \rho C_M A_S \dot{u} ds + \int_L \frac{1}{2} \rho C_D D u |u| ds \quad (1)$$

onde  $F_T$  é a força hidrodinâmica total;  $C_M$  coeficiente de inércia;  $\rho$  é a densidade da água;  $C_D$  é o coeficiente de arrasto;  $D$  é o diâmetro da coluna;  $u$  velocidade do fluido;  $A_S$  é a área da seção transversal da coluna;  $\dot{u}$  aceleração do fluido e  $L$  é o comprimento da coluna.

Segundo (Sarpkaya & Isaacson, 1981), a aceleração da partícula da água pode ser expressa por:

$$\ddot{u}(y, t) = -\sum_{i=1}^n \exp(-\omega_i^2 y / g) \omega_i^2 a_i \sin(\omega_i t - \theta_i) \quad (2)$$

onde  $g$  - gravidade,  $\omega_i$  é a freqüência de excitação (rad/s),  $a_i$  é a amplitude de deslocamento e  $\theta_i$  é o ângulo de fase.

Neste artigo apresenta-se uma formulação de perfil de onda do mar (força de excitação), onde procura-se excitar as colunas num processo que caracteriza a interação fluido-estrutura. Em seguida, procura-se analisar as respostas no domínio do tempo e os seus respectivos espectros, quando se considera o sistema das colunas de sustentação com multi-graus de liberdade.

## 2 MODELOS MATEMÁTICOS DO PERFIL DE ONDA

### 2.1 Modelo do perfil de onda proposto

Segundo (Chakrabarti, 1987), a forma mais simples de se representar uma onda do mar para ser utilizada como fonte de excitação numa estrutura “Offshore” é uma oscilação do tipo cossenoide, dada pela Eq. (3).

$$\eta(t) = (H/2) \cos(\omega t) \quad (3)$$

onde  $H/2$  é a amplitude da onda e  $\omega$  a freqüência de excitação.

(Shroeder, 1970), demonstrou que através dos ângulos de fase das harmônicas que compõe um sinal, produziu um sinal de excitação do tipo cossenoide com baixo fator de pico (quociente do maior valor em amplitude pelo seu valor eficaz). Deste modo, considera-se um modelo alternativo de uma fonte de excitação periódica (força), que poderá ser utilizada para excitar a estrutura e que é sugerida na forma da Eq. (4).

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N \beta_n \cdot \cos(n\omega t) \quad (4)$$

onde  $\beta_n$  é dado pela Eq. (5)

$$\beta_n = H/2 \cdot \left\{ 1 - 2 \left[ \frac{\phi_n}{\pi} \right] \right\} \quad (5)$$

e  $\phi_n$  dado pela Eq. (6),

$$\phi_n = 1 - \pi \left[ \frac{n^2}{2N} \right] \Rightarrow \beta_n = \frac{H}{2} \left[ 1 - \pi \left( \frac{n^2}{2N} \right) \right] \quad (6)$$

onde o ângulo de fase  $\phi_n$  varia entre  $(0$  e  $\pi)$  e  $\beta_n$ , se constitui numa série temporal assumindo valores genéricos entre  $H/2$  e  $-H/2$ , (Shroeder, 1970 e Oliveira, 1997 ).

Na Figura (1), apresenta-se o perfil de onda no tempo utilizando-se o modelo da Eq. (4) proposto e o seu respectivo espectro.

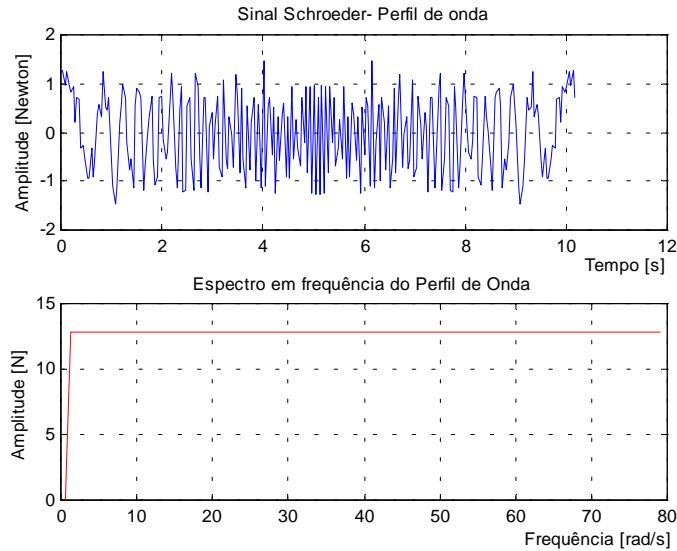


Figura 1. Perfil de onda no tempo e o espectro em frequência

Este sinal possui um espectro de banda larga em frequência do tipo ruído branco, porém, com as vantagens de ser um sinal periódico. As vantagens de utilizar este sinal são: alto conteúdo frequencial (de banda larga) com propriedades estatísticas de um ruído branco, onde a faixa de frequência pode ser pré-estabelecida; periódico; garante excitação persistente no sistema e a energia contida no sinal é de forma distribuída; pode ser facilmente gerado e utilizado experimentalmente através de um “SHAKER” para excitar a estrutura (Rodrigues, 2003).

## 2.2 Modelo proposto do perfil de onda utilizando a interação fluído – estrutura

Para associar modelo do perfil onda, baseado na Interação Fluído – Estrutura, utiliza-se o modelo equivalente da Eq. (4) na forma da Eq. (7),

$$X_n(y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \cos(\omega_n t) \quad (7)$$

onde  $\omega_n = n\omega_0$ ;  $n = 1(1)N$ .

Como é uma onda de superfície com propagação que interage a uma distância  $X_n(y, t)$  com a coluna da plataforma, pode-se perceber claramente que,  $\beta_n = -H/2$ , para  $\phi_n = 0^\circ$  e  $H/2$  para  $\phi_n = \pi$ , onde  $H/2$  é a amplitude de onda.

Deste modo, a aceleração da onda sem considerar a priori a interação com a estrutura, é dada por,

$$\ddot{X}_n(y, t) = -\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t) \quad (8)$$

A conjunção com a teoria linear da onda (Sarpkaya & Isaacson, 1981) para  $y \neq 0, \forall t$ , conduz a:

$$\ddot{X}(y, t) = -\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\omega_n^2 y / g} \beta_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t) \quad (9)$$

Pode-se observar que, para  $y = 0$  ou na SWL – Still Water Level (superfície), isto é, não há o efeito da interação do fluido na estrutura, o que redunda na Eq. (8).

A força, que passará a interagir sobre a coluna da plataforma para  $y \neq 0$ , agora poderá ser dada na forma da Eq. (10),

$$F_n(y, t) = M_e \ddot{X}(y, t) \quad (10)$$

onde  $M_e$  é a massa específica da água do mar, dada por:

$$M_e = \rho A_n y_n \quad (11)$$

Daí tem-se, que:

$$F_n(y, t) = -\rho A_n y \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\omega_n^2 y / g} \beta_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t) \quad (12)$$

Da Equação (12), observa-se claramente o perfil de distribuição das forças que interagem com as colunas de sustentação da plataforma em função da altura de coluna de água.

Como a onda do mar encontra-se em movimento, pode-se fazer uso da Eq. (7), para associar o modelo ao comprimento de onda e velocidade de propagação.

$$X_n(y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \cos(2\pi \dot{X}(y, t) / \lambda_n) t \quad (13)$$

onde  $\omega_n$  (frequência de propagação de onda) pode ser dado por,

$$\omega_n = 2\pi \dot{X}(y, t) / \lambda_n \quad (14)$$

onde,  $\dot{X}(y, t)$  e  $\lambda_n$  são respectivamente a velocidade de propagação e comprimento da onda.

Finalmente, substituindo a Eq. (14) em (12), obtém-se a equação à Eq. (15), que caracteriza a força de excitação oriunda da onda do mar, que passará a interagir sobre a estrutura (Rodrigues, 2003),

$$F_n(y, t) = -\rho A_n y \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(2\pi \dot{X}(y, t) / \lambda_n)^2 y / g} \beta_n (2\pi \dot{X}(y, t) / \lambda_n)^2 \cos((2\pi \dot{X}(y, t) / \lambda_n) t) \quad (15)$$

Na Figura (2), apresenta-se o perfil da força de excitação que passará a interagir sobre a estrutura da plataforma semi-submersível, utilizando-se o modelo matemático proposto na Eq. (15).

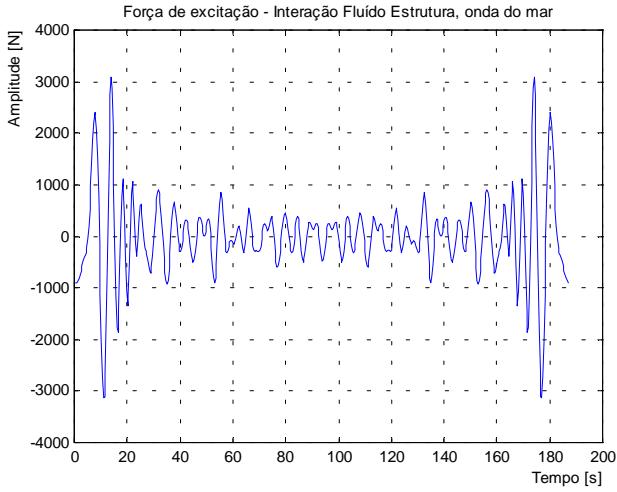


Figura 2. Força de excitação (Interação Fluído – Estrutura).

Para a geração deste sinal de excitação, utilizou-se os seguintes parâmetros que caracterizam a interação fluido–estrutura: área de atuação da onda sobre a coluna  $A=96\ m^2$ , comprimento de onda  $\lambda_n = 6m$ , aceleração da gravidade  $g = 9.81\ m/s^2$ , profundidade da água  $Y = 5\ m$ , amplitude da onda  $H = 4m$  e densidade específica da água do mar  $\rho = 1025\ Kg/m^3$ .

### 3 SIMULAÇÃO E MODELAGEM DA PLATAFORMA SEMI-SUBMERSÍVEL

Na simulação da estrutura, considera-se que a plataforma esteja bem fixada aos seus sistemas de ancoragem e dutos (riser's), isto é, como se os flutuadores estivessem fixos, permitindo movimentos das colunas até o convés. As fontes de excitação oriundas das ondas do mar são diretamente aplicadas nas colunas da plataforma. Para a simulação considera-se que apenas uma coluna será excitada, pois estamos interessados em conhecer o comportamento dinâmico da coluna quanto a suas respostas no domínio do tempo e da frequência (Rodrigues, 2002).

Para o processo de simulação, utiliza-se em princípio os dados e/ou parâmetros sobre uma plataforma semi-submersível obtidos da literatura, (Vardaro & Morooka, 1991). Na Tabela (1), são apresentadas as dimensões e as propriedades do material da estrutura da Plataforma semi-submersível com dados de convés, altura das colunas de sustentação, diâmetro das colunas, etc. Considera-se que as propriedades do material são: *Módulo de Elasticidade*  $2,07 \times 10^{11}\ N/m^2$ ; *Coeficiente de Poisson* é 0,29 e *a Densidade* de  $7,86 \times 10^3\ Kg/m^3$ .

Tabela 1. Dimensões da estrutura: Plataforma semi-submersível.

DIMENSÕES DA PLATAFORMA	
Convés	80,0 x 80,0 (m)
Altura das Colunas	25,0 (m)
Diâmetro das Colunas	8,0 (m)
Altura dos Flutuadores	8,0 (m)
Largura dos Flutuadores	15,0 (m)
Boca do convés	75,0 (m)
Espessura da coluna	3"
Comprimento dos Flutuadores	115,0 (m)

Para a simulação da plataforma semi-submersível, foi construído no ADINA 7.5 um modelo de uma plataforma semi-submersível do tipo Catamarã de quatro colunas, com 11000 elementos. Esse modelo representado pelo desenho construído no próprio ADINA constitui de colunas e flutuadores. Na Fig. (3) e na Fig. (4), apresenta-se a modelagem da plataforma e da coluna de sustentação.

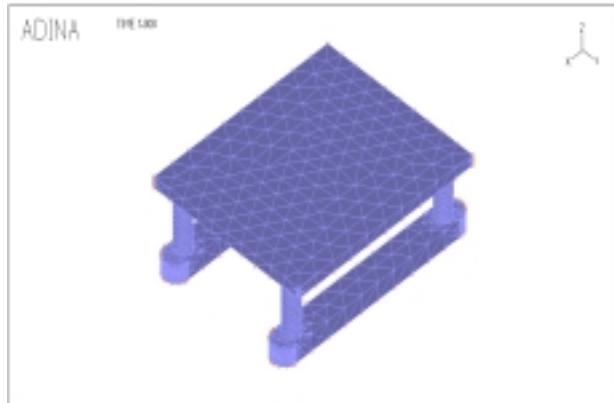


Figura 3. Modelagem da Plataforma Semi-submersível.

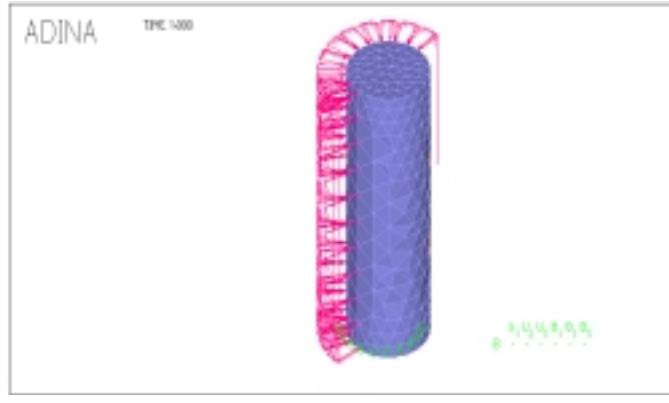


Figura 4. Modelagem da coluna de sustentação sob excitação.

Para a simulação no ADINA 7.5 foi utilizada a excitação da força das ondas em alto mar nas colunas da plataforma semi-submersível, conforme modelo proposto pela Eq. (15). A modelagem da coluna mostra claramente toda a área em que foi aplicada a força de excitação.

#### 4 RESULTADOS

Para uma avaliação qualitativa dos dados obtidos, procurou-se excitar a estrutura da coluna de sustentação da plataforma com o sinal de excitação proposto, e avaliar os espectros das respostas associados aos três primeiros modos de vibração. Neste caso, uma observação visual com relação aos picos máximos dos espectros das respostas, localiza-se as freqüências naturais obtidas a partir do modelo de elementos finitos. Em seguida, procura-se excitar também a coluna, com o mesmo sinal de excitação, mas modelado de tal forma que se leve em consideração alguns parâmetros do fluido (Interação Fluído-Estrutura). Deste modo, resultados dos espectros das curvas de respostas em freqüências são apresentados e discutidos.

Para a identificação dos parâmetros modais da plataforma, as condições de contorno utilizadas são consideradas em que os flutuadores estão fixos, apenas as colunas sofrerão deformações. Na Figura (5), apresenta-se a configuração geométrica e os seus três primeiros modos de vibração da plataforma.

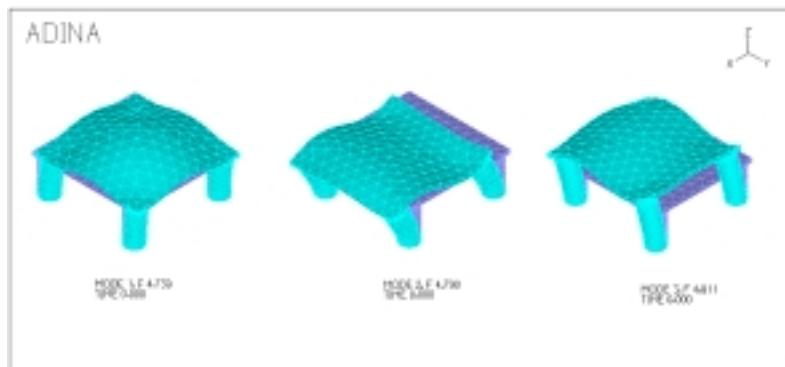


Figura 5. Deformação da Plataforma para seus 3 modos de vibração

Para cada frequência natural está associado um modo de vibração, que se excitado com frequências próximas destas frequências naturais, a estrutura se deformará como apresentado na Fig. (5). As frequências naturais associados aos seus respectivos modos são  $\omega_{n1} = 52.9\text{Hz}$ ,  $\omega_{n2} = 92.77\text{Hz}$  e  $\omega_{n3} = 113.34\text{Hz}$ . Na Figura (6), apresenta-se o espectro da resposta para os três primeiros modos de vibração da coluna da plataforma.

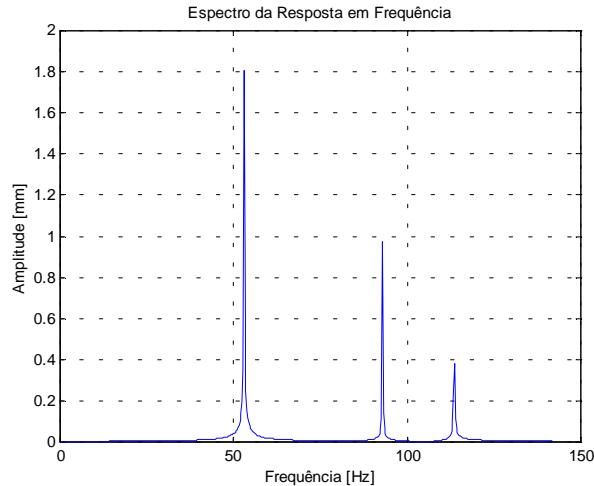


Figura 6: Espectro da resposta

Para uma simulação que apresente resultados confiáveis, simula-se a coluna de sustentação da plataforma com analogia a um sistema de três graus de liberdade. Desta forma os cinco primeiros modos de vibração da plataforma são apresentados na Fig. (7).

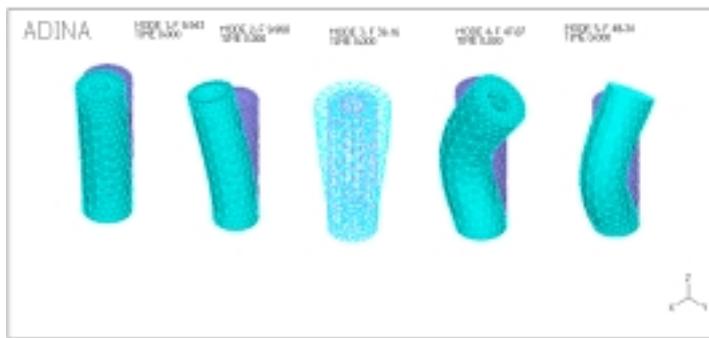


Figura 7. Modos de vibração da coluna da plataforma semi-submersível

Na Figura (8), apresenta-se a configuração de um modelo que representa uma estrutura de coluna de plataforma com três graus de liberdade, onde se considera as propriedades de rigidez e amortecimento da estrutura e a força de impacto das ondas do mar. Em seguida, aplica-se o sinal de onda proposto neste trabalho, com características da interação fluido-estrutura.

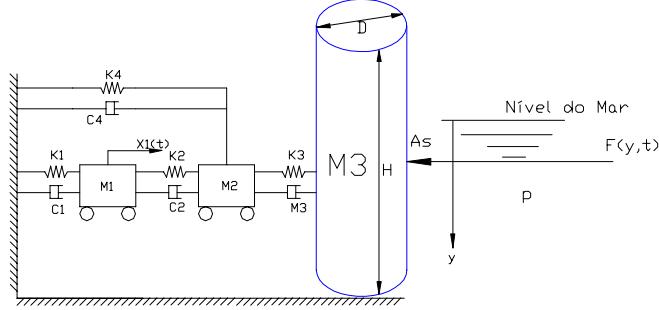


Figura 8. Sistema de três graus de liberdade que representa a coluna da plataforma.

Para a simulação da coluna, deve-se considerar parâmetros que caracterizam a interação fluído–estrutura, como densidade da água do mar, área lateral da coluna, diâmetro da coluna e altura da coluna. Os parâmetros que representam a interação fluído–estrutura são: *Densidade da água do mar*  $\rho_{mar} = 1025 \text{ Kg/m}^3$ , *Área de atuação da água na coluna*  $A_s = 96 \text{ m}^2$ , *Diâmetro da coluna*  $D = 8 \text{ m}$  e *Altura da coluna*  $h = 25 \text{ m}$  de acordo com a Eq. (15).

As Figuras (9) e (10), mostram o sinal de excitação do perfil de onda no domínio do tempo e seu respectivo espectro, a partir da Eq. (15).

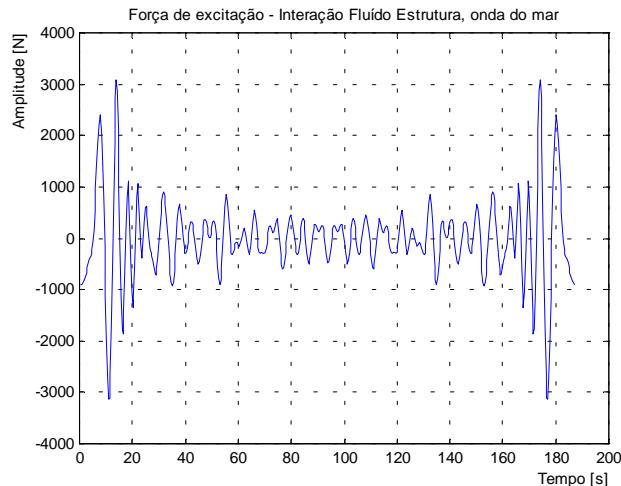


Figura 9. Sinal de excitação.

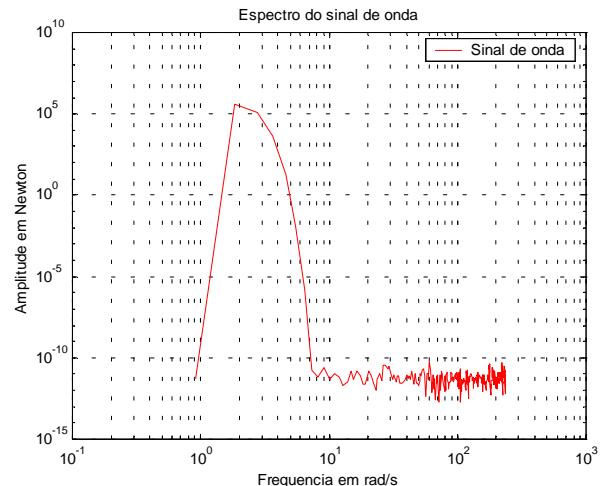


Figura 10. Espectro do sinal de excitação

Observando a Fig. (9), temos o sinal no tempo para o modelo que caracteriza a interação fluído–estrutura e nota-se que o primeiro pico de amplitude do sinal caracteriza o primeiro impacto da onda sobre a estrutura, logo após se repete caracterizando a grande massa de água que se desloca. Esse fenômeno é mais bem observado nos gráficos da Fig. (11), que apresenta o espectro das respostas para as três primeiras frequências naturais da coluna. Na Figura (11), apresenta-se os espectros das respostas para os três modos de vibração para o sistema de três graus de liberdade que caracteriza a interação fluído–estrutura.

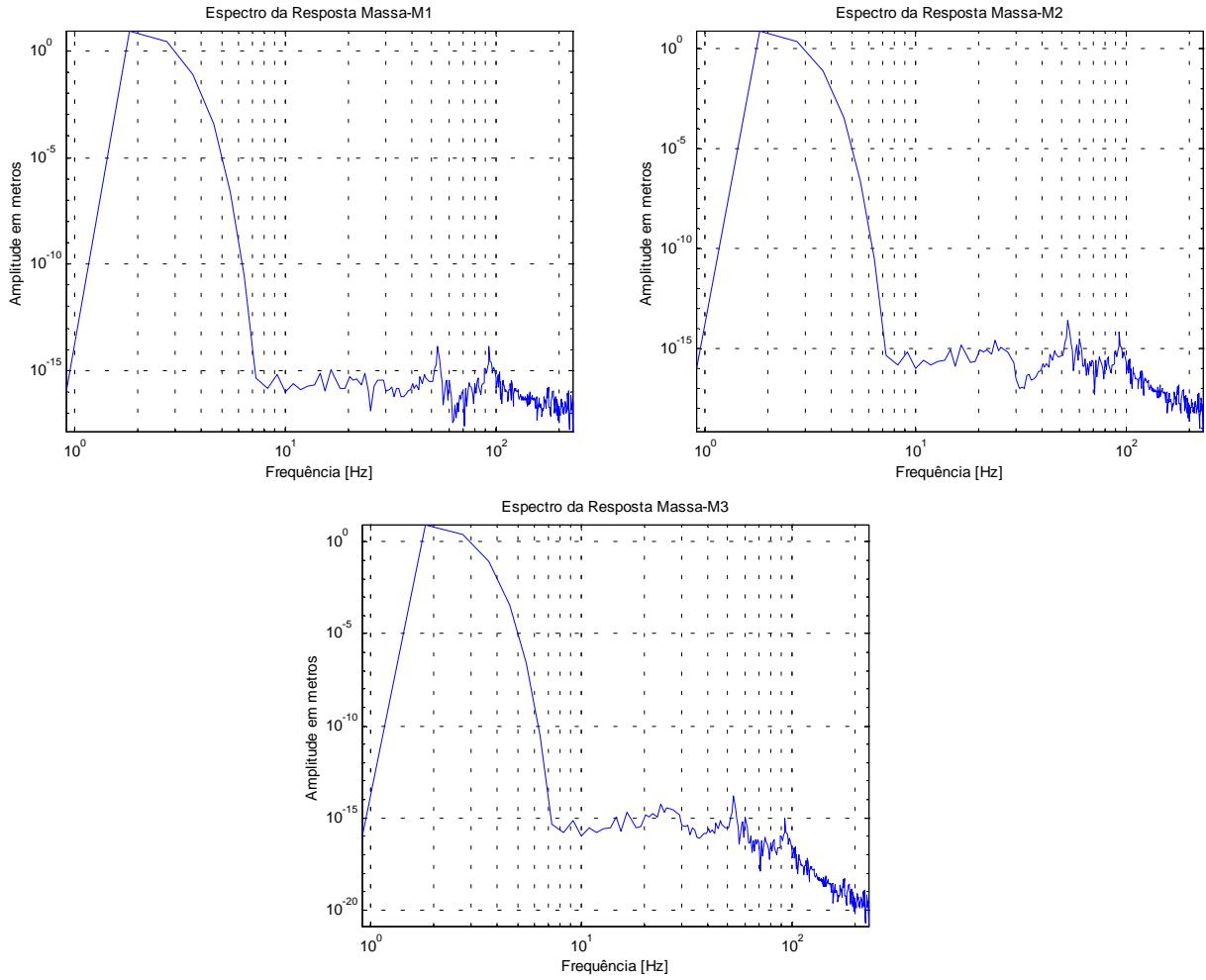


Figura 11. Espectros das respostas em frequência para os três modos de vibração

Para os três modos de vibração apresentados, pode-se ver que as características do fluido estão presentes para os três movimentos da coluna da plataforma. Isto quer dizer que a coluna sofre a excitação das ondas nos seus três modos de vibração com suas respectivas freqüências naturais. O primeiro e maior pico representam o primeiro impacto da onda sobre a estrutura, em seguida os picos referentes as freqüências naturais associadas da coluna são observadas. Isto quer dizer que após o primeiro impacto que contém grande quantidade de energia, a estrutura interage com o fluido (onda).

Para os três movimentos representados pelos três graus de liberdade, ambos apresentam as mesmas características do primeiro impacto da onda. Este impacto gerado e esses movimentos podem causar danos às estruturas dos dutos (riser's) de exploração e produção que estão conectados na base da plataforma até a árvore de natal molhada do poço (fundo do mar).

## 5 CONCLUSÃO

O modelo de onda proposto possui características de interação fluido – estrutura para plataformas marítimas, considerando as suas bases (flutuadores) fixas. Para uma avaliação e teste para se verificar a regularidade dos resultados no processo de geração de malha no ADINA, os resultados se apresentaram consistentes.

O modelo de força de excitação dado pela Eq. (15) que caracteriza a interação fluído–estrutura apresentou resultados coerentes aos impactos das ondas do mar, apresentando uma grande massa de

impacto inicial sobre a coluna. Os resultados apresentaram maiores efeitos das incidências das ondas sobre as colunas na direção X que é a direção em linha com a onda, onde esse movimento pode gerar grandes deslocamentos no topo dos dutos (riser) causando danos a essas estruturas.

## 6. REFERÊNCIAS

- Chang, S. J., Hang, G. D., 1995, "Response of wave excited Offshore Platforms", *Outline of paper to be presented at ASME/JSME Pressure Vessel And Piping Conference, Honolulu, Hawai.*
- Chakrabarti, S. K., 1987, "Hidrodynamics of Offshore Structure", *Computational Mechanics Publications*, Boston.
- Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W., And Schaaf, S. A., 1950, "The Force exerted by surface waves on piles", *Petroleum Transaction, AIME*, Vol. 189, 149-154.
- Oliveira, N. V., 2002, "Anotações Didáticas", Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.
- Rodrigues, M. C., Oliveira, N. V., 2002, "Análise Dinâmica e Simulação de Estruturas de Plataformas Marítimas", In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, João Pessoa, Paraíba.
- Rodrigues, M. C., 2003, "Análise do Comportamento Dinâmico de Plataformas Marítimas sob a ação de excitação de ondas em alto mar", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.
- Sarpkaya, T., And Isaacson, M., 1981,"Mechanics Of Wave Forces On Offshore Structures", Van Nostran Reinhold, New York, N. Y.
- Shroeder, M. R., 1970, "Synthesis Of Low-Peak Factor Signals And Binary Sequences Low Auto-Correlation", *IEEE, Transactions On Information And Theory*, pp. 85-89.
- Vardaro, E., Morooka, C. K., 1991, "Estudo dos Movimentos de uma Plataforma Semi-Submersível através da Simulação no Domínio do Tempo", Dissertação de Mestrado, Unicamp, Sp.

## DYNAMIC ANALYSIS OF MARINE PLATFORMS IN HIGH SEA

**Abstract:** In this work, presents an analysis of the dynamic behavior of marine platforms under the action waves in high sea. Where the environmental effect cause damages on the columns of the platform and under the marine pipes (riser's). For the analysis of the dynamic behavior of the structure, was used the software ADINA 7.5 that works with the finite elements method and the of the modal analysis method (eigenvalues and eigenvectors), obtaining the configurations of the deformations of the column of the platform. The column of the platform is excited with periodic signal that represent the excitement of the wave in high sea and for a signal that characterizes the wave in high sea considering the Interaction Fluid - Structure. The results of the response time and your response spectrum frequency are analyzed for the signals showed. The dynamic analysis of the motions of the platform that are generated by the incidence of the waves in high sea, are great importance in the analysis of structural damages in the marines pipes (riser') connected the marine platform.

**Keywords:** Dynamic analysis, Semi-Submersible Platform, Finite Elements Method, Modal Analysis Method, Riser's.