



ANÁLISE DINÂMICA E SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PLATAFORMAS MARÍTIMAS

Marcelo Cavalcanti Rodrigues

Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, 310-1126, E-Mail: celo_cr@hotmail.com

Natanael Victor de Oliveira

Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, 310-1126, E-Mail: natanael@dem.ufpb.br

***Resumo:** Neste trabalho, procura-se analisar e simular o comportamento dinâmico de estruturas de plataformas marítimas, conhecendo seus parâmetros modais (modos de vibração e frequência natural) para monitorar possíveis falhas causadas por esforços ambientais do tipo ondas do mar. A análise dos parâmetros são de extrema importância para projeto e concepção dessas estruturas, pois tais estruturas são de alto custo e complexidade. Plataformas semi-submersíveis são estruturas de grande porte que possuem movimentos horizontais limitados por um sistema de ancoragem e dutos, esses movimentos são gerados por forças de excitação ambientais como, onda, vento e correnteza. Apresenta-se simulações de um modelo de plataforma semi-submersível realizada no software ADINA 7.5 que utiliza o Método dos Elementos Finitos. Apresenta-se a formulação matemática de uma onda do mar de forma mais simples e uma formulação matemática alternativa para ondas aleatórias. Apresenta-se a análise de autovalores e autovetores para a plataforma e em seguir são aplicadas cargas periódicas distribuída sobre a coluna da plataforma para obter resultados dinâmicos.*

***Palavras-Chave:** Plataforma semi-submersível, Ondas do mar, Elementos Finitos;*

1. INTRODUÇÃO

A análise e simulação prévia do comportamento dinâmico de sistemas mecânicos e estruturas em geral na engenharia, se constituem num processo ou procedimento inevitáveis, como meio de monitorar a performance antecipada de aproximação do comportamento global de sistemas mecânicos e/ou estruturas reais. A utilização de sistemas computacionais altamente potentes nas últimas duas décadas é a possibilidade mais realística deste fato. Mais especificamente na engenharia mecânica, principalmente em simulação de sistema mecânicos, procura-se abordar o monitoramento, análise, processamento de sinais e controle de vibrações, controle de trajetórias de robôs manipuladores, identificação de parâmetros, modelamento de rotores de usinas hidroelétrica e dinâmica de rotores e estruturas em geral, para não citar outros tipos de sistemas. A simulação prévia do comportamento dinâmico de sistemas mecânicos em termos do vetor de estado ou dos vetores no domínio da frequência, antecede a uma etapa nos processos de identificação de forças em geral.

A indústria do petróleo utiliza estruturas marítimas (plataformas fixas, semi-submersíveis, oleodutos e navios) para perfuração e produção de óleo e gás. Existe o problema de impacto dos

fenômenos ambientais de vento, correnteza e ondas que atuam sobre essas estruturas. Essas estruturas devem suportar os carregamentos ambientais durante toda a vida útil para que possíveis modificações de projeto posteriores possam ser evitadas, pois são de alto custo. O comportamento de estruturas pode ser estimado através de uma boa previsão dos efeitos de carregamentos ambientais. Entre os carregamentos dinâmicos ambientais (ondas, vento e correnteza), o efeito das ondas é de especial importância devido as suas fortes características dinâmicas (Yokoo, 1990). As ondulações da água são responsáveis por uma parcela significativa das forças atuantes sobre uma estrutura marítima (Patel, 1989). Os carregamentos de ondas sobre as estruturas marítimas atingem a estrutura em apenas uma direção a cada instante. Esta hipótese pode ser razoável em locais de pouca profundidade, onde o fluxo d'água no fundo do mar interfere no escoamento, mas em locais de alta profundidade, como no caso de plataformas semi-submersíveis, o fluxo d'água no fundo do mar não interfere no escoamento sobre a plataforma. A distribuição da energia gerada pelas as ondas do mar em torno das colunas da plataforma, excitando em várias direções, provocará uma distribuição direcional de ondas (Yokoo, 1990). Para análise do comportamento dinâmico de estruturas de plataformas e dutos marítimos, é importante conhecer os parâmetros modais (modos de vibração e autovalores) para se poder monitorar as estruturas quanto à existência de falhas e defeitos causados por esforços e/ou fontes de excitações externas oriundas do meio ambiente. Neste trabalho, utiliza-se o software ADINA 7.5 (*Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis*), como ferramenta para modelar o protótipo da estrutura da plataforma semi-submersível idealizada.

2. FORMULAÇÕES MATEMÁTICAS DE FORÇAS DE EXCITAÇÃO

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 cossenoidal, dada pela Eq. (1).

$$\mathbf{h}(t) = (H/2) \cdot \cos(\mathbf{w}t) \quad (1)$$

onde $H/2$ é a amplitude da onda e \mathbf{w} a frequência de excitação.

Um modelo alternativo de uma fonte de excitação (força), que poderá ser utilizada para agir na estrutura, é sugerida na forma da Eq. (2).

$$\mathbf{h}(t) = \sum_{n=1}^N \mathbf{b}_n \cdot \cos(n\mathbf{w}t) \quad (2)$$

onde \mathbf{b}_n é dado pela Eq. (3)

$$\mathbf{b}_n = H/2 \cdot \left\{ 1 - 2 \left[\frac{\mathbf{f}_n}{\mathbf{p}} \right] \right\} \quad (3)$$

e \mathbf{f}_n dado pela Eq. (4),

$$\mathbf{f}_n = 1 - \mathbf{p} \left[\frac{n^2}{2N} \right] \Rightarrow \mathbf{f}_n = \frac{H}{2} \left[1 - \mathbf{p} \left(\frac{n^2}{2N} \right) \right] \quad (4)$$

onde o ângulo de fase, f_n , varia entre (0 e π) e b_n , que se constitui numa série temporal assumindo valores $H/2$ e $-H/2$ (Shroeder, 1970 e Oliveira, 1997).

Este sinal possui um espectro de banda larga em frequência do tipo ruído branco, porém, com as vantagens de ser um sinal periódico. Algumas vantagens de utilizar este sinal são:

- É um sinal com alto conteúdo frequencial (de banda larga em frequência) do tipo ruído branco, onde a faixa de frequência pode ser pré-estabelecida;
- Possui a vantagem de ser periódico;
- Pode-se garantir excitação persistente no sistema e a energia contida no sinal será de forma distribuída;

Na Figura (1), apresenta-se o sinal do perfil de onda proposto e o seu respectivo espectro.

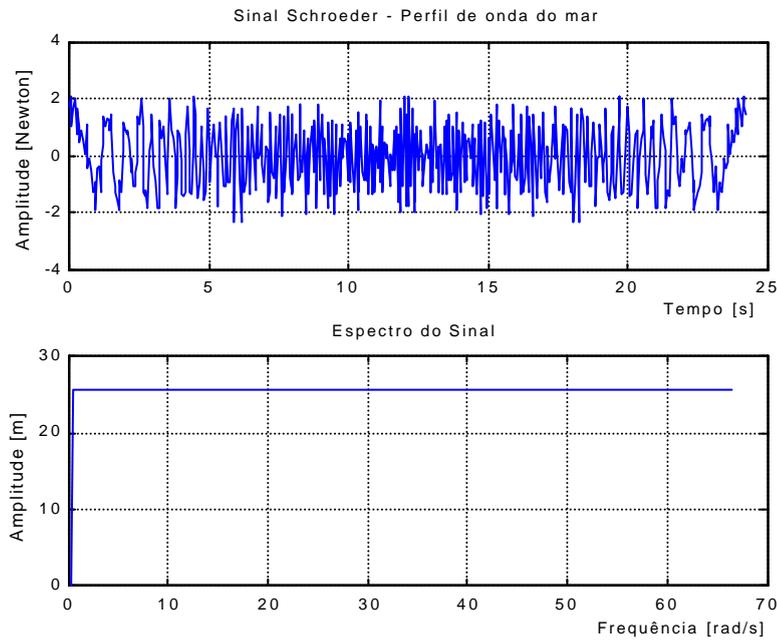


Figura 1. Sinal do perfil de onda proposto e seu espectro.

Na verdade, a determinação das forças das ondas que interage sobre a estrutura de uma plataforma semi-submersível, não é uma tarefa fácil, pois envolve complexidade de interações entre ondas e estrutura, i.é, por se tratar de um problema de interação fluido – estrutura. Dependendo do tipo de estrutura, diferentes formulações podem ser aplicadas baseando-se no tamanho dos membros estruturais, na altura e no comprimento da onda. Estes parâmetros podem ser escritos na forma de duas relações: diâmetro do membro estrutural e comprimento de onda (D/I); altura da onda e diâmetro do membro estrutural (H/D).

Algumas formulações para estimar as forças de onda, que podem ser citadas: *Equação de Morison*, *Teoria de Froude-Krylov* e *Teoria da Difração*.

Para membros estruturais pequenos ($D/I < 0,2$), a equação de Morison é utilizada, onde relaciona a soma da força viscosa proporcional à velocidade do fluido e a força de inércia proporcional à aceleração da onda, (Patel, 1989), dada por,

$$F_T = \int_L \mathbf{r} C_M A_s \dot{u} ds + \int_L \frac{1}{2} \mathbf{r} C_D D u |u| ds \tag{5}$$

onde F_T é a força hidrodinâmica total; $C_M = 1 + k_M$ e k_M - coeficiente de massa da seção; ρ - densidade da água; C_D - coeficiente de arrasto; D - diâmetro característico do membro; A_S - área da seção transversal do membro; \dot{u} - a derivada em relação ao tempo de $\partial u / \partial t$ e L - comprimento do membro.

Utilizando a aproximação da profundidade da teoria linear da onda, (Sarpkaya and Isaacson, 1981), a aceleração da partícula da água pode ser expressa por,

$$\ddot{u}(y, t) = - \sum_{i=1}^n \exp(-\mathbf{w}_i^2 \cdot y / g) \cdot \mathbf{w}_i^2 \cdot a_i \cdot \text{sen}(\mathbf{w}_i t - \mathbf{q}_i) \quad (6)$$

onde: g - aceleração da gravidade, \mathbf{w}_i - frequência (rad/s), a_i - amplitude de deslocamento correspondente a a_i , \mathbf{q}_i - ângulo de fase entre 0 e 2π .

Em geral, a equação de Morison é aplicada quando a força viscosa é significativa, o que geralmente ocorre quando a estrutura é pequena em relação ao comprimento da onda (Yokoo, 1990).

Quando a força viscosa é pequena, mas a estrutura ainda é relativamente pequena, a teoria de Froude-Krylov pode ser aplicada. A força é calculada através da integração da pressão da onda incidente na superfície da estrutura (Yokoo, 1990).

Para grandes estruturas com valores de $(D/L > 0,2)$, aplica-se a teoria de difração, por se considerar no modelo a reflexão e a radiação das ondas. Neste caso, não se considera a força viscosa.

A razão H/D tem importância baseada no fato de que as forças de atrito em estruturas em fluxo de ondas aleatórias são dominadas pela separação do fluxo em torno da estrutura com formação de vórtices. Para pequenos valores da relação $H/D < 1,5$, não há separação em desenvolvimento de vórtices. Neste caso, as forças de atrito são pequenas, com a predominância das forças de inércia, então, a teoria de difração pode ser usada. Para valores da relação $H/D > 8,0$, há formação de vórtices, então, as forças viscosas são grandes e a equação de Morison pode ser aplicada (Yokoo, 1990).

Para valores da relação H/D no intervalo de variação de $1,5 < H/D < 8,0$, o regime de fluxo é muito complexo e de difícil determinação, (Yokoo, 1990).

3. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DA PLATAFORMA SEMI-SUBMERSÍVEL

Para o processo de simulação, utiliza-se em principio os dados e/ou parâmetros sobre uma plataforma semi-submersível obtidos da literatura, (Vardaro, 1991). Na Tabela 1, são apresentadas as dimensões da estrutura da Plataforma semi-submersível e do Duto.

Tabela 1. Dimensões da estrutura (Plataforma semi-submersível e Duto)

DIMENSÕES DA ESTRUTURA	
Convés	80,0x80,0 (m)
Altura das Colunas	25,0 (m)
Diâmetro das Colunas	8,0 (m)
Comprimento dos Flutuadores	115,0 (m)
Altura dos Flutuadores	8,0 (m)
Largura dos Flutuadores	15,0 (m)
Boca do convés	75,0 (m)
Comprimento do Duto	5,0 (m)
Diâmetro do Duto	25,4 cm (10")

Espessura da parede do Duto	1,0 cm
-----------------------------	--------

Apresenta-se as propriedades do material utilizado na Tab (2).

Tabela 2. Característica do material.

PROPRIEDADES DO MATERIAL	
Módulo de Elasticidade	$2,07 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson	0,29
Densidade	$7,86 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$

3.1 Plataforma Semi-Submersível

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. O modelo foi construído numa escala de 1:1000 para diminuir o tempo de processamento da maquina. Na Figura (2), apresenta-se o modelo da plataforma semi-submersível.

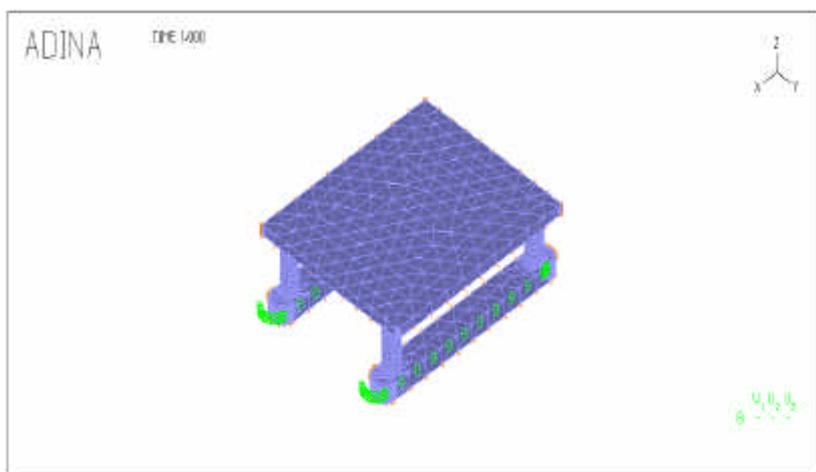


Figura 2. Modelo da plataforma semi-submersível

Na resposta da simulação, apresenta-se os parâmetros modais: modos de vibração e suas respectivas frequências naturais. Considerando os flutuadores fixos a deformações, apresenta-se na Fig.(3), a resposta da simulação da plataforma semi-submersível.

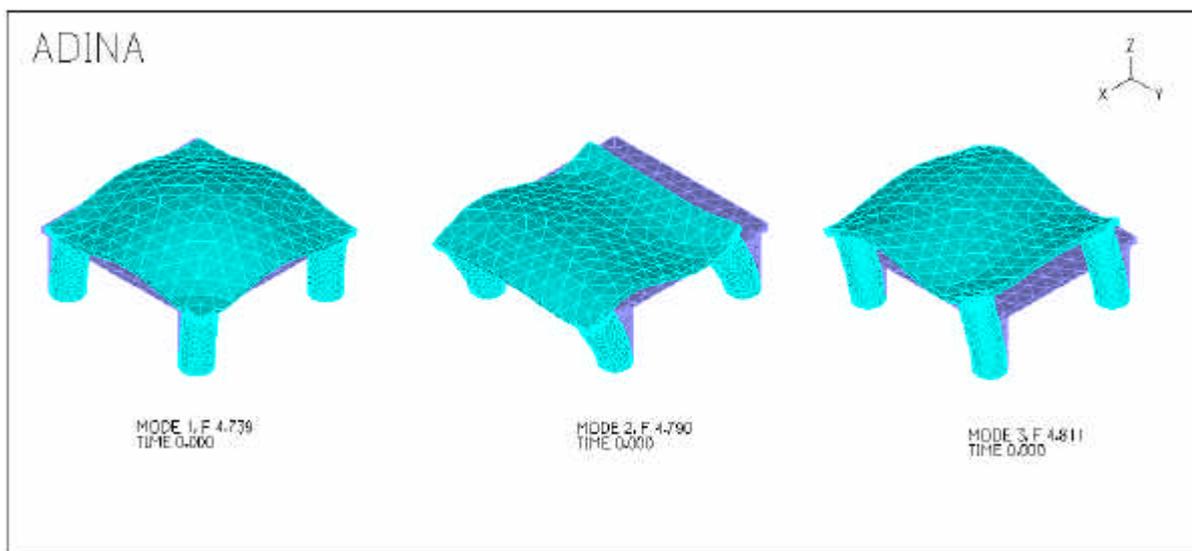


Figura 3. Modos de vibração (Autovetores)

A identificação dos parâmetros modais possibilita conhecer as possíveis deformações causadas por excitações externas. A importância de conhecer os parâmetros modais é que pode-se conhecer a sensibilidade da estrutura quanto a presença de excitações externas, defeitos e falhas na estrutura.

Apresenta-se na Tab. (3), as frequências naturais da estrutura correspondente a cada modo de vibração.

Tabela 3. Frequências naturais do modelo da plataforma semi-submersível.

ADINA: AUI version 7.5.0, 17 April 2002: Licensed from ADINA R&D, Inc. Finite element program ADINA, response range type mode-shape: Listing for zone WHOLE_MODEL:	
MODE	
NUMBER	FREQUENCY (Hz)
1	1.66424E+01
2	3.32770E+01
3	1.04248E+02

É importante mostrar o espectro do sistema relativo as três primeiras frequências naturais do sistema. Na Fig. (4), apresenta-se o espectro do sistema.

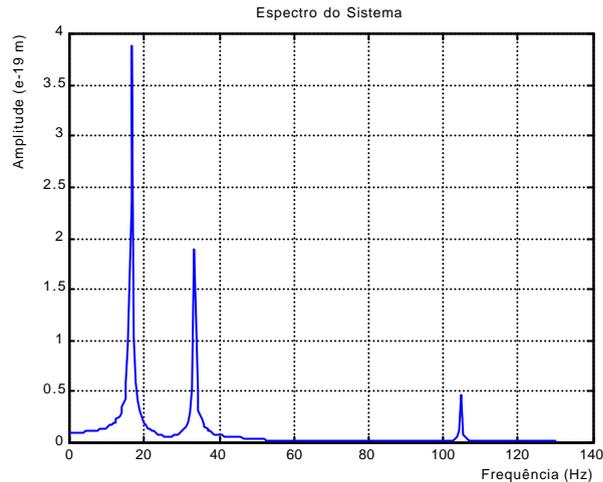


Figura 4. Espectro do sistema relativo as três primeiras frequências naturais.

3.2 Coluna da Plataforma Semi-submersível

Nesta simulação, considera-se uma coluna da Plataforma Semi-submersível, submetida à excitação externa devido às ondas do mar. A Figura (5), apresenta a configuração esquemática do sistema constituído pelo modelo da plataforma semi-submersível. A coluna é simulada com uma excitação periódica distribuída do tipo senoidal. Segundo (Chakrabarti, 1987) a forma mais simples de representar uma onda do mar para simulação computacional é uma onda senoidal.

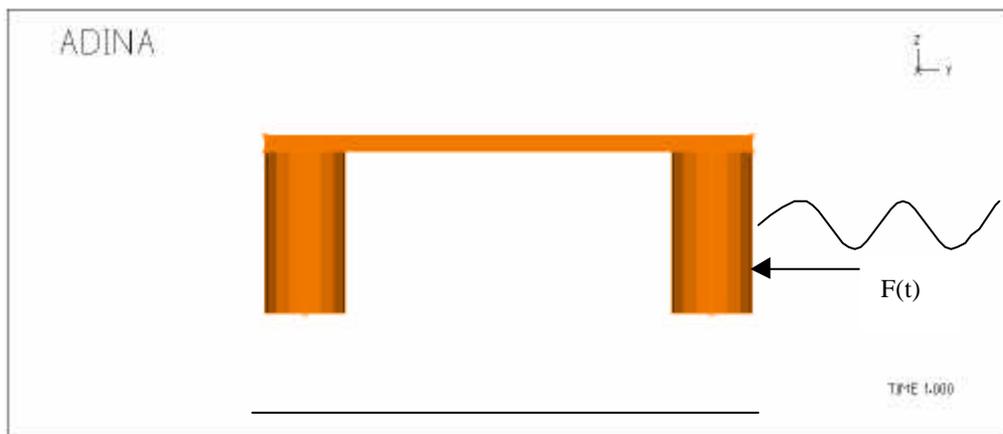


Figura 5. Modelo de Plataforma Semi-Submersível submetida a excitações externas das ondas do mar

- **Excitação Periódica**

A excitação periódica aplicada é do tipo senoidal $1000\text{sen}(\omega t)$, onde $\omega = 2\pi f$, com uma frequência $\omega = 50\text{Hz}$ e que está numa faixa de frequência de $0 \leq f \leq 250\text{Hz}$.

Na simulação da Coluna, aplica-se uma excitação periódica distribuída ao longo de todo o seu comprimento, como está esquematizada na Fig. (6).

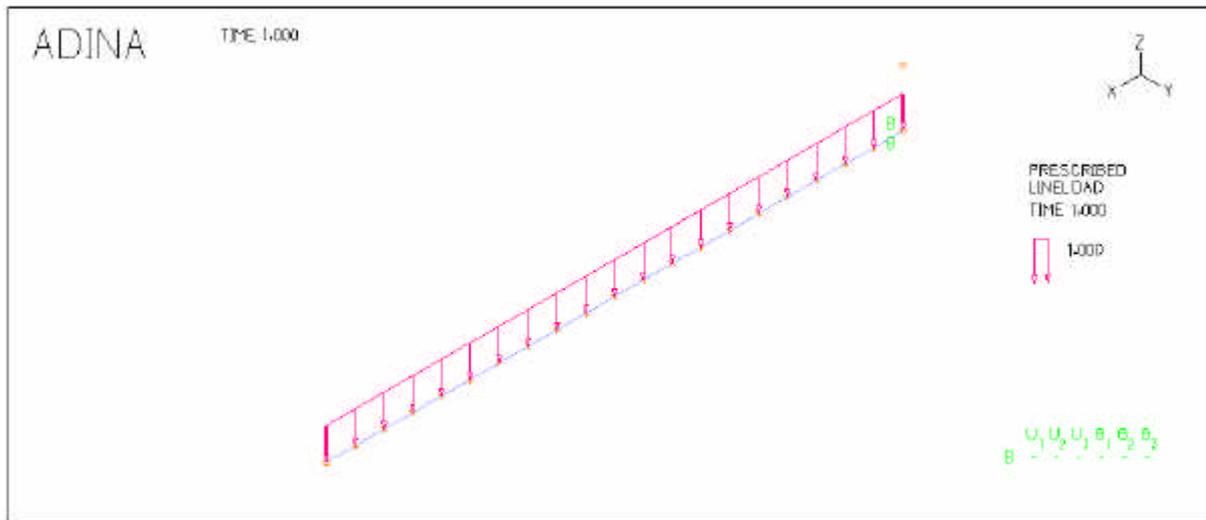


Figura 6. Modelo da Coluna da Plataforma para simulação com excitação periódica distribuída.

O sinal de resposta no tempo para a coluna, submetida à excitação periódica distribuída é apresentada na Fig (7), onde o sinal de saída representa um sinal periódico. O gráfico abaixo apresenta amplitude de deslocamento da coluna no eixo Z em metros em função do tempo.

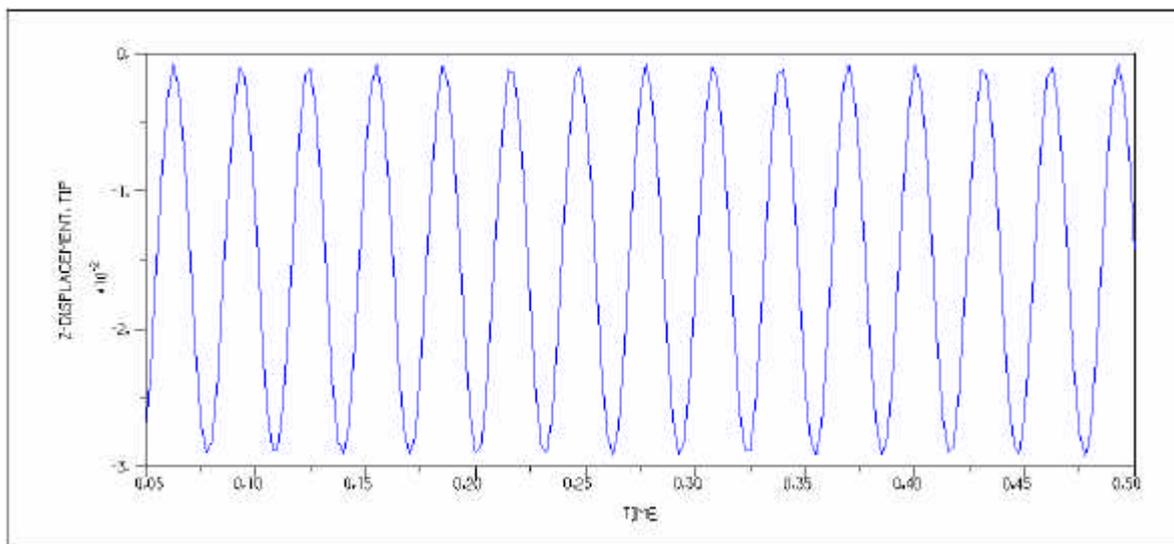


Figura 7. Resposta em deslocamento para a coluna submetida à excitação periódica.

3.3 Discussões

Para análise em laboratório, a simulação computacional faz-se necessário, pois é um método de menor custo, maior rapidez e eficiência que métodos experimentais, pois esses métodos requerem mais equipamentos de precisão, que são de alto custo. Pode-se assim, com simulações computacionais projetar estruturas de grande porte que são submetidas a esforços ambientais sem que posteriormente a estrutura necessite de modificações de projeto, e podendo assim prever possíveis falhas e defeitos existentes na estrutura.

A aplicação da excitação que representa uma onda do mar sobre a coluna da plataforma, desconsiderando efeitos do vento e da correnteza, possibilita conhecer as amplitudes de deslocamento

da estrutura em torno em torno do seu equilíbrio, e que esses deslocamentos estejam dentro dos limites úteis de projeto da estrutura, tendo a fonte de excitação atuante numa área espectral distante das frequências naturais.

4. CONCLUSÃO

Apresentou-se, neste trabalho uma análise do comportamento dinâmico de estruturas de plataforma marítima sob excitação de fontes ambientais, como ondas em alto mar. Os cálculos dos parâmetros modais (modos de vibração e frequência natural), são importantes para monitoramento da estrutura e indicadores de falhas e defeitos. Conhecer tais parâmetros pode-se avaliar a vida útil de uma estrutura quando submetida a esforços cíclicos ambientais como ondas, vento e correnteza. As curvas de resposta em deslocamento para o modelo da plataforma foram obtidas assim como o seu espectro de frequência. Toda a simulação foi desenvolvida no software ADINA 7.5 que possui técnicas e métodos desenvolvidos como o Método dos Elementos Finitos.

A aplicação de uma carga periódica sobre uma coluna da plataforma semi-submersível, foi desenvolvida como o objetivo de proporcionar experimentos e simulações quanto aos deslocamentos sofridos por essas estruturas quando submetidas a esforços ambientais, em especial as ondas do mar. Uma formulação matemática de um modelo de onda do mar foi proposta, porém suas simulações estão em fase de desenvolvimento.

5. AGRADECIMENTOS

- A ANP (Agência Nacional de Petróleo), pelo apoio financeiro e incentivo tecnológico.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ADINA 7.5, 2000, "Theory and Modeling Guide", Volume I, ADINA R&D, Inc.
- Chakrabarti, S. K., 1987, "Hydrodynamics of Offshore Structure", Computational Mechanics Publications, Boston.
- Hasselman, D. E., Dunckel, M., e Ewing, J. A., 1973 "Directional Wave Spectra Observed During JONSWAP 1973", Journal Physics Oceanography, 8, pp 1264-1280.
- Huebner, K. H., Thornton, E. A., 1982, "The Finite Element Method for Engineer", second edition, JOHN WILEY & SONS, New York, USA.
- Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W., and Schaaf, S. A, 1950, The Force Exerted by Surface Waves on piles, Petroleum Transactions, AIME, Vol. 189, 149-154.
- Oliveira, N. V., 1997, "Conjunção de um Critério Utilizando o Teorema de Nyquist para Simulação Dinâmica de Sistemas", XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, SP, Brasil.
- Patel, M. H., 1989, "Dynamics of Offshore Structures", Butterworths and Co. LTD, London.
- Sarpkaya, T., and Isaacson, M., 1981, Mechanics of Wave Force on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold, New York.
- 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.
- Yokoo, I. H., Morooka, C. K., 1990, "Movimentos de Plataformas Petrolíferas Flutuantes em ondas direcionais", Dissertação de Mestrado, UNICAMP, SP.

DYNAMIC ANALYSIS AND SIMULATION OF STRUCTURES OF PLATFORMS

Abstract. *In this work, it tries to analyze and to previously simulate the dynamic behavior of structures of semi-submersible platforms, knowing your modal parameters (mode shapes and natural frequency) to monitor possible flaws caused by environmental efforts of the type waves of the sea. The evaluation of those parameters is of extreme importance for project and conception of those structures, because such structures are of high cost and complexity. Semi-submersible platforms are structures of great load that possess limited horizontal movements for an anchorage system and pipes, those movements are generated by environmental forces as, wave, wind and current. It comes simulations of models of semi-submersible platform obtain in the software ADINA 7.5 that uses the Finite Elements Method show the mathematical formulation of a wave of the sea in a simpler way and an alternative mathematical formulation for random waves. It comes the eigenvector and eigenvalue analysis for the platform and in proceeding they were applied distributed periodic load on column, to obtain dynamic results.*

Keywords. *Semi-submersible Platform, Pipes, Finites Elements;*