

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

**Análise do Comportamento Dinâmico de
Plataformas Marítimas sob a ação de
Excitação de Ondas em Alto Mar**

**Autor: Marcelo Cavalcanti Rodrigues
Orientador: Natanael Victor de Oliveira
Co-Orientador: Antônio Almeida Silva**

Campina Grande, fevereiro de 2003

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

**Análise do Comportamento Dinâmico de
Plataformas Marítimas sob a ação de
Excitação de Ondas em Alto Mar**

**Autor: Marcelo Cavalcanti Rodrigues
Orientador: Natanael Victor de Oliveira
Co-Orientador: Antônio Almeida Silva**

**Curso: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Área de Mecânica dos Sólidos**

Trabalho de Dissertação de Mestrado, apresentada, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

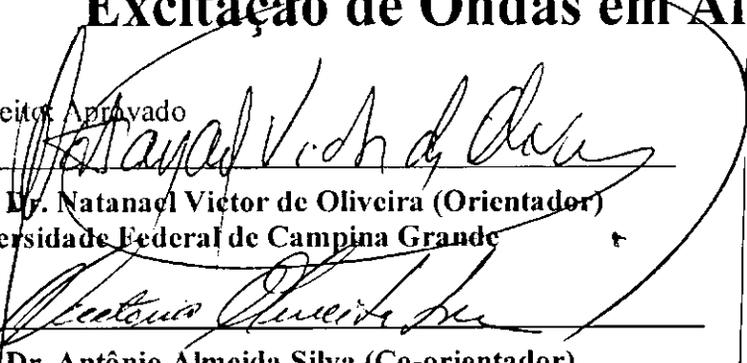
Campina Grande, fevereiro de 2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Análise do Comportamento Dinâmico de
Plataformas Marítimas sob a ação de
Excitação de Ondas em Alto Mar

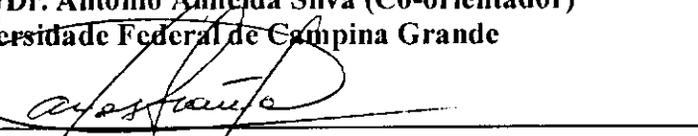
Conceito: Aprovado



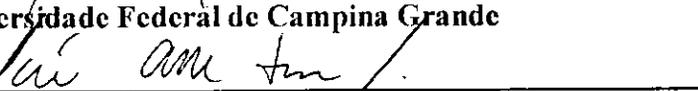
Prof. Dr. Natanael Victor de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. Antônio Almeida Silva (Co-orientador)
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. Carlos José de Araújo (membro interno)
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. José Alfredo Ferrari Júnior (membro externo)
Petrobras

Campina Grande, 21 de fevereiro de 2003.
PB - Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por me dar forças e vida.

A minha mãe MARIA DE FÁTIMA CAVALCANTI RODRIGUES, pelo inestimável apoio em toda minha vida.

A minha irmã e meu pai por estarem do meu lado nos momentos mais difíceis.

Aos meus tios, Maria Izabel e Homero pela contribuição acadêmica e intelectual.

Ao Prof. Dr. NATANAEL VICTOR DE OLIVEIRA, pela orientação inteligente, pela amizade sincera, pela dedicação e paciência, e pelo incentivo de alcançar os meus objetivos.

A ANP (Agência Nacional de Petróleo), pelo apoio financeiro concedido durante este curso.

Ao Curso de PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, nas pessoas de seu Coordenador e Co-Orientador, Prof. Dr. ANTÔNIO ALMEIDA, Vice-Coordenador e demais professores membros e a sua secretária LÚCIA MÁRCIA DONATO QUIRINO, pelo total apoio.

Aos colegas de Curso de Pós-Graduação, Lúcio, Marcos, Irã, Brauner, Cícero, Alberdan, Kleber Eduardo e Cléa pelo incentivo.

Aos demais que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
1.1	Introdução Geral	1
1.2	Exploração Marítima	2
1.3	Plataformas “ Offshore” Marítimas (Perfuração e Produção)	5
1.4	Tipos de Plataformas Offshore	6
1.5	Produção Marítima Brasileira	10
1.6	Plataformas Semi-Submersíveis da Bacia de Campos	13
1.7	Objetivo do Trabalho	16
1.8	Descrição do Trabalho	17
2.	Revisão Bibliográfica	18
2.1	Introdução	18
2.2	Comportamento Dinâmico	18
2.3	Conclusão	25
3.	Formulação Matemática da Fonte de Excitação: Onda do mar	26
3.1	Introdução	26
3.2	Modelo Proposto da Formulação Matemática do Perfil de Onda do Mar para Simulação	28
3.2.1	Modelo Proposto da Força Interação Fluido – Estrutura	32
3.3	Outras Modelos matemáticos	35
3.4	Conclusão	39
4.	Simulação	40
4.1	Introdução	40
4.2	Simulação no “ Software” de Elementos Finitos (ADINA)	40
4.3	Problemas de Autovalores e Análise Dinâmica	43
4.3.1	Problemas de Autovalores	43
4.3.2	Análise Dinâmica	43
4.3.3	Autovalores e Autovetores para uma viga bi-engastada	44
4.3.3.1	Cálculo dos Autovalores: Solução Exata e Numérica	45
4.4	Análise no Domínio da Frequência (ADINA 7.5)	52
4.5	Simulação e Modelagem a Plataforma Semi-Submersível	54

4.6 Conclusão	56
5. Resultados e Discussões	57
5.1 Introdução	57
5.2 Identificação dos Parâmetros Modais	58
5.2.1 Variação no diâmetro da coluna da Plataforma	61
5.2.2 Força de Excitação de Impacto e Modelo Proposto	64
5.2.2.1 Excitação de Impacto – Impulsional: atuando na coluna de 8 metros de diâmetro	65
5.2.2.2 Aplicação do modelo de onda do mar proposto	67
5.2.2.3 Aplicação do modelo de onda considerando Interação Fluido – Estrutura	69
5.3 Conclusão	75
6. Conclusão	76
6.1 Introdução	76
6.2 Conclusões	76
6.3 Sugestões	77
Referências Bibliográficas	78
Anexos	

RESUMO

RODRIGUES, Marcelo Cavalcanti, "*Análise do Comportamento Dinâmico de Plataformas Marítimas sob a ação de Excitação de Ondas em Alto Mar*", Universidade Federal de Campina Grande, 2003, Dissertação (Mestrado).

Este trabalho de dissertação de mestrado apresenta uma introdução ao processo de prospecção e exploração de petróleo, assim como o sistema de operação existente. Como objetivo principal aqui apresentado é enfatizar uma estrutura marítima de grande porte denominada de Plataforma Marítima Semi-submersível, que é uma das grandes tecnologias existentes na exploração do petróleo no Brasil e no mundo. Essas plataformas sofrem em suas estruturas excitações e/ou perturbações provenientes do meio ambiente como vento, correnteza e onda do mar. Um efeito ambiental mais considerado como causadora de danos a essas estruturas é a excitação proveniente das ondas em alto mar. Essa estrutura é analisada em termos do seu comportamento dinâmico. A simulação computacional é desenvolvida num programa que utiliza o método dos Elementos Finitos. Os parâmetros modais (frequência natural e modo de vibração) são calculados e obtidos assim como as configurações esquemáticas de deformação da coluna da plataforma. Excita-se o sistema com sinais periódicos e aleatórios que representam a excitação da onda do mar e a interação fluido – estrutura e obtém-se os gráficos de espectro em frequência. Portanto, conclui-se que pode-se simular e analisar tais estruturas de grande porte, dando suporte a monitoramento dessas estruturas.

Palavras-Chave:

Comportamento Dinâmico, Plataforma Semi-Submersível, Elementos Finitos, Ondas do mar

ABSTRACT

RODRIGUES, Marcelo Cavalcanti, "*Analysis of the Dynamic Behavior of Platforms under the action of Excitement of Waves in High Sea*", Federal University of Campina Grande, 2003, Dissertation (Master's degree).

This work of master's degree dissertation presents an introduction to the search process and exploration of petroleum, as well as the system of existent operation. As main objective here presented it is to emphasize a marine structure of great load denominated of Semi-submersible Marine Platform, that is one of the great existent technologies in the exploration of the petroleum in Brazil and in the world. Those platforms suffer in your structures excitements and disturbances of the environment as wind, current and sea wave. An environmental effect more considered as induced of damages those structures it is the originating from excitement the waves in high sea. That structure is analyzed in terms of your dynamic behavior. The computation simulation was developed in a program that uses the method of the Finite Elements. The modal parameters (natural frequency and mode shapes) they are calculated and obtained as well as the schematic configurations of deformation of the column of the platform. It gets excited the system with periodic and random signs that represent the excitement of the wave of the sea and obtained the spectrum graphs in frequency. Therefore, it is ended that can be simulated and to analyze such structures of great load, giving support the control of those structures.

Key - Word:

Dynamic Behavior, Semi-Submersible Platform, Finite Elements, Sea Wave.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Participação na Matriz Energética Brasileira em 1997 (Fonte: ANP 2000)	3
Figura 1.2 – Torre de perfuração em terra e cavalo-de-pau	6
Figura 1.3 – Plataforma fixa de perfuração e produção	7
Figura 1.4 – Plataforma Auto-Elevável Jack up (Jaqueta)	8
Figura 1.5 – Plataforma semi-submersível (P-18 e P-36)	9
Figura 1.6 – <i>Jack up</i> tender ao lado de plataforma fixa (PT 3 – OPL Itapoá) e <i>navio-tênder</i> ao lado de plataforma fixa (NT 07 Seadrill 10)	10
Figura 1.7 – Plataformas atuantes na costa brasileira.	11
Figura 1.8 – Plataforma semi-submersível da Bacia de Campos – RJ	13
Figura 1.9 – Plataforma P-36	16
Figura 3.1 - Sinal do perfil de onda proposto e seu espectro.	30
Figura 3.2 – Força de Excitação Interação Fluido – Estrutura	33
Figura 3.3 – Sinal do estado do mar aleatório	38
Figura 4.1 – Ambiente de simulação do ADINA-AUI	40
Figura 4.2 – Ambiente de plotagem dos resultados ADINA-PLOT.	41
Figura 4.3 – Viga discretizada com 4 elementos	44
Figura 4.4 – Modelo de viga construído no ADINA 7.5 considerando quatro elementos de discretização	49
Figura 4.5 – Modos de vibração da viga bi-engastada	50
Figura 4.6 – Modelagem da Plataforma Semi-submersível	54
Figura 4.7 – Modelagem da coluna da Plataforma Semi-submersível sob excitação	55
Figura 5.1 – Modos de vibração da plataforma semi-submersível	58
Figura 5.2 – Espectro da resposta em frequência	59
Figura 5.3 – Espectro da resposta em frequência para as três primeiras frequências naturais $d = 10m$	61
Figura 5.4 – Espectro da resposta em frequência para as três primeiras frequências naturais $d = 12m$	62
Figura 5.5 – Gráfico que relaciona as frequências naturais e seus respectivos modos e vibração com a variação do diâmetro da coluna da plataforma	63

Figura 5.6 – Configuração dos modos de vibração da coluna da plataforma semi-submersível	64
Figura 5.7 – Resposta em deslocamento e seus respectivos espectros	65
Figura 5.8 – Espectro do sinal de onda proposto	67
Figura 5.9 – Espectro da resposta da coluna para excitação da onda do mar	67
Figura 5.10 – Modelo Físico do sistema genérico	69
Figura 5.11 – Espectro das respostas para os três modos de vibração, sistema mecânico genérico de três graus de liberdade	70
Figura 5.12 – Sistema de três graus de liberdade para a coluna	71
Figura 5.13 – Sinal no tempo da onda	72
Figura 5.14 – Espectro do sinal da onda	72
Figura 5.15 – Espectro das respostas em frequência para os três modos de vibração	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Dados sobre a PETROBRAS	4
Tabela 4.1 – Parâmetros da viga	44
Tabela 4.2 – Frequências Naturais: Solução exata	49
Tabela 4.3 – Frequências Naturais para a viga bi-engastada	50
Tabela 4.4 – Frequências Naturais: Solução Exata x Método dos Elementos Finitos	51
Tabela 4.5 - Dimensões da estrutura (Plataforma semi-submersível)	53
Tabela 4.6 - Característica do material.	53
Tabela 5.1 – Frequências naturais da plataforma semi-submersível	58
Tabela 5.2 – Frequências naturais da plataforma semi-submersível para diâmetro $d= 10m$.	60
Tabela 5.3 – Frequências naturais da plataforma semi-submersível para diâmetro $d= 12m$.	62
Tabela 5.4 – Parâmetros que caracterizam a Interação Fluido – Estrutura	71

NOMENCLATURA

$\ddot{u}(y, t)$	Aceleração da partícula da água na direção horizontal
H/D	Altura da Onda por Diâmetro da estrutura
ξ_i	Amortecimento Crítico
a_i	Amplitude de Deslocamento
$H/2$	Amplitude da Onda
A_s	Área da seção transversal da Coluna
θ_i	Ângulo de fase
θ_n	Ângulo de fase das harmônicas
$A(y)$	Área projetada da estrutura por unidade de comprimento
$\theta(t)$	Argumento
k	Carga
C_D	Coefficiente de Arrasto
C_M	Coefficiente de Inércia
$c_d(y)$	Coefficiente da Força de Arrasto
λ	Comprimento da Onda
A, B	Constantes de amplitude
x_i	Correspondentes deslocamentos
D	Diâmetro da Coluna
y	Distância do nível da água até o ponto de atuação da força
ρ	Densidade da Água
\dot{u}	Derivada da Velocidade da Partícula do fluido em relação ao tempo
Γ_i^k	Fator de Participação Modal
F_T	Força Hidrodinâmica Total
$P_d^*(t)$	Força Modal de Arrasto
$P_m^*(t)$	Força Modal de Inércia
ω	Frequência de Excitação
ω_o	Frequência Fundamental

ω_i	Frequência de Oscilação da Partícula do Fluido
g	Gravidade
$q_m(y, t)$	Intensidade da Força de Inércia
$y_m(t)$	Linha de atuação da Resultante
k_M	Massa Acrescentada a seção
0K	Matriz de rigidez do sistema para o tempo inicial
M	Matriz de Massa
u_o	Máxima velocidade horizontal da partícula do fluido
$\eta(t)$	Modelo de Onda Cossenoidal
$\psi(t)$	Modulação do sinal
i	Modo
ϕ_i	Modo de vibração
(SWL)	Nível Calmo da Água
n	Número de autovetores
KC	Número de Keulegan-Carpenter
T	Período
P_k	Potência relativa referente a i-ésima harmônica
Y	Profundidade da água
$x_i(t)$	Resposta Modal para o Sistema de Elemento Finitos
$R_d(t)$	Resultante da Força de Arrasto
$R_m(t)$	Resultante da Força de Inércia
β_n	Série temporal
$F(t)$	Sinal Periódico
$u(t)$	Solução Geral
t	Tempo
u	Velocidade da Partícula do Fluido (água)
$\dot{u}(y, t)$	Velocidade relativa Fluido – Estrutura
$V(y)$	Volume da Estrutura por unidade de comprimento

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução Geral

O petróleo tem sido ao longo dos anos o principal elemento da matriz energética mundial e fator estratégico para a economia de todos os países. Por isso, existe uma grande motivação a exploração e produção das reservas no mundo que estão na terra e no mar a grandes profundidades.

Apresenta-se neste capítulo uma introdução ao processo de prospecção e produção do petróleo, enfatizando desde a descoberta até os dias de hoje, onde utiliza-se equipamentos de alta tecnologia que são desenvolvidos para dar suporte ao grande poder que o comércio do petróleo representa mundialmente.

Além de uma pequena introdução sobre todo o sistema de perfuração, produção e distribuição do petróleo, apresenta-se uma análise e simulação do comportamento dinâmico de uma estrutura de plataforma semi-submersível sob ação de excitação de forças oriundas das ondas do mar. A análise permite conhecer parâmetros modais como frequências naturais e modos de vibração da estrutura para monitoramento de possíveis danos causados pela incidência das ondas no mar sobre a estrutura.

1.2 Exploração Marítima (Histórico)

Metade das bacias sedimentares do mundo, que oferecem probabilidade de encontro de petróleo, estão localizadas *offshore*, isto é, no mar. As áreas mais ativas, em nossos dias, são: Golfo do México, Mar do Norte, Golfo Arábico, África Ocidental, Brasil e o sul do Mar da China. Fundamentalmente, são as mesmas tecnologias aplicadas na exploração e produção de petróleo na terra e no mar. Porém, muito mais onerosas são as atividades desenvolvidas em água, devido a fatores, tais como: transportes aéreo e marítimo de pessoal e material e o uso de instalações fixas e de equipamentos móveis para diversas finalidades. Em condições normais, os custos das perfurações marítimas são quatro a cinco vezes mais onerosos do que os terrestres (Triggia et al, 2001). Os equipamentos e estruturas, utilizados pela indústria de petróleo no mar, são bastante diversificados: gabaritos submarinos, dutos submarinos, pontes, píeres, bóias, tanques, torres, balsas, barcos, lanchas, helicópteros, submarinos tripulados, cápsulas de mergulho e de trabalho submarino. E ainda, unidades de perfuração e de apoio (alto custo) montadas sobre equipamento flutuante e as facilidades de produção sobre plataformas fixas ou móveis. Considerando que 50% das reservas recuperáveis de petróleo estão localizados *offshore*, tudo indica que $\frac{1}{4}$ dessas reservas esteja coberto por menos de 200m de água. Cerca de 20% do petróleo do mundo e mais 5% do gás são extraídos dos campos *offshore* (Neiva, 1986).

As primeiras perfurações no mundo foram realizadas, com o avanço das jazidas pelo mar adentro, que até algumas dezenas de anos atrás eram somente em terra firme. Por volta de 1930, após a criação de técnicas específicas, surgiu a possibilidade de perfuração em águas. Dois projetos foram então iniciados na Califórnia e outro na Louisiana. Na Louisiana, as perfurações foram em grandes áreas pantanosas do delta do Rio Mississippi. Na Califórnia, foram experimentados píeres, sobre estacas, que avançava cerca de 30m pelo oceano, com a instalação da torre de perfuração sobre pranchões flutuantes em águas de 6m de profundidade. Poucos esforços foram, no entanto, constatados na extração do petróleo do fundo do mar antes da Segunda Grande Guerra. Ao final desta, a busca pelo petróleo incrementou-se e as possibilidades reveladas pelas pesquisas geofísicas, no Golfo do México, conduziram a perfuração do primeiro poço *offshore*.

No Brasil, o ano de 1968 marca o início da produção marítima no país, graças a entrada em operação, em Sergipe, do Campo de Guaricema, cinco anos após a sua descoberta. Desde então, tem sido contínua a expansão dos trabalhos na plataforma continental com a produção, crescente, do petróleo ao largo da costa dos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Sergipe, Bahia, Espírito Santo e Rio de Janeiro. O setor de petróleo e gás é altamente indutor de desenvolvimento, uma vez que é um forte agente demandante de tecnologias, mão-de-obra capacitada e investimentos fixos. Para que a sociedade possa se beneficiar de forma mais otimizada do desenvolvimento dessa indústria, é fundamental a existência de um mercado interno consumidor que utilize os bens energéticos produzidos. Outro aspecto relevante diz respeito ao estabelecimento de uma cadeia industrial que esteja apta a participar na oferta dos bens e serviços para o mercado interno e para a conquista de novos mercados no exterior (ANP, 2000). A matriz energética brasileira é claramente dominada pela energia hidráulica e pelo petróleo, os quais respondem por cerca de 67% das fontes primárias de energia. A participação da lenha e da cana de açúcar soma aproximadamente 21% das fontes primárias (ANP, 2000). Na figura 1.1 apresenta-se um diagrama que apresenta a distribuição da Matriz energética brasileira.

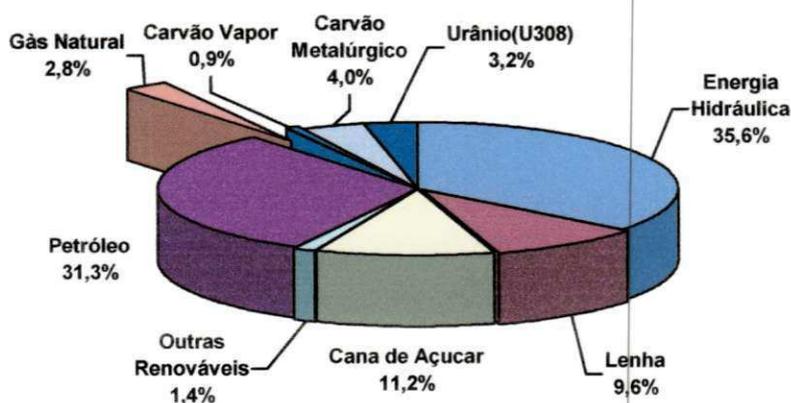


Figura 1.1 – Participação na Matriz Energética Brasileira em 1997 (Fonte: ANP 2000)

A plataforma continental – área submersa do continente que sai da orla marítima e vai até a uma profundidade que varia de 200 a 2000 m – é onde encontramos a maior parte das reservas provadas no Brasil. Por este motivo, a PETROBRAS vem investindo na

exploração e desenvolvimento de campos em águas profundas e ultra-profundas. Existem alguns projetos da PETROBRAS que atua no desenvolvimento tecnológico em águas profundas (ANP, 2000).

O quadro das reservas e do número de equipamentos que a PETROBRAS possui está apresentada abaixo na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Dados sobre a PETROBRÁS

RESERVAS PROVADAS	
Petróleo e Condensado * (bilhões de barris)	7,1
Gás Natural * (bilhões de m ³)	227,7
RESERVAS TOTAIS	16,9
Petróleo e Condensado * (bilhões de barris)	14,2
Gás Natural * (bilhões m ³)	435,5
PRODUÇÃO MÉDIA DIÁRIA	
Petróleo e NGL (milhares de barris)	995
Em terra (<i>Onshore</i>)	227
Em mar (<i>Offshore</i>)	768
Gás Natural (milhões de m ³)	29
Em terra (<i>Onshore</i>)	10
Em mar (<i>Offshore</i>)	19
SONDAS DE PERFURAÇÃO	22
Em terra (<i>Onshore</i>)	14
Em mar (<i>Offshore</i>)	8
PLATAFORMAS DE PRODUÇÃO	93
Fixas	74
Flutuantes	19

Fonte: ANP 2000

Os dados da tabela 1.1 são modificados a cada ano, pois a evolução e descobertas de novos poços são constantes, pois em média cada poço possui uma vida de útil de mais ou menos 15 anos. Além disso, o investimento tecnológico nessa área é grande, desde que a corrida por novas descobertas de poços é acirrada em todo o mundo, o desenvolvimento e produção de novos equipamentos são constantes.

1.3 Plataformas “Offshore” Marítimas (Perfuração e Produção)

Primeiramente, falando-se em perfuração, vamos introduzir a perfuração “*onshore*”, isto é, na terra. Na perfuração em terra existe a presença da torre que tem, entre outras, a função de sustentar o conjunto de tubos (coluna de perfuração), em cuja extremidade inferior está conectada à broca.

No alto da torre existe um conjunto de polias e na plataforma de sondagem um guincho, comandado pelo sondador, destinado a elevar ou descer o conjunto de tubos. No centro da plataforma da torre, a mesa rotativa, que é acionada, em velocidades reguláveis, por motores possantes. Na mesa existe um orifício pelo qual passa uma haste de seção poligonal (quadrada/hexagonal) com um comprimento aproximado de 12m. Essa haste que transmite o movimento de rotação é que são conectados os tubos de perfuração que levam a broca. A broca pode ser de vários tipos, como broca de lâminas, broca de cones, broca de diamantes naturais e broca de diamantes artificiais (Triggia et all, 2001).

Pelo movimento de rotação e o peso aplicado pelos comandos (tubos de aço de paredes mais espessa, colocados entre a broca e os tubos de perfuração) e também pela circulação do fluido de perfuração, é que o solo vai sendo perfurado. A broca possui diâmetro bem maior que o dos tubos. Pode-se ter idéia da dureza da rocha pelo trepidar da coluna de perfuração.

Após perfurar cerca de 12m, a extremidade superior da haste poligonal, geralmente quadrada, chega ao nível da mesa rotativa. O operador interrompe, então, o movimento de rotação e, com o guincho, a eleva totalmente, apoiando a coluna de perfuração, através de cunhas, na mesa. Depois de desenroscada e retirada esta haste, outro tubo é adicionado à coluna, que irá ocupar o intervalo perfurado e ocupado anteriormente pela haste, que, novamente conectada à coluna, ficará acima da mesa rotativa. Reinicia-se o movimento de rotação e quando a extremidade superior da haste chegar ao nível da mesa, repete-se o processo de aprofundamento do poço. Na figura 1.2, apresenta-se a torre de perfuração de poços e o cavalo-de-pau para bombeio mecânico em terra (Neiva, 1986).

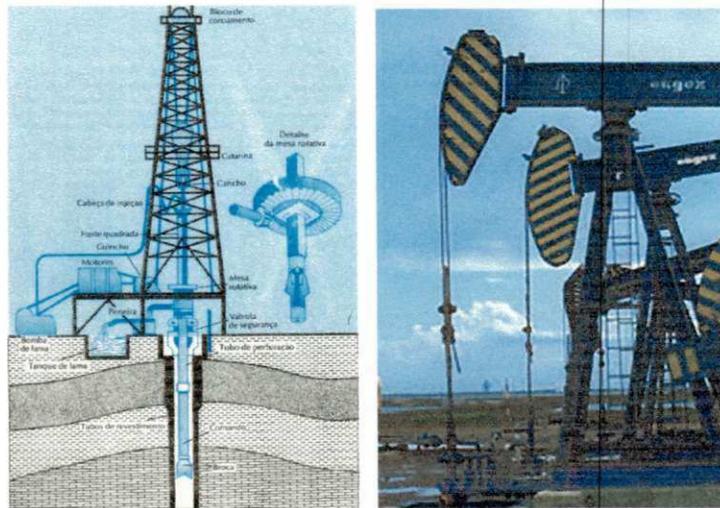


Figura 1.2 – Torre de perfuração em terra e cavalo-de-pau (bombeio mecânico)

A lama é bombeada por dentro dos tubos para lubrificar e resfriar a broca, levar à superfície os fragmentos do terreno, mantendo o poço limpo, agir como reboco das paredes do poço, evitando desmoronamentos e manter coluna hidrostática capaz de evitar erupção súbita, caso se atinja uma zona de alta pressão, etc. Os fragmentos de rocha trazidos à superfície pela lama, fornecem importantes informações quanto às características do terreno.

1.4 Tipos de Plataformas Offshore

A exploração de petróleo no mar é realizada utilizando-se navios-sonda ou plataformas submarinas, que nada mais são que estruturas flutuantes de aço. Com base na perfuração “*onshore*”, a perfuração “*offshore*” é muito semelhante à primeira. A principal diferença entre elas é na distribuição dos equipamentos de perfuração. Os equipamentos são dispostos sobre uma plataforma, com diferentes características que dependem da profundidade e das condições marítimas. Existe alguns tipos de plataformas de petróleo, como: Jack ups (auto-eleváveis), Semi-submersíveis, Fixas, Navio-tênder ou jack up tender.

1.4.1 Plataforma Fixa ou Jaqueta (Skel Jacket)

As plataformas fixas ou Jaquetas se caracterizam pela estrutura tubular em forma de treliças, mas podem ser de concreto. Esta estrutura se apoia no fundo do mar, elevando-se em geral de 30 a 40 metros acima do nível da água. É sobre essa estrutura são montadas a sonda de perfuração e os equipamentos para produção de petróleo. Na figura 1.3, apresenta-se uma plataforma fixa.



Figura 1.3 – Plataforma fixa de perfuração e produção (Triggia, 2001).

No caso de plataformas fixas instaladas em águas calmas, geralmente de pequenas dimensões, e que comportam quase que exclusivamente a torre de perfuração, os demais equipamentos para perfuração são instalados ao lado da plataforma fixa, em um navio ou em uma plataforma *Jack up*, teremos então um *navio-tênder* ou uma *Jack up tender* (Triggia et all, 2001).

1.4.2 Plataforma Jack-up (Auto – Elevatórias)

São plataformas mais simples que atuam em lâminas d'água (distância da superfície até o fundo do mar) até 150m de profundidade. Neste caso, plataformas auto-elevatórias, cujo casco quase sempre possui a forma triangular e abriga as estruturas treliçadas ou tubulares das pernas, que se mantém na posição vertical e se apoiam no fundo do mar. Quando recolhida às pernas, a plataforma adquire uma forma de balsa e é rebocada por um barco. O movimento do casco ao longo das pernas se faz através de sistemas de engrenagens. Neste tipo de equipamento, a seqüência de operações para a perfuração de um

poço é muito parecida com aquela dos equipamentos usados em terra. Outra similaridade é a localização da cabeça do poço e do equipamento de segurança *BOP* (Blow Out Prevent), equipamentos que previnem o refluxo de fluido do poço, posicionados abaixo da mesa rotativa. A função do *BOP* é fechar o poço na eventualidade de uma erupção. Na figura 1.4, apresenta-se à configuração de uma plataforma marítima do tipo Jack up (Neiva, 1986).

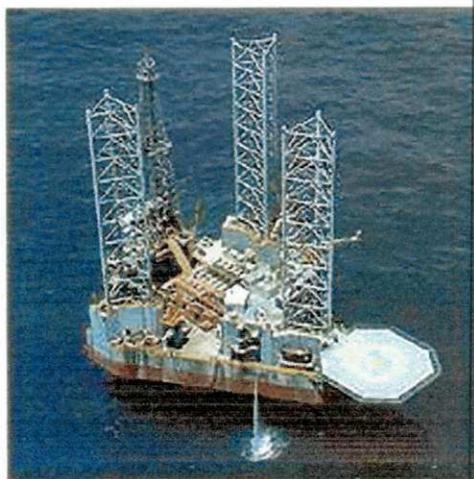


Figura 1.4 – Plataforma Auto-Elevável, “Jack up”, Jaqueta (Triggia, 2001)

1.4.3 Plataforma Semi-Submersível

Em lâminas d’água maiores que 150m, empregam-se unidades de perfuração flutuantes: semi-submersíveis e navios-sonda que são mantidos na vertical do poço, através de um sistema de âncoras. O casco das semi-submersíveis é formado de dois flutuadores submersos, posicionados paralelamente, onde se apoia o convés superior por meio de tubulões verticais. Os navios-sonda têm o casco com a forma de um navio normal e a sua capacidade de carga é bem maior, enquanto as semi-submersíveis têm mais estabilidade que os navios. Nestas unidades de perfuração flutuantes, contrariamente as plataformas auto-eleváveis, a cabeça do poço e os equipamentos de segurança *BOP* ficam localizados no fundo do mar. Na figura 1.5, apresenta-se à foto de uma plataforma semi-submersível (Triggia et all, 2001).



Figura 1.5 – Plataforma semi-submersível P-18 (Mini-site PETROBRAS, 2000)

Na atualidade, as tecnologias estão se voltando para a exploração em alto mar, pois as maiores fontes de petróleo no Brasil estão localizadas no fundo mar. A plataforma semi-submersível possui flutuadores, catamarãs, que são tanques preenchidos de água para fixar a plataforma numa posição de equilíbrio.

1.4.4 Plataforma do tipo Navio-Tênder ou Jack-up Tênder

No caso de plataformas fixas instaladas em águas calmas, geralmente de pequenas dimensões, e que comportam quase que exclusivamente a torre de perfuração, os demais equipamentos para perfurar são instalados ao lado da plataforma fixa, em um navio ou em uma *Jack up*, teremos então um *navio-tênder* ou uma *Jack up tender* (Neiva, 1986).

Com relação ao apoio logístico às operações marítimas, deve-se ressaltar o seu alto custo, uma vez que todos os materiais são transportados por helicóptero ou rebocador. Apenas a água potável, na maioria das vezes, é obtida através de dessalinizadores, por destilação a baixa pressão ou por osmose. Na figura 1.6, apresenta-se uma *Jack up tender* e um *navio-tênder* (Triggia et all, 2001).

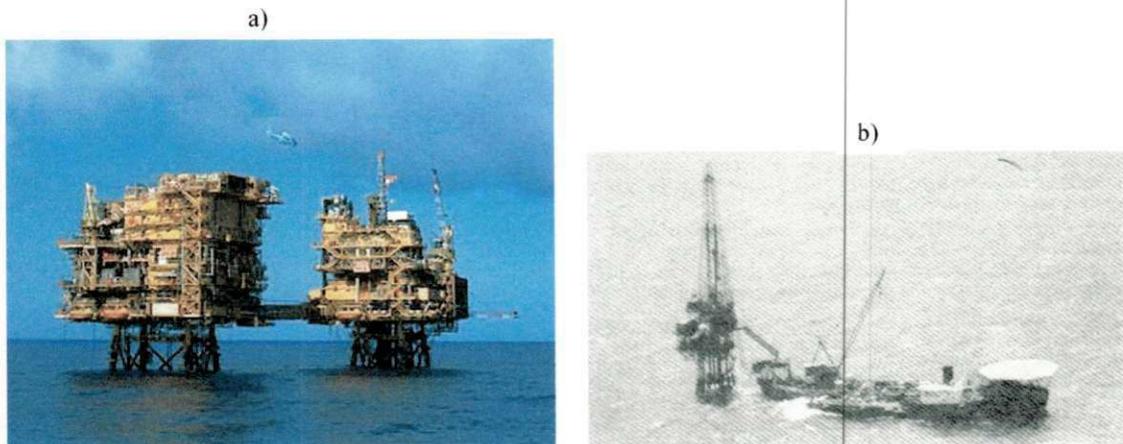


Figura 1.6 – a) *Jack up* tender ao lado de plataforma fixa (PT 3 – OPL Itapoá); b) *navio-tênder* ao lado de plataforma fixa (NT 07 Seadrill 10) (Mini-site PETROBRAS, 2000)

1.5 Produção Marítima Brasileira

Toda a produção de petróleo e de gás natural ao longo da costa brasileira é obtida a partir de um sistema definitivo de produção. Neste caso, os equipamentos são instalados na própria sonda de perfuração, com isso, é possível produzir o óleo e gás enquanto instala-se a plataforma.

A produção brasileira encontra-se distribuída ao longo da costa e dos seguintes Estados: Ceará, Rio Grande do Norte, Sergipe, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro. Na Figura 1.7 apresenta-se a configuração física das plataformas existente, ao longo da costa brasileira que se encontram em operação. Nesta seqüência, pode-se observar a disposição das plataformas Fixa, Jaquetas, Semi-Submersível e Navio Tênder. Observa-se a disposição das plataformas a medida que a profundidade da lâmina de água aumenta.

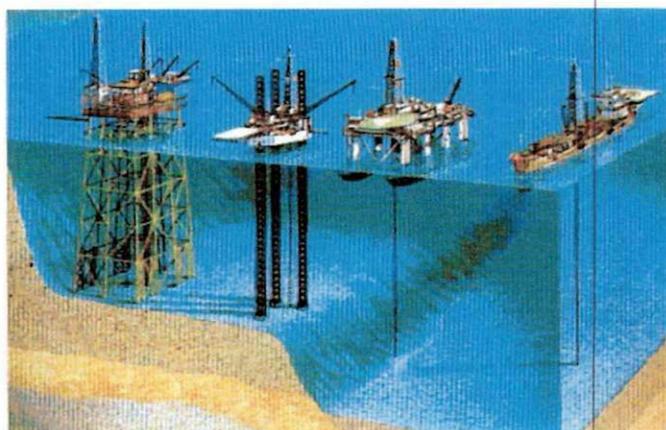


Figura 1.7 – Plataformas atuantes na costa brasileira: Fixa, Jaqueta, Semi-submersível e Navio Tênder (Triggia, 2001).

1.5.1 Ceará

São quatro campos em desenvolvimentos: Xaréu, Curimã, Espada e Atum. No campo de Xaréu, situado a 33 Km do litoral, em águas de 30m, foram instaladas 03 plataformas fixas de produção. Em Curimã, cerca de 30 Km a leste de Xaréu, em águas de 47m de profundidade, a produção é feita através de 02 plataformas fixas com mais de 15 poços de produção. No campo de Espada, estão em operação 06 poços de produção com plataformas fixas. No campo de Atum, foram instalados em 1983 duas plataformas fixas com 03 e 04 poços (Neiva, 1986).

1.5.2 Rio Grande do Norte

A bacia Potiguar possui os campos de Agulha e Ubarana, localizada próxima à cidade de Mossoró. As plataformas existentes nessa área são plataformas fixas utilizadas para lâminas de água de até 100m de profundidade. Em Guamaré-RN, está localizada a Unidade de Negócios do Ceará e Rio Grande do Norte, essa unidade distribui gás, óleo e derivados para a região Nordeste e aos navios petroleiros que descarregam nas refinarias da Bahia e Rio de Janeiro.

1.5.3 Sergipe

Ao longo da costa sergipana prosseguem as atividades de produção nos campos de Caioba, Camorim, Guaricema, Dourado e Robalo. Nesses campos de produção estão instaladas 18 plataformas fixas em águas rasas, com profundidade de 12 a 20m.

1.5.4 Bahia

Em 1980, próxima a Ilhéus, foi descoberta uma área que chegou a produzir 3000 barris/dia. Estuda-se a possibilidade do retorno às atividades de produção nesta área, com base em estudos obtidos através de poços perfurados sob contrato de risco. A Bahia também possui um largo conjunto de campos terrestres que estão em operação.

1.5.5 Rio de Janeiro

A Bacia de Campos totaliza uma área de 36000 Km² com lâmina d'água de mais de 1000m. Há 20 anos atrás, Campos é, sem dúvidas, no presente e no futuro, a maior área de produção do Brasil, com uma infraestrutura de classe internacional e um staff altamente qualificado de mais de 7.000 funcionários. Nessas duas décadas, 66 campos foram descobertos e perfurações exploratórias e outras continuam, com uma média de 26 sondas "Offshore". A produção vem sendo processada através de 32 plataformas: 14 torres fixas e 18 flutuantes (Mini-Site PETROBRAS, 2000).

A área possui os reservatórios de petróleo mais importantes e de maior produção nacional, que são: Garoupa, Namorado, Badejo, Enchova, Enchova Oeste, Pampo, Cherne, Bicudo, Bonito, Corvina, Garapeba, Garoupinha, Pargo, Linguado, Piraúna, Parati, Marlim, Roncador, Voador e Albacora. Nesses campos o Brasil produz grande parte do petróleo produzido no país, por isso possui grande investimento tecnológico em águas profundas.

1.6 Plataformas Semi-Submersíveis da Bacia de Campos (RJ)

Na figura 1.8, apresenta-se um tipo de plataforma Semi-Submersível que se encontra instalada na Bacia de Campos -RJ.



Figura 1.8 – Plataforma semi-submersível da Bacia de Campos – RJ (Mini-Site PETROBRAS, 2000)

Apresenta-se a seguir alguns tipos de plataformas semi-submersíveis que a PETROBRAS possui e encontra-se instalada na Bacia de Campos – RJ.

I – P-18

Plataforma, Semi-submersível, casco duplo tipo catamarã, instalada no Campo de Marlim, a uma distância de 123 km da costa, onde a profundidade da água alcança 910 metros. A Unidade Flutuante de Produção (UFP) foi construída especificamente para produção. Possui 04 colunas verticais de estabilização. Possui um peso de aproximadamente 36.000 toneladas. A área do convés mede 101 x 88 m (Mini-Site PETROBRAS, 2000).

II – P-19

Plataforma, Semi-submersível, casco duplo tipo catamarã, instalada no Campo de Marlim, a uma distância de 105 km da costa, onde a profundidade da água alcança 770 metros. Possui 06 colunas verticais de estabilização. Possui estabilizadores e cabos tirantes, com um peso de 35.657 toneladas. A área do convés é de 77 x 65 m (Mini-Site PETROBRAS, 2000).

III – P-20

Plataforma, Semi-submersível, casco duplo tipo catamarã, instalada no Campo de Marlim, a uma distância de 115 km da costa, onde a profundidade da água alcança 620 metros. A Unidade Flutuante de Produção (FPU) foi construída especificamente para produção. Possui 04 colunas verticais de estabilização. Seu peso é de 26.388 toneladas e as medidas do convés são 122 x 100 m (Mini-Site PETROBRAS, 2000).

IV – P-25

Plataforma, Semi-submersível, instalada no Campo de Albacora, a uma distância de 107 km da costa, onde a profundidade é de 575 metros. A Unidade Flutuante de Produção (UFP), tem um peso de 32.936 toneladas e mede 116 x 83m (Mini-Site PETROBRAS, 2000).

V – P- 26

Plataforma, Semi-submersível, casco duplo tipo catamarã, instalada no Campo de Marlim, a uma distância de 120 km da costa, onde a profundidade da água alcança 990 metros de lâmina de água. A Unidade Flutuante de Produção (UFP) que foi construída especificamente para produção. Possui 06 colunas verticais de estabilização, reforçadas por pontões e cabos tirantes transversais. Seu peso é de 35.000 toneladas e as medidas do convés são 75 x 75 m (Mini-Site PETROBRAS, 2000).



R696a Rodrigues, Marcelo Cavalcanti.
Análise do comportamento dinâmico de plataformas marítimas sob a ação de excitação de ondas em alto mar / Marcelo Cavalcanti Rodrigues. - Campina Grande, 2003. 80 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, 2003.
"Orientação: Prof. Dr. Natanael Victor de Oliveira, Prof. Dr. Antônio Almeida Silva".
Referências.

1. Comportamento Dinâmico - Petróleo. 2. Plataformas Marítimas Semi-Submersíveis. 3. Elementos Finitos. 4. Ondas do Mar. 5. Dissertação - Engenharia Mecânica. I. Oliveira, Natanael Victor de. II. Silva, Antônio Almeida. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 665.6(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CAMPUS II
PPGEM - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. MECÂNICA



PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE
PLATAFORMAS MARÍTIMAS SOB A AÇÃO DE
EXCITAÇÃO DE ONDAS EM ALTO MAR**

MARCELO CAVALCANTI RODRIGUES

CAMPINA GRANDE - PB

FEVEREIRO - 2003

enorme na produção de óleo e gás foi inevitável (60 mil barris/dia). A figura 1.9 mostra com riqueza de detalhes as fotografias da plataforma P-36 sendo rebocada para instalação e adernando respectivamente (Site Petrobrás, 2000).



Figura 1.9 – Plataforma P-36

1.7 Objetivo do Trabalho

Estudar o projeto/concepção de uma plataforma de Petróleo em alto mar, analisar e simular o comportamento dinâmico de estrutura de plataforma semi-submersível submetida a esforços ambientais do tipo ondas do mar.

1.7.1 Objetivos Específicos

Modelar o perfil da fonte de perturbação (força) que interage sob a estrutura, que é oriunda das ondas geradas em **Alto – Mar**. Estabelecer um modelo matemático que represente/aproxime a estrutura física real da plataforma. A partir do modelo físico e matemático definido, obter e avaliar as respostas dinâmicas sob a ação destas fontes de perturbação (força). Simular no ADINA 7.5 o modelo de uma plataforma de petróleo semi-submersível;

1.8 Descrição do Trabalho

Este trabalho em linhas gerais poderá ser descrito da seguinte forma.

Este primeiro capítulo apresenta uma introdução geral, onde descreve-se sucintamente o processo de prospecção do petróleo desde a perfuração a produção, enfatizando os modelos existentes de plataformas marítimas de petróleo e o objetivo do trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os métodos e técnicas de análise do comportamento dinâmico de estruturas marítimas, focalizando a ação das ondas do mar sobre essas estruturas.

O terceiro capítulo propõe uma formulação matemática da fonte de excitação (ondas em alto mar) a ser utilizada na simulação computacional.

No quarto capítulo apresenta-se uma introdução ao programa computacional utilizado para simulação que utiliza o Método dos Elementos Finitos, ADINA 7.5 (*Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis*), – recursos de capacidade de processamento e modelagem – e um modelo do sistema de plataforma semi-submersível construído para as simulações. Apresenta-se uma comparação entre a solução exata e numérica para o cálculo de autovalores.

No quinto capítulo têm-se os resultados da simulação e discussões desses resultados.

No sexto capítulo apresenta-se a conclusão geral do trabalho e sugestões.

Por fim, têm-se os apêndices, que se constituem de trabalhos publicados em congressos e periódicos.

CAPITULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

O suporte bibliográfico necessário ao amadurecimento em torno da área de interesse desta pesquisa, objetivando o seu futuro desenvolvimento, envolveu referências importantes e recentes de autoria de pesquisadores nacionais e estrangeiros colhidas de fontes especializadas.

Apresenta-se neste capítulo a revisão bibliográfica sobre estudos dos movimentos de uma estrutura de plataforma semi-submersível submetida a esforços ambientais como vento, ondas do mar e correnteza. Neste trabalho considera-se apenas o esforço causado pelas ondas do mar, por se entender que é a mais importante fonte de excitação (força) que interage com a estrutura.

2.2 Comportamento Dinâmico

Uma plataforma semi-submersível é uma estrutura flutuante que possui os movimentos no plano horizontal limitados por um sistema de posicionamento dinâmico ou

por um sistema de ancoragem composto por cabos de aço ou corrente. 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.

Alguns fatos históricos sobre acidentes em alto mar, envolvendo plataformas “offshore” que aconteceram a partir da segunda metade do século XX podem ser relatados.

A maior dessas tragédias aconteceu em março de 1980, no campo petrolífero de Ekofisk, no Mar do Norte. A plataforma Alexander Kielland, da Noruega, afundou durante uma tempestade, quando umas das peças metálicas de sua base rachou. Morreram mais de 120 pessoas e cerca de cem foram dadas como desaparecidas (Jornal do Brasil, 2001).

Em 1982, a maior plataforma submarina de exploração de petróleo do mundo na época, a Ocean Ranger, afundou na costa gelada da ilha de Terra Nova, no Canadá. A força das ondas de trinta metros de altura e dos ventos de 130 Km/h (furacão), causou o acidente que matou os 84 tripulantes da embarcação (Jornal do Brasil, 2001).

Em 1998, uma outra plataforma tombou no Atlântico, quando estava sendo rebocada de Halifax, no Canadá, para o Mar do Norte. Novamente o mau tempo foi o provocador do acidente. Uma tempestade rompeu o cabo que ligava a plataforma ao rebocador. A tripulação (25 canadenses) teve que abandonar a embarcação (Jornal do Brasil, 2001).

É importante para o projetista conhecer a dinâmica dos movimentos de uma plataforma semi-submersível e as forças externas oriundas das ondas do mar que atuam sobre a estrutura, para permitir o dimensionamento do casco, sistema de ancoragem ou posicionamento dinâmico e riser (tubulação de exploração).

Estudos das resultantes das forças de inércia e da força de arrasto provocado pelas ondas do mar sobre estruturas de plataformas *offshore* de petróleo foram feitos e relacionadas com as correspondentes forças modais que atuam sobre a estrutura (Chang & Hahn, 1995). Utilizando a equação de Morison (Morison, et al. 1950), é demonstrado que as componentes de inércia e arrasto são expressas em termos do movimento da superfície

do mar, importante para entender as respostas dinâmicas das estruturas “offshore” quando excitadas por ondas do mar (Chang & Hahn, 1995).

A aplicação do método da superposição modal (Clough & Piezian, 1993), integral espacial do produto dessas forças e a forma modal da estrutura são calculadas para obter a equação generalizada ou força modal que controla a resposta. A demonstração que a força modal pode ser expressa em termos da superfície cinemática do mar é característica que distingue os estudos atuais.

A forma geral da equação de Morison é obtida somando a força de inércia e a força de arrasto como segue na equação (2.2.1):

$$F_T = \int_L \rho C_M A_S \dot{u} ds + \int_L \frac{1}{2} \rho C_D D u |u| ds \quad (2.2.1)$$

onde F_T é a força hidrodinâmica total; $C_M = 1 + k_M$ coeficiente de inércia e k_M é a massa acrescentada à seção respectivamente; ρ é a densidade da água; C_D é o coeficiente de arrasto; D é o diâmetro característico da coluna; A_S é a área da seção transversal da coluna; \dot{u} a aceleração local em relação ao tempo de $\partial u / \partial t$ e L é o comprimento da coluna. Os valores de C_M e C_D usados no cálculo, são constantes e elas podem ser aproximadas por valores de cilindros circulares como obtidos experimentalmente por (Sarpkaya & Isaacson, 1981).

Foi demonstrado que forças de onda devido à velocidade da partícula da água e a aceleração podem ser computados pela equação de Morison, se as dimensões características dos membros da estrutura não exceder 20% do comprimento da onda (Newman & Hallam, 1978).

Para calcular a força resultante de inércia, a estrutura é modelada como um sistema de viga. Permite-se que $q_m(y, t)$ seja a intensidade da força de inércia (força por unidade de comprimento ao longo da altura da estrutura) agindo sobre a estrutura a distância y do nível calmo da água (*SWL – STILL WATER LEVEL*) no tempo; e Y seja a profundidade da água. A resultante dessas forças, $R_m(t)$, e a posição da linha de ação desta resultante a partir da *SWL*, $y_m(t)$, são definidos por:

$$R_m(t) = \int_0^Y q_m(y,t) dy \quad (2.2.2)$$

$$y_m(t) = \frac{1}{R_m(t)} \int_0^Y y q_m(y,t) dy \quad (2.2.3)$$

onde

$$q_m(y,t) = B_m(y) \dot{u}(y,t) \quad (2.2.4)$$

onde $\dot{u}(y,t)$ é a aceleração da partícula da água na direção horizontal; $B_m(y) = c_m(y) \rho V(y)$; $c_m(y)$ é o coeficiente da força de inércia; ρ é a densidade do fluido e $V(y)$ é o volume da estrutura por unidade de comprimento (Chang & Hahn, 1995).

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

$$\dot{u}(y,t) = -\sum_{i=1}^n \exp(-\omega_i^2 y / g) \omega_i^2 a_i \sin(\omega_i t - \theta_i) \quad (2.2.5)$$

onde g é a aceleração da gravidade, ω_i é a frequência de excitação (rad/s), a_i é a amplitude de deslocamento e θ_i é o ângulo de fase.

Um importante conceito pode ser assumido quando $B_m(y) = B_m = cte$. Esta suposição é realista, pois a seção transversal de muitos projetos de estruturas "offshore" não varia com a profundidade (des Deserts, 1992). Todavia os efeitos da variação espacial de B_m são consideradas. Assumindo B_m como uma constante e que Y muito grande ($Y > 300m$), pode-se mostrar que $R_m(t)$ e $u(0,t)$ são dados na forma das equações (2.2.6) e (2.2.7).

$$R_m(t) = -B_m g u(0,t) \quad (2.2.6)$$

onde

$$u(0,t) = \sum_{i=1}^n a_i \sin(\omega_i t - \theta_i) \quad (2.2.7)$$

que é o deslocamento da partícula da água (Hahn & Chang, 1995).

A resultante da força de arrasto pode ser expressa em termos da velocidade horizontal da partícula fluída, $u(y,t)$, como:

$$R_d(t) = \int_0^y B_d(y) |u(y,t)| u(y,t) dy \quad (2.2.8)$$

no qual $B_d(y) = 0.5c_d(y)\rho A(y)$; $c_d(y)$ é o coeficiente da força de arrasto; $A(y)$ é a área projetada da estrutura por unidade de comprimento. Uma aperfeiçoada definição para $R_d(t)$ pode ser obtida substituindo $u(y,t)$ na equação (2.2.8) com a velocidade relativa do fluído-estrutura considerando os efeitos da então chamada interação fluído-estrutura. Embora esses efeitos tenham sido objeto de estudos anteriores (Veletsos et al. 1988), esses efeitos são conhecidos por causar um aumento efetivo no amortecimento do sistema. Existe a necessidade de métodos que possam prognosticar o aumento no amortecimento para sistemas de multi-graus de liberdade (Chang & Hahn, 1995).

Assume-se que a primeira forma modal $\phi(y)$ varia linearmente da altura do nível do mar até a sua profundidade total.

A primeira força de inércia modal e de arrasto, $P_m^*(t)$ e $P_d^*(t)$ são dadas respectivamente por:

$$P_m^*(t) = \int_0^y \phi(y) \cdot B_m \cdot \dot{u}(y,t) \cdot dy \quad (2.2.9)$$

$$P_d^*(t) = \int_0^y \phi(y) \cdot B_d \cdot |u(y,t)| \cdot \dot{u}(y,t) \cdot dy \quad (2.2.10)$$

As equações (2.2.9) e (2.2.10) podem ser reduzidas para:

$$P_m^*(t) = R_m(t) \left[1 - \frac{y_m(t)}{Y} \right] \quad (2.2.11)$$

$$P_d^*(t) = R_d(t) \left[1 - \frac{y_d(t)}{Y} \right] \quad (2.2.12)$$

onde B_m e B_d nas equações (2.2.9) e (2.2.10) são constantes que dependem das condições de contorno. Percebe-se que em (2.2.11) e (2.2.12) as forças modais dependem das resultantes $R_m(t)$ e $R_d(t)$ e das posições $y_m(t)$ e $y_d(t)$. Para várias profundidades da água, pode-se mostrar que as razões $\left[\frac{y_m(t)}{Y} \right]$ e $\left[\frac{y_d(t)}{Y} \right]$ são pequenas e as forças modais dependem somente das resultantes (Chang & Hahn, 1995).

Segundo (Chang & Hahn, 1995), para uma estrutura uniforme onde, B_m e B_d são constantes, as forças resultantes de inércia e de arrasto podem ser controladas pelo deslocamento horizontal e vertical da partícula fluída. isto foi mostrado para uma estrutura uniforme dada por:

$$\phi(y) = (1 - y/D) \quad (2.2.13)$$

Esses resultados experimentais contribuem em grande potencial para projetos de estruturas "Offshore" (Chang & Hahn, 1995).

Um método para simulação dos movimentos de uma plataforma semi-submersível no domínio do tempo foram proposta por (Vardaro & Morooka, 1991). O método baseia-se na descrição proposta por (Cummings, 1962) em que os movimentos da estrutura podem ser representados pela sucessão de pequenos deslocamentos impulsivos.

(Vardaro & Morooka, 1991) dividiram a excitação (força) de onda em esforços de duas ordens. O esforço de primeira ordem como sendo proporcional à altura da onda, e com frequência de oscilação igual a frequência da onda e os esforços de segunda ordem,

proporcionais ao quadrado da altura da onda e com frequência de oscilação muito menor que a frequência de onda.

Os movimentos de uma plataforma semi-submersível são resultantes da ação dos esforços de vento, correnteza e onda. Mas somente os movimentos de onda são considerados para simulação neste trabalho. Pois entre os carregamentos ambientais, o efeito das ondas é de especial importância devido às suas fortes características dinâmicas (Yokoo & Morooka, 1990).

Segundo (Patel, 1989), as ondas gravitacionais são responsáveis por uma parcela significativa das forças atuantes sobre uma estrutura marítima. Este tipo de ondas pode aparecer na interface entre dois fluidos de diferentes densidades, ar e água, por exemplo.

A ação do vento sobre a água gera ondas que se desenvolvem com o aumento da duração do vento e do comprimento de pista. O comprimento de pista é o comprimento da superfície da água sobre o qual o vento sopra. As ondas resultantes deste fenômeno são chamadas de ondas de vento ou mar, e são progressivas, podendo deslocar-se para fora de sua área de formação. Quando deslocando para fora da ação do vento que as gerou, estas ondas são chamadas de *swell*, que podem viajar grandes distâncias com pequena redução de intensidade (Yokoo & Morooka, 1990).

Tradicionalmente a estimativa de carregamentos de ondas sobre estruturas marítimas tem sido feita assumindo-se que as ondas atingem a estrutura por apenas uma direção a cada instante. Esta hipótese não deixa de ser razoável em locais de pouca profundidade, onde o fundo do mar interfere no escoamento. Porém em locais onde o fundo do mar não interfere no escoamento, a distribuição da energia do mar em várias direções provocará uma distribuição direcional de ondas (Yokoo & Morooka, 1990).

Neste trabalho considera-se uma estrutura de plataformas semi-submersível excitada por ondas do alto mar sobre as suas colunas. O Modelo matemático da força de excitação atuante é apresentado e demonstrado para aplicação sobre a estrutura. A simulação da plataforma semi-submersível é desenvolvida no software ADINA (*Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis*), onde os parâmetros modais (modos de vibração e frequências naturais) e as curvas de respostas são obtidos.

2.3 Conclusão

Mostrou-se neste capítulo uma revisão bibliográfica sobre alguns métodos e tipos de excitações (força) de ondas existentes. Esses tipos de formulações matemáticas relacionam as excitações quanto às características do fluido e quanto à característica da estrutura que está sendo submetida o esforço. No próximo capítulo apresenta-se uma formulação matemática proposta da fonte de excitação.

CAPITULO 3

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA FONTE DE EXCITAÇÃO: ONDA DO MAR

3.1 Introdução

Atualmente no Brasil, onde a maior reserva de petróleo do país encontra-se em águas profundas, esforços estão sendo feitos para desenvolver tecnologias de perfuração e produção de petróleo em águas profundas.

Atualmente o Brasil, principalmente a PETROBRAS, possui a tecnologia mais avançada do mundo na prospecção de petróleo em águas profundas.

A utilização de estruturas marítimas como oleodutos, navios, plataformas fixas e flutuantes, estão cada vez mais aumentando, e para isso, estudos que avaliam os danos causados pelas ondas do mar sobre essas estruturas é uma preocupação patente pela comunidade científica que trabalham na prospecção de petróleo em alto mar.

O impacto de fenômenos ambientais de ondas, vento e correnteza são de grande importância para o projeto dessas estruturas.

Neste capítulo, procura-se apresentar algumas formulações matemáticas de sinais de excitação (forças) oriundas das ondas do mar sobre as estruturas de plataformas utilizadas por alguns autores, e concomitantemente, propõe-se um modelo matemático de um sinal de excitação determinístico, com as mesmas características e/ou propriedades de um ruído branco. É um sinal que pode ser gerado num computador, passar por um conversor digital analógico, que através de um excitador - eletrodinâmico “Shaker”, pode ser utilizado experimentalmente para excitar a estrutura de um protótipo de um modelo físico real.

3.2 Modelo Proposto da Formulação Matemática do Perfil da Onda do Mar para Simulação.

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. (3.2.1).

$$\eta(t) = (H/2)\cos(\omega t) \quad (3.2.1)$$

onde $H/2$ é a amplitude da onda e ω a frequência de excitação.

(Shroeder, 1970), demonstrou que através dos ângulos de fase das harmônicas que compõe um sinal, produziu um sinal de excitação do tipo cossenoidal com baixo fator de pico (quociente do maior valor em amplitude pelo seu valor eficaz). Este sinal pode ser considerado um sinal periódico $F(t)$, de período T e largura de banda finita, bem como sua transformada de Fourier,

$$F(t) = \sum_{n=1}^N (p_k/2)\cos[\theta(t) + \theta_n] \quad (3.2.2)$$

com o argumento $\theta(t)$ dado por,

$$\theta(t) = n\omega_0 t \quad (3.2.3)$$

Sendo $\omega_o = 2\pi/T$ a frequência fundamental,

$$\theta(t_o) = \frac{2\pi n}{T} t \quad (3.2.4)$$

com $T = n.Dt$ e Dt o intervalo de tempo de discretização.

Voltando a equação (3.2.2), as seguintes grandezas são definidas,

P_k - é a potência relativa referente a i -ésima harmônica que compõe o sinal, satisfazendo por exemplo a condição $\sum p_k = 1$.

θ_n - ângulo de fase das harmônicas que compõe o sinal.

Deste modo, sendo pré-estabelecido a potência relativa contida no sinal entre duas harmônicas consecutivas, surge o problema de como minimizar a diferença entre a máxima e a mínima amplitude do sinal, ou seja, $(F_{\max} - F_{\min})$. Este problema foi contornado por (Schroeder, 1970), considerando o sinal periódico modulado em fase como segue,

$$F_p(t) = \cos\theta(t) \quad (3.2.5)$$

onde a modulação em fase do sinal é dado por,

$$\psi(t) = \int_0^t \psi(\tau) d\tau \quad (3.2.6)$$

e

$$\dot{\psi}(t) = \frac{2\pi n}{T} t, \quad t_{n-1} < t < t_n \quad (3.2.7)$$

Os instantes discretos t_n são aqueles nos quais as frequências instantâneas mudam de valor de tal modo que a relação seja satisfeita,

$$t_n = T \sum_{i=1}^N p_i, \quad n = 1(1)N \quad (3.2.8)$$

onde,

T – é o período do sinal

N – número de harmônicas

p_i - potência relativa da i -ésima harmônica que compõe o sinal a ser considerado.

Deste modo, considera-se um modelo alternativo de uma fonte de excitação periódica (força), que poderá ser utilizada para excitar a estrutura, é sugerida na forma da Eq. (3.2.9).

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N \beta_n \cdot \cos(n\omega t) \quad (3.2.9)$$

onde β_n é dado pela Eq. (3.2.10)

$$\beta_n = H/2 \cdot \left\{ 1 - 2 \left[\frac{\phi_n}{\pi} \right] \right\} \quad (3.2.10)$$

e ϕ_n dado pela Eq. (3.2.11),

$$\phi_n = 1 - \pi \left[\frac{n^2}{2N} \right] \Rightarrow \beta_n = \frac{H}{2} \left[1 - \pi \left(\frac{n^2}{2N} \right) \right] \quad (3.2.11)$$

onde o ângulo de fase ϕ_n varia entre (0 e π) e β_n , se constitui numa série temporal assumindo valores genéricos entre $H/2$ 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) com propriedades estatísticas de um 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; Pode ser facilmente implementado num computador digital, podendo-se utilizá-lo através de um conversor digital analógico, para excitar um modelo de um sistema físico real.

Na Figura 3.1, apresenta-se o sinal do perfil de onda no domínio do tempo e o seu respectivo espectro. Observa-se que o sinal de excitação proposto possui um espectro plano. Fisicamente, isto significa que o sinal excitação (força) excita a estrutura nos seus respectivos modos de vibração, com um conteúdo energético uniforme, isto é, se o sistema é considerado linear, não há perigo de se violar as condições de linearidade do modelo matemático utilizado na análise do comportamento dinâmico e/ou vibratório da estrutura a ser utilizada. Fato que ocorre quando se utiliza uma excitação impulsional, por exemplo, onde dependendo da amplitude da força impulsional (impacto) e o intervalo de duração da força, a energia introduzida no sistema, passa a ser inversamente proporcional ao intervalo de duração da força.

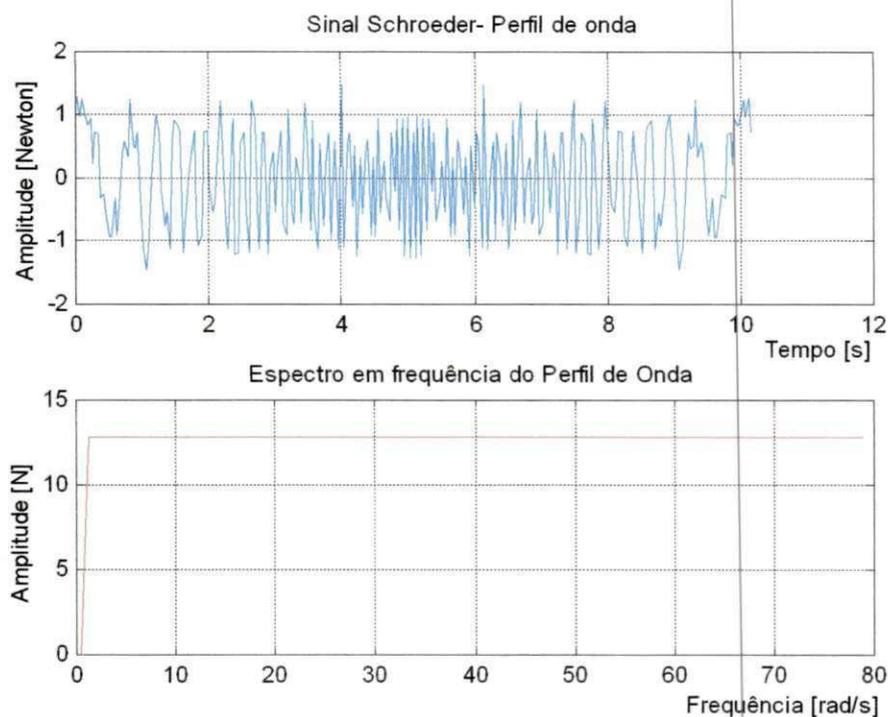


Figura 3.1 - Sinal do perfil de onda proposto e seu espectro.

3.2.1 Modelo Proposto da Força Interação Fluido - Estrutura

Para associar modelo do perfil onda, baseado na Interação Fluido – Estrutura, utiliza-se o modelo equivalente da equação (3.2.9) na forma da equação (3.2.12),

$$X_n(y,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \cos(\omega_n t) \quad (3.2.12)$$

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,

$$\ddot{X}_n(y,t) = -\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t) \quad (3.2.13)$$

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

$$\ddot{X}(y,t) = -\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\omega_n^2 y/g} \beta_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t) \quad (3.2.14)$$

Pode-se observar que, para $y = 0$ ou na SWL, isto é, não há o efeito da interação do fluido na estrutura, o que redundaria na equação (3.2.13).

A força (Oliveira, 2002), que passará a interagir sobre a coluna da plataforma para $y \neq 0$, agora poderá ser dada na forma da equação (3.2.15),

$$F_n(y,t) = M_e \ddot{X}(y,t) \quad (3.2.15)$$

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

$$M_e = \rho A_n y_n \quad (3.2.16)$$

Dáí tem-se , que:

$$F_n(y,t) = -\rho A_n y \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\omega_n^2 y / g} \beta_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t) \quad (3.2.17)$$

onde, ρ - densidade da água; A_n - área da secção transversal da coluna da plataforma e ω_n , a frequência natural de propagação da onda.

Como a onda do mar encontra-se em movimento, pode-se fazer uso da equação (3.2.12), para associar o modelo ao comprimento de onda e velocidade de propagação.

$$X_n(y,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \cos(2\pi \dot{X}(y,t) / \lambda_n) t \quad (3.2.18)$$

onde ω_n pode ser dado por,

$$\omega_n = 2\pi \dot{X}(y,t) / \lambda_n \quad (3.2.19)$$

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

Finalmente, substituindo a Eq. (3.2.19) em (3.2.17), obtém-se a equação à Eq. (3.2.20), que caracteriza a força de excitação oriunda da onda do mar, que passará a interagir sobre a estrutura,

$$F_n(y,t) = -\rho A_n y \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\omega_n^2 y/g} \beta_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t) \quad (3.2.20)$$

Na figura 3.2, apresenta-se a força de excitação oriunda da onda do mar que interage sobre a estrutura da plataforma semi-submersível.

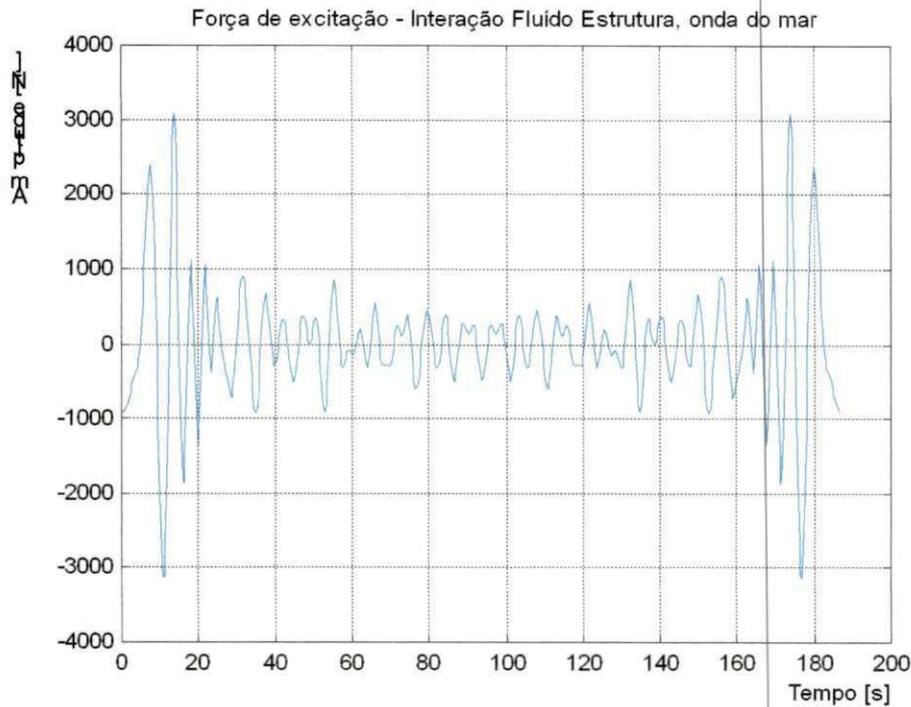


Figura 3.2 – Força de excitação, Interação Fluido – Estrutura.

Para a simulação deste sinal de excitação, foram utilizados parâmetros importantes que caracterizam a interação fluido – estrutura. Os parâmetros foram, Área de atuação da onda sobre a coluna $A=96 \text{ m}^2$, Comprimento de onda $\lambda_n = 6\text{m}$, Aceleração da gravidade $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, Profundidade da água $Y = 5 \text{ m}$, Amplitude da onda $H = 4\text{m}$ e Densidade da água do mar $\rho = 1025 \text{ Kg/m}^3$.

3.3 Outros modelos matemáticos.

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. 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/λ); altura da onda e diâmetro do membro estrutural (H/D), (Patel, 1989).

Algumas formulações para estimar as forças de onda, que podem ser citadas, são: *Equação de Morison, Teoria de Froude-Krylov e Teoria da Difração* (Yokoo & Morooka, 1990).

Para membros estruturais pequenos ($D/\lambda < 0.2$), a equação de Morison é utilizada, onde se 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,

$$F_T = \int_L \rho C_M A_S \dot{u} ds + \int_L \frac{1}{2} \rho C_D D u |u| ds \quad (3.3.1)$$

onde, F_T é a força hidrodinâmica total; $C_M = 1 + k_M$ e k_M - coeficiente inercial 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.

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 & Morooka, 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 & Morooka, 1990).

Para grandes estruturas com valores de $(D/\lambda > 0.2)$, 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 $H/D > 8$, há formação de vórtices, e as forças viscosas são grandes e a equação de Morison pode ser aplicada (Yokoo & Morooka, 1990).

Para valores da relação H/D no intervalo de variação de $1.5 < H/D < 8$, o regime de fluxo é muito complexo e de difícil determinação, (Yokoo & Morooka, 1990). Um outro parâmetro que pode substituir a razão H/D trata-se do número adimensional de Keulegan-Carpenter,

$$KC = u_o T / D \quad (3.3.2)$$

onde u_o , é a máxima velocidade horizontal da partícula d'água num fluxo de período T em torno de um corpo de diâmetro D . Quando KC é grande, há predominância das forças de atrito, e concomitantemente, a relação D/λ que mede a difração, é pequeno, e vice-versa.

O estado de mar aleatório em análise de curto prazo mantém certas propriedades estatísticas e é mais bem representado pelo espectro de densidade de energia. A energia da onda E (por unidade de área superficial) entre limites infinitos de tempo é dada por:

$$E = \frac{1}{2} \rho g \int_{-\infty}^{+\infty} [\eta(t)]^2 dt \quad (3.3.3)$$

Generalizando a expressão para $\eta(t)$,

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (3.3.4)$$

para que as frequências não sejam mais representadas por componentes de Fourier, e variem continuamente e os coeficientes a_n e b_n sejam generalizados como $a(\omega)$ e $b(\omega)$, escrevemos:

$$\eta(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t] d\omega \quad (3.3.5)$$

onde

$$a(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(t) \cos \omega t dt \quad (3.3.6)$$

$$b(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(t) \sin \omega t dt \quad (3.3.7)$$

Com as equações (3.2.22) e (3.2.23) a energia pode ser escrita como:

$$E = \frac{1}{2\pi} \rho g \left[\int_{-\infty}^{+\infty} [a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t] d\omega \right] dt \quad (3.3.8)$$

Trocando as integrais:

$$E = \frac{1}{2\pi} \rho g \int_{-\infty}^{+\infty} \left[a(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(t) \cos \omega t dt + b(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(t) \sin \omega t dt \right] d\omega \quad (3.3.9)$$

ou

$$E = \frac{1}{2\pi} \rho g \int_{-\infty}^{+\infty} [a^2(\omega) + b^2(\omega)] d\omega \quad (3.3.10)$$

Com as equações (3.2.22) e (3.2.29) obtemos a igualdade do Teorema de Parseval:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} [\eta(t)]^2 dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [A(\omega)]^2 d\omega \quad (3.3.11)$$

que dá base ao conceito de espectro de energia de onda. A amplitude A tem unidade de comprimento-tempo e é uma função contínua da frequência ω . Se $[\eta(t)]^2$ é o valor médio quadrado (variância) de $\eta(t)$ sobre uma determinada leitura de comprimento T_s , então:

$$[\eta(t)]^2 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} [\eta(t)]^2 dt \quad (3.3.12)$$

que pode ser escrito como energia média por unidade de área:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho g \int_{-\infty}^{+\infty} [A(\omega)]^2 / T_s d\omega \quad (3.3.13)$$

Definindo a densidade espectral de energia como:

$$S(\omega) = \frac{[A(\omega)]^2}{\pi T_s} \quad (3.3.14)$$

A energia total é obtida da área coberta pela densidade de energia como uma função de frequência.

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho g \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) d\omega \quad (3.3.15)$$

Apresenta-se a seguir na Figura 3.3, o gráfico do sinal do *estado do mar aleatório*, e o seu respectivo espectro de resposta em frequência.

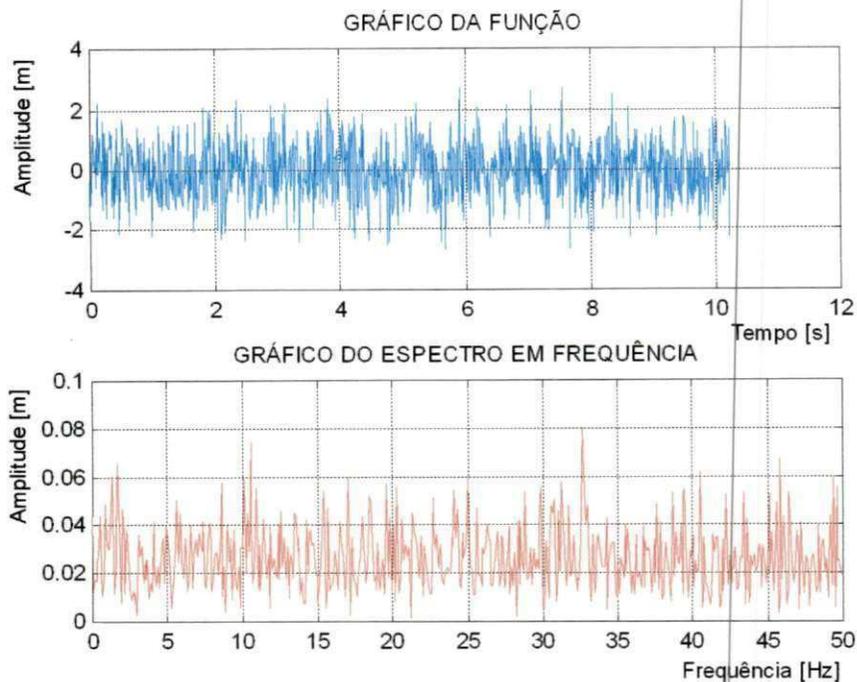


Figura 3.3 - Sinal do estado do mar aleatório.

Observa-se na figura 3.3, que o sinal do estado do mar aleatório possui uma excitação não persistente e um espectro de resposta em frequência variado com a sua energia de forma não distribuída.

3.4 Conclusão

Neste capítulo, foi apresentada uma proposta de formulação matemática para a excitação (força) de ondas do mar, a ser utilizada em simulações de estruturas de plataformas de petróleo em conjunção com o modelo de (Sarpkaya e Issacson, 1981), caracterizando a Interação Fluido – Estrutura, onde se utiliza inicialmente um sinal de excitação (força), possuindo as mesmas propriedades estatísticas de um ruído branco.

O sinal de excitação é simulado e apresentado, como também o sinal do estado do mar aleatório.

A seguir apresenta-se no próximo capítulo as simulações dos modelos de plataformas semi-submersível submetido a esforço de ondas do mar.

CAPITULO 4

SIMULAÇÃO

4.1 Introdução

Nas simulações, é utilizado o software ADINA 7.5 (*Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis*), ferramenta computacional que utiliza o Método dos Elementos Finitos para análise estática e dinâmica, além de suportar e realizar animações gráficas em 3D. Procedimentos de como se utilizar o ADINA 7.5 são apresentados, bem como alguns métodos matemáticos utilizados pelo “software”. Uma comparação entre a solução exata e numérica onde se utilizar uma viga bi-engastada para o cálculo dos autovalores é apresentada, para se poder ter uma idéia da precisão no processo de discretização quando se utiliza programa ADINA 7.5 no modelamento via elementos finitos.

4.2 Simulação no “Software” de Elementos Finitos (ADINA)

O ADINA possui método de análise estática e dinâmica utilizando o método dos elementos finitos e análise Fourier. Este “Software” possui quatro ambientes de simulação. Três deles são para construção dos modelos e experiências chamados de ADINA-AUI,

ADINA-F e ADINA-T. O primeiro é utilizado para testes de análise estática e dinâmica de sistemas, o segundo é utilizado para simular sistemas de interação fluido-estrutura e o terceiro é para análise termo-mecânica. Apresenta-se na figura 4.1, o ambiente de simulação do ADINA-AUI.

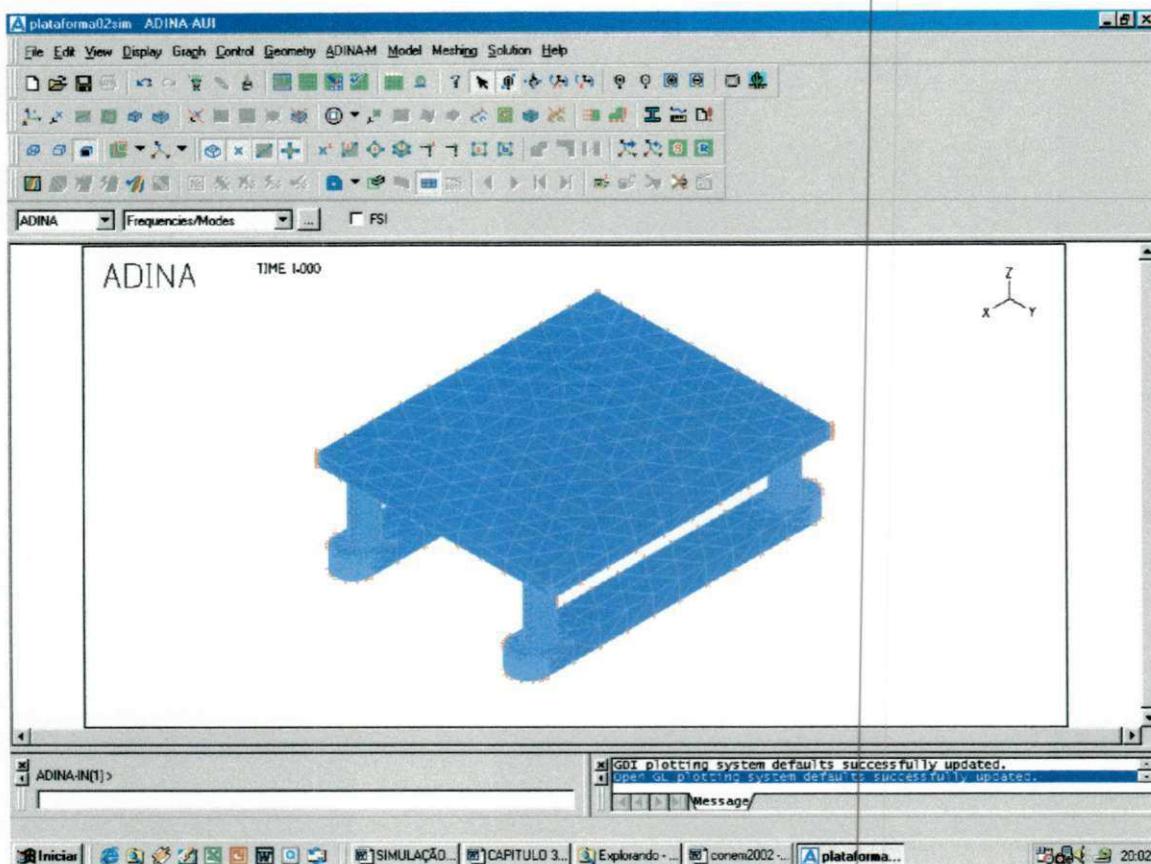


Figura 4.1 – Ambiente de simulação do ADINA-AUI

O quarto ambiente é o ADINA-PLOT responsável pela apresentação dos resultados, isto é, depois de gerado os arquivos da simulação nos ambientes ADINA-AUI, ADINA-F, ADINA-T e no ADINA-PLOT, os arquivos são carregados para apresentação dos resultados. Na figura 4.2, apresenta-se o ambiente de plotagem dos resultados no ADINA-PLOT.

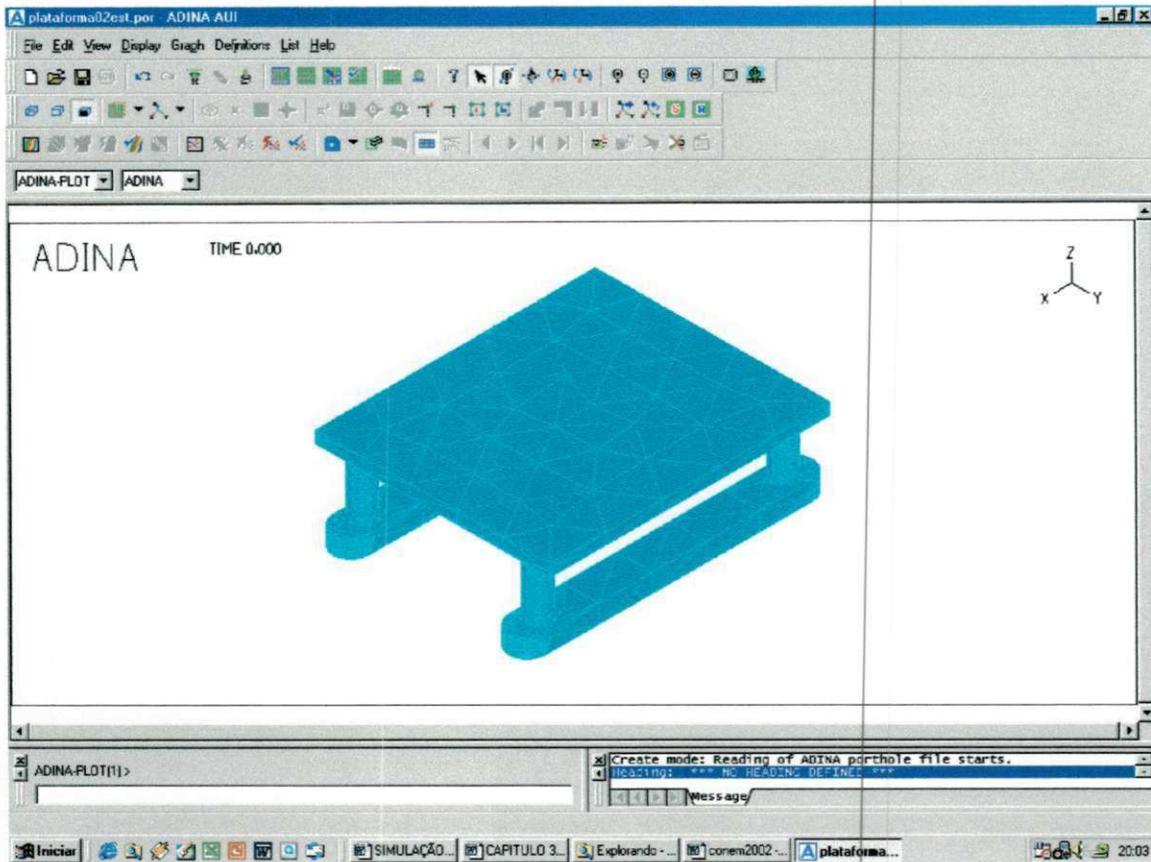


Figura 4.2 – Ambiente de plotagem dos resultados no ambiente ADINA-PLOT.

O método dos elementos finitos modela uma estrutura de duas formas distintas. O primeiro modelamento consiste em dividir a estrutura em um número de partes menores e mais simples. Estas partes são chamadas de elementos finitos e o processo de divisão da estrutura é chamado de discretização. Cada elemento é usualmente muito simples, como uma barra ou uma viga, o qual tem equação de movimento que pode ser facilmente resolvida ou aproximada. Cada elemento é limitado por pontos chamados nós, os quais o conecta aos outros elementos em sua vizinhança. Os conjuntos de elementos finitos e nós são chamados de malha de elementos finitos (Wolter, Sampaio & Cataldo, 1998).

A equação do movimento de cada elemento finito individual é então determinada e resolvida. Isso forma a segunda forma de aproximação no método. As soluções das equações dos elementos são aproximadas por uma combinação linear de polinômios de baixa ordem. Cada uma destas soluções polinomiais individuais é tornada compatível com a solução adjacente, (condições de continuidade), nos nós aos dois elementos. Essas

soluções são reunidas em um procedimento, resultando em matrizes de massa e rigidez globais. A solução do sistema de equações diferenciais descrevem os movimentos e/ou as vibrações da estrutura. Esse modelo global de massa e rigidez representa uma aproximação da estrutura que pode ser analisada e resolvida usando métodos de solução de sistemas de múltiplos graus de liberdade (Wolter, Sampaio & Cataldo, 1998).

4.3 Problemas de Autovalores e Análise Dinâmica.

4.3.1 Problemas de Autovalores

O ADINA possui os seguintes procedimentos para solução das equações que utilizam o Método dos elementos finitos em análise dinâmica. Em problemas de autovalores o ADINA utiliza a análise de frequências.

As frequências naturais e os seus modos de vibração de um sistema estrutural são calculados utilizando:

$${}^t_0 K \phi_i = \omega_i^2 M \phi_i \quad (4.3.1)$$

onde ${}^t_0 K$ é a matriz de rigidez do sistema para o tempo inicial, M é a matriz de massa do sistema, ω_i e ϕ_i é a frequência e o modo de vibração respectivamente para o modo i .

As frequências naturais e seus modos de vibração podem ser calculados pelo Método Determinante de Busca ou Método de Interação do Subespaço, (ADINA 7.5, 2000).

4.3.2 Análise Dinâmica

Para a Análise Dinâmica o ADINA utiliza:

- Integração Direta Step-by-Step:

Utiliza integração explícita no tempo usando o método da diferença central e a integração implícita no tempo usando o método de Newmark ou o método de Wilson - Theta (ADINA 7.5, 2000). A forma geral do sistema de equações diferenciais no tempo $t + \Delta t$, é dada por,

$$M^{t+\Delta t}\ddot{U} + C^{t+\Delta t}\dot{U} + K^{t+\Delta t}U = {}^{t+\Delta t}R \quad (4.3.2)$$

- **Análise da Superposição modal no tempo;**

Esse método utiliza a equação de elementos finitos governante usando a transformação:

$$U = \sum_{i=r}^s \phi_i x_i \quad (4.3.3)$$

onde ϕ_i , $i = r, \dots, s$ são os vetores modais, e x_i são os correspondentes deslocamentos. Os x_i são calculados pela solução da equação nodal, dada por,

$$\ddot{x}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{x}_i + \omega_i^2 x_i = r_i \quad (4.3.4)$$

onde ξ_i é o amortecimento crítico correspondente a frequência ω_i e

4.3.3 Autovalores e Autovetores para uma de viga bi-engastada

Este item tem como objetivo visualizar a precisão numérica no cálculo do problema dos autovalores utilizando o modelamento via elementos finitos utilizando o ADINA, onde se procura discretizar uma viga bi-engastada em quatro elementos e comparar os resultados, com os obtidos via solução exata.

4.3.3.1 Cálculo dos Autovalores: Solução Analítica e Numérica

Considera-se a viga bi-engastada, discretizada com quatro elementos, como apresentado na Figura 4.3.

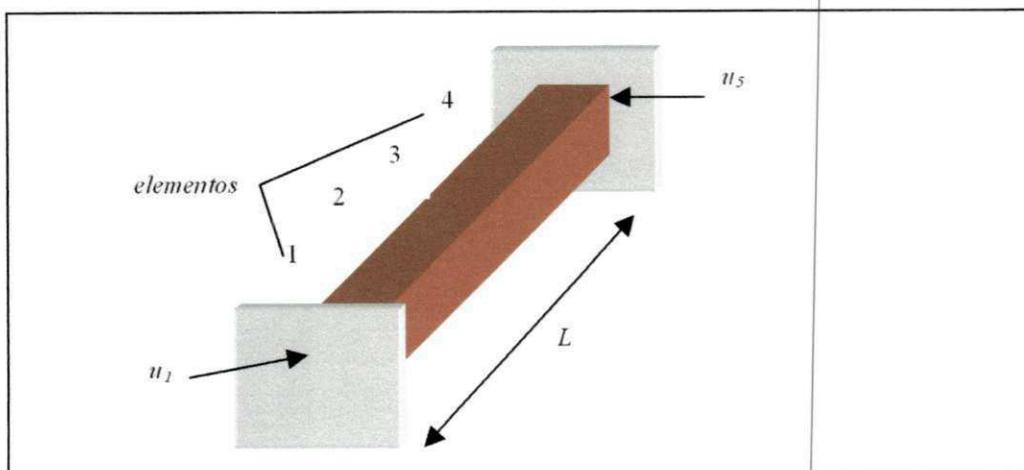


Figura 4.3 –Viga discretizada com quatro elementos

Na tabela 4.1, apresenta-se os parâmetros geométricos da viga.

Tabela 4.1 – Parâmetros da viga

PARÂMETROS	SÍMBOLOS	UNIDADES	VALORES
Módulo de Elasticidade	E	N/m^2	2×10^{11}
Comprimento da viga	L	m	1,00
Largura	A	m	0,1
Densidade	ρ	Kg/m^3	$7,8 \times 10^3$
Área	A	m^2	10^2
Momento de Inércia	I	m^4	10^{-6}

• Solução Analítica

Em linhas gerais, as matrizes de massa e rigidez global para o elemento de viga bi-engastada, discretizada com quatro elementos são obtidas, seguindo o seguinte roteiro:

- 1) Obtém-se a energia potencial elástica da barra para cada elemento da viga;
- 2) Aplicam-se as condições de contorno para cada elemento da viga;
- 3) Montam-se as matrizes de massa e rigidez para o primeiro elemento;
- 4) Montam-se as matrizes de massa e rigidez para o segundo e terceiro elemento;
- 5) Determinam-se as matrizes locais dos nós dos elementos 1 e 4;
- 6) Superpõem-se as matrizes de massa e de rigidez, para se obter as matrizes globais de massa e rigidez.
- 7) Calculam-se os autovalores com um programa previamente decodificado no ambiente Matlab;

Seguindo este roteiro têm-se:

- 1) Dividindo a viga em quatro elementos, obtêm-se para cada elemento de viga, a energia potencial elástica, na forma,

$$V_1(t) = \frac{4EA}{2l} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (4.3.1)$$

$$V_2(t) = \frac{4EA}{2l} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (4.3.2)$$

$$V_3(t) = \frac{4EA}{2l} \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (4.3.3)$$

$$V_4(t) = \frac{4EA}{2l} \begin{bmatrix} u_4 \\ u_5 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_4 \\ u_5 \end{bmatrix} \quad (4.3.4)$$

- 2) Aplicando as condições de contorno ($u_1 = 0$ e $L = l/4$) e ($u_5 = 0$ e $L=l/4$), para os engastes, têm-se:

$$V_1(t) = \frac{2EA}{l} \begin{bmatrix} 0 \\ u_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (4.3.5)$$

$$V_2(t) = \frac{2EA}{l} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (4.3.6)$$

$$V_3(t) = \frac{2EA}{l} \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (4.3.7)$$

$$V_4(t) = \frac{2EA}{l} \begin{bmatrix} u_4 \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_4 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.3.8)$$

- 3) Montam-se as matrizes de massa e rigidez para o primeiro elemento na forma,

$$[M] = \frac{\rho A l}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (4.3.9)$$

$$[K] = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -22l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (4.3.10)$$

- 4) As matrizes de massa para o segundo e terceiro elemento, substituindo l por $l/4$.

$$[M_2] = M_3 = \frac{\rho A l}{1680} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (4.3.11)$$

$$[K_2] = K_3 = \frac{64EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -22l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (4.3.12)$$

5) Montam-se as matrizes locais aplicando as condições de contorno para os elementos 1 e 4.

$$[M_1] = \frac{\rho A l}{1680} \begin{bmatrix} 156 & -22l \\ -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (4.3.13)$$

$$[K_1] = \frac{64EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & -6l \\ -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (4.3.14)$$

$$[M_4] = \frac{\rho A l}{1680} \begin{bmatrix} 156 & 22l \\ 22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (4.3.15)$$

$$[K_4] = \frac{64EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l \\ 6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (4.3.16)$$

6) Superpondo as matrizes, obtém-se:

$$[M] = \frac{\rho A l}{1680} \times \begin{bmatrix} 156+156 & -22l+22l & 54 & -13l & 0 & 0 \\ -22l+22l & 4l^2+4l^2 & 13l & -3l^2 & 0 & 0 \\ 54 & 13l & 156+156 & -22l+22l & 54 & -13l \\ -13l & -3l^2 & -22l+22l & 4l^2+4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 0 & 0 & 54 & 13l & 156+156 & -22l+22l \\ 0 & 0 & -13l & -3l^2 & -22l+22l & 4l^2+4l^2 \end{bmatrix} \quad (4.3.17)$$

Simplificando, tem-se;

$$[M] = \frac{\rho A l}{1680} \times \begin{bmatrix} 312 & 0 & 54 & -13l & 0 & 0 \\ 0 & 8l^2 & 13l & -3l^2 & 0 & 0 \\ 54 & 13l & 312 & 0 & 54 & -13l \\ -13l & -3l^2 & 0 & 8l^2 & 13l & -3l^2 \\ 0 & 0 & 54 & 13l & 312 & 0 \\ 0 & 0 & -13l & -3l^2 & 0 & 8l^2 \end{bmatrix} \quad (4.3.18)$$

De forma análoga para a matriz de rigidez,

$$[K] = \frac{64EI}{l^3} \times \begin{bmatrix} 12+12 & -6l+6l & -12 & 6l & 0 & 0 \\ -6l+6l & 4l^2+4l^2 & -6l & 2l^2 & 0 & 0 \\ -12 & -6l & 12+12 & -6l+6l & -12 & 6l \\ 6l & 2l^2 & -6l+6l & 4l^2+4l^2 & -6l & 2l^2 \\ 0 & 0 & -12 & -6l & 12+12 & -6l+6l \\ 0 & 0 & 6l & 2l^2 & -6l+6l & 4l^2+4l^2 \end{bmatrix} \quad (4.3.19)$$

Simplificando, obtém-se;

$$[K] = \frac{64EI}{l^3} \times \begin{bmatrix} 24 & 0 & -12 & 6l & 0 & 0 \\ 0 & 8l^2 & -6l & 2l^2 & 0 & 0 \\ -12 & -6l & 24 & 0 & -12 & 6l \\ 6l & 2l^2 & 0 & 8l^2 & -6l & 2l^2 \\ 0 & 0 & -12 & -6l & 24 & 0 \\ 0 & 0 & 6l & 2l^2 & 0 & 8l^2 \end{bmatrix} \quad (4.3.20)$$

7) Para se obter as frequências naturais, utiliza-se equação na forma, $[\hat{K}] = [M]^{-1/2} [K] [M]^{-1/2}$ (Huebner & Thorton, 1982). Na tabela 4.2, apresenta-se às frequências naturais, obtidas a partir da solução exata.

Tabela 4.2 – Frequências Naturais: Solução exata

Frequência Natural [Hz]	
1	$1,08 \times 10^3$
2	$2,50 \times 10^3$
3	$3,10 \times 10^3$
4	$3,75 \times 10^3$

- **Solução Numérica**

Para a solução numérica, se faz necessário construir e/ou montar o elemento de viga no ambiente ADINA 7.5. A figura 4.4, mostra a configuração geométrica do modelo físico, discretizada com 4 elementos.

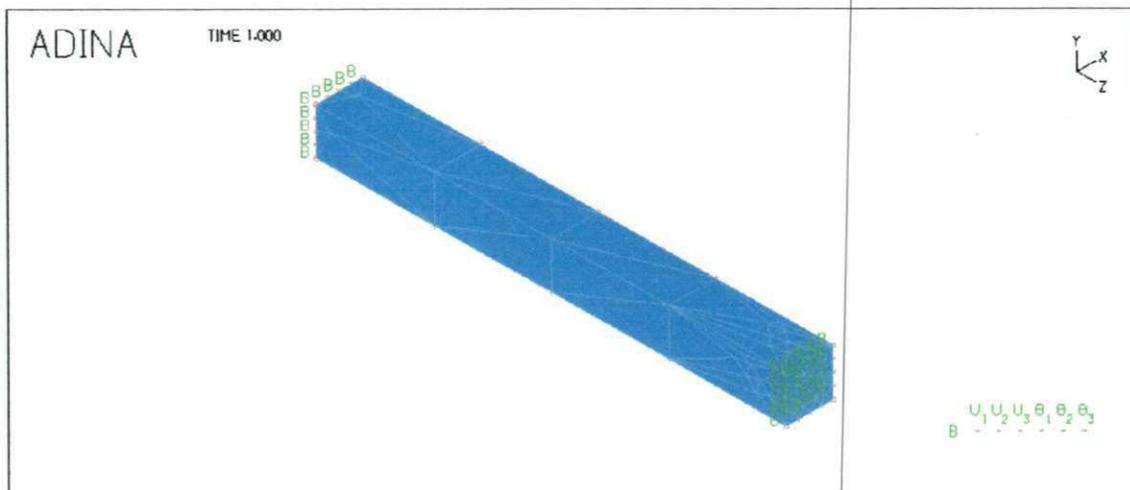


Figura 4.4 – Modelo de viga construída no ADINA 7.5 considerando quatro elementos de discretização

Na Figura 4.5, apresenta-se os resultados da simulação do modelo de viga com 4 elementos, onde se procura mostrar os seus modos de vibração, utilizando-se as mesmas propriedades mecânicas utilizadas no modelo exato.

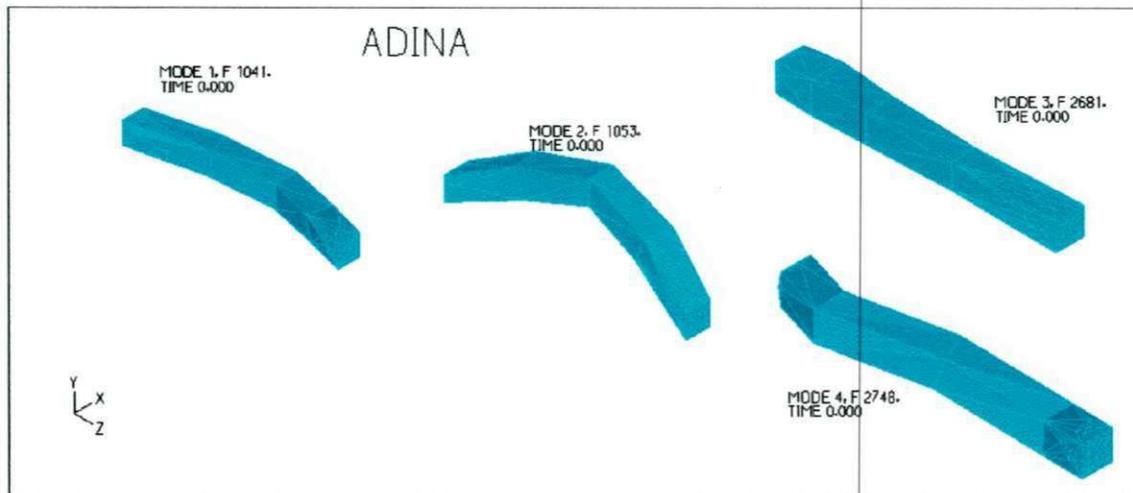


Figura 4.5 – Modos de vibração da viga bi-engastada

As frequências naturais assim obtidas são dadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Frequências naturais para a viga bi-engastada

```

ADINA: AUI version 7.5.0, 23 August 2002:
  Licensed from ADINA R&D, Inc.
Finite element program ADINA, response range type mode-shape:
Listing for zone WHOLE_MODEL:
MODE
NUMBER  FREQUENCY
      1  1.04145E+03
      2  2.68110E+03
      3  2.76367E+03
      4  3.98742E+03

*** End of list.***

```

Na tabela 4.4, apresenta-se uma comparação entre os resultados obtidos a partir da solução exata e solução numérica, onde se mostra o erro em porcentagem do modelo exato em relação ao modelo por elementos finitos.

Tabela 4.4 – Frequências naturais: Solução exata x Método dos elementos finitos

Frequências Naturais			
f_n	Solução Analítica [Hz]	Solução Numérica [Hz]	Erro %
1	$1,08 \times 10^3$	$1,04 \times 10^3$	3,70
2	$2,50 \times 10^3$	$2,68 \times 10^3$	-7,20
3	$3,10 \times 10^3$	$2,76 \times 10^3$	10,96
4	$3,75 \times 10^3$	$3,98 \times 10^3$	-6,13

Observando-se a tabela 4.4, pode-se visualizar claramente que o erro em porcentagem para o terceiro modo de vibração – solução exata, em relação à numérica girou em torno de 10,96%. O que pode ser considerado um erro relativamente considerável. O que nos indica que seja necessário para aproximar os resultados da solução exata em numérica, um refinamento da malha quando se utiliza o método dos elementos finitos. Daí, a necessidade de se processar alguns testes para se verificar a robustez de pacotes comerciais para análise de estruturas mecânicas em geral.

4.4 Análise no Domínio da Frequência (ADINA 7.5)

O ADINA 7.5 possui alta capacidade para caracterização de respostas estruturais no domínio da frequência. A resposta dinâmica de uma estrutura submetida a uma dada excitação pode ser analisada. Pode-se também analisar a resposta estrutural para vibrações harmônicas (periódicas) ou vibrações aleatórias.

4.4.1 Análise de Vibrações Harmônicas

É de extrema importância determinar a resposta estrutural para aplicação de cargas harmônicas e aleatórias. Estas respostas são expressas como a superposição das respostas modais.

O sistema de equações diferenciais em forma matricial pode ser dada por,

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = \sum_{k=1}^N F_k(t) \quad (4.4.1)$$

onde, M, C e K, são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, obtidas a partir do modelamento via elementos finitos, sendo N o número de cargas a ser considerada. Ao considerar o modo da superposição, a equação governante será:

$$\ddot{x}_i + 2\xi_i\omega_i\dot{x}_i + \omega_i^2x_i = \sum_{k=1}^N \Gamma_i^k b_k(t) \quad (4.4.2)$$

onde Γ_i^k é o fator de participação modal para a carga k e o modo i. E a função $b_k(t)$ é,

$$b_k(t) = b_{k0} \sin(\omega_k t + \alpha_k) \quad (4.4.4)$$

onde b_{k0} a amplitude da força e ω_k é a frequência da força de excitação.

A resposta modal para o i-ésimo modo de vibração dada por,

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^n (A_{ki} \sin(\omega_k t + \alpha_k) - B_{ki} \cos(\omega_k t + \alpha_k)) \quad (4.4.5)$$

onde

$$A_{ki} = \frac{b_{k0} \Gamma_i^k}{\omega_i^2} \cdot \frac{1 - \left(\frac{\omega_k}{\omega_i}\right)^2}{\left(1 - \left(\frac{\omega_k}{\omega_i}\right)^2\right)^2 + \left(2 \frac{\omega_k}{\omega_i} \xi_i\right)^2} \quad (4.4.6)$$

$$B_{ki} = \frac{b_{k0} \Gamma_i^k}{\omega_i^2} \cdot \frac{2 \frac{\omega_k}{\omega_i} \xi_i}{\left(1 - \left(\frac{\omega_k}{\omega_i}\right)^2\right)^2 + \left(2 \frac{\omega_k}{\omega_i} \xi_i\right)^2} \quad (4.4.7)$$

e a solução é então,

$$u(t) = \sum_{i=1}^n \phi^{(i)} \sum_{k=1}^N x_{ki}(t) \quad (4.4.8)$$

onde n é o número de autovetores considerados na superposição.

4.5 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. 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.

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 4.5, são apresentadas as dimensões da estrutura da Plataforma semi-submersível.

Tabela 4.5 - Dimensões da estrutura: Plataforma semi-submersível

DIMENSÕES DA ESTRUTURA	
Convés	80,0 x 80,0 (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)
Espessura da coluna	3"

Apresentam-se as propriedades do material utilizado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Característica do material.

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

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.

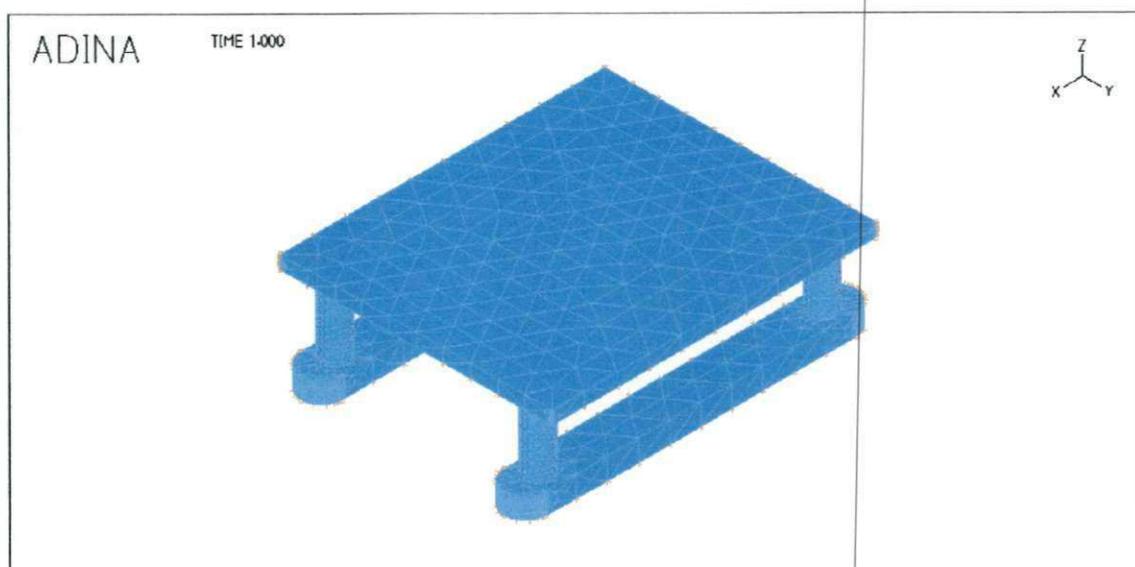


Figura 4.6 – Modelagem da Plataforma Semi-submersível

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 proposto anteriormente. A modelagem da coluna mostra claramente toda a área em que foi aplicada a força de excitação. Na Figura 4.7 apresenta-se a coluna da plataforma modelada com Elementos Finitos.

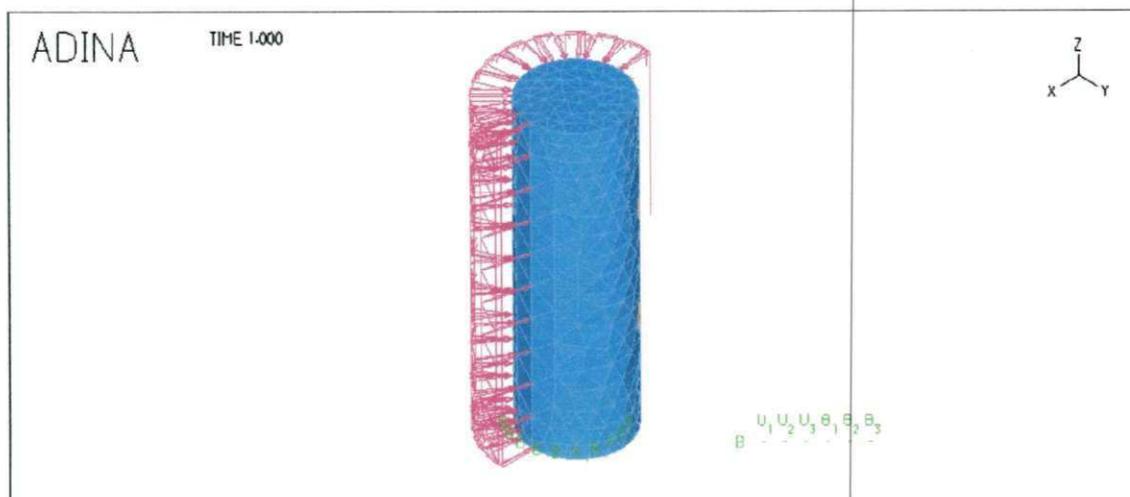


Figura 4.7 – Modelagem da coluna da Plataforma Semi-submersível sob excitação

Após a construção dos modelos dos sistemas no ADINA 7.5, inicia-se as simulações, onde pode ser introduzido no software o tipo de análise que se deseja obter.

4.6 Conclusão

Neste capítulo foi apresentada uma introdução ao “Software” comercial de simulação via Elementos Finitos ADINA 7.5, mostrando os seus ambientes de simulação e de plotagem de resultados gráficos. Problemas de autovalores e análise dinâmica são apresentados e os métodos utilizados para análise.

Para se verificar a eficácia do “software”, comparou-se os resultados de cálculos de autovalores para solução exata e solução numérica utilizando o ADINA 7.5. Foram obtidos resultados que mostram o pacote com rendimento considerável, sendo necessário um refino da malha para se obter resultados mais precisos.

No próximo capítulo, apresentam-se resultados das simulações no domínio da frequência, onde se procura comparar resultados utilizando-se curvas dos espectros de resposta, utilizando-se como fontes de excitações às equações (3.2.1 e 3.2.20).

CAPITULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Introdução

Neste capítulo, apresentam-se resultados de simulação digital para cálculos dos parâmetros modais como frequências naturais e seus respectivos modos de vibração. Além dos modos de vibração do sistema, apresenta-se também a estrutura da plataforma deformada de acordo com o seu modo de vibração correspondente. As fontes de excitação que são aplicadas ao sistema são do tipo harmônica (periódica), e aquela da forma do modelo matemático proposto no capítulo 3, isto é, o sinal obtido a partir de síntese de sinais periódicos, cujas propriedades e vantagens já foram citadas. Trabalhar com este pacote demanda tempo e paciência. Os resultados em linhas gerais que serão apresentados neste capítulo, são monitorados da seguinte forma: Monta-se a estrutura de plataforma submersível com onze mil nós, onde o tamanho e/ou ordem do sistema, isto é, o número de graus de liberdade é obtido da expressão: $Ords = N^{\circ}nós \times N^{\circ}glpnós - re$, onde, $Ords$: é número de graus de liberdade da estrutura da plataforma; $N^{\circ}nós$: é o número de nós da estrutura; $N^{\circ}glpnós$: é número de graus de liberdade por nó e r_e : é número de restrições.

No caso específico deste trabalho, não se considerou os movimentos de corpo rígido, isto é, as três translações e três rotações, o que redundaria em mais vinte e quatro graus de liberdade a ser considerado no modelo de elementos finitos. Uma vez montadas as matrizes de massa e rigidez, calculam-se os autovalores e autovetores associados, o que permite montar e/ou visualizar os modos de vibração da estrutura. Em seguida, procura-se verificar se o modelo de malha gerado para a obtenção nos cálculos dos autovalores se encontram consistentes. Uma forma de se verificar a regularidade dos valores obtidos nos cálculos dos autovalores, seria utilizar um outro “Software” comercial, a exemplo do ANSYS, ASTRAN, SAP90 entre outros que existem à disposição no mercado, o que seria uma tarefa tediosa. Sem mencionar o custo para se adquiri-los. Para uma avaliação qualitativa dos dados obtidos, procurou-se excitar a estrutura com o sinal de excitação proposto (simulando a onda do mar), 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 frequências naturais obtidas a partir do modelo de elementos finitos. Em seguida, procura-se excitar também a estrutura, com o mesmo sinal de excitação, mais agora modelado de tal forma que se leve em consideração alguns parâmetros do fluido. O que caracterizará num primeiro momento, a interação fluido estrutura. Deste modo, resultados dos espectros das curvas de respostas em frequências são apresentados e discutidos.

5.2 Identificação dos Parâmetros Modais do Sistema

Na Figura 5.1, a configuração geométrica do modelo físico de uma estrutura de plataforma semi-submersível utilizada neste trabalho, onde se podem visualizar com riqueza de detalhes, a estrutura na posição não deformada, e a superposição da estrutura deformada para os três primeiros modos de vibração. Como procedimento para análise, escolheu-se os três primeiro modos de vibração e em seguida procurou-se processar uma variação do diâmetro da coluna da plataforma e se comparar os resultados. As condições de contorno utilizadas abaixo considera que os flutuadores estão fixos, apenas as colunas sofrerão deformações.

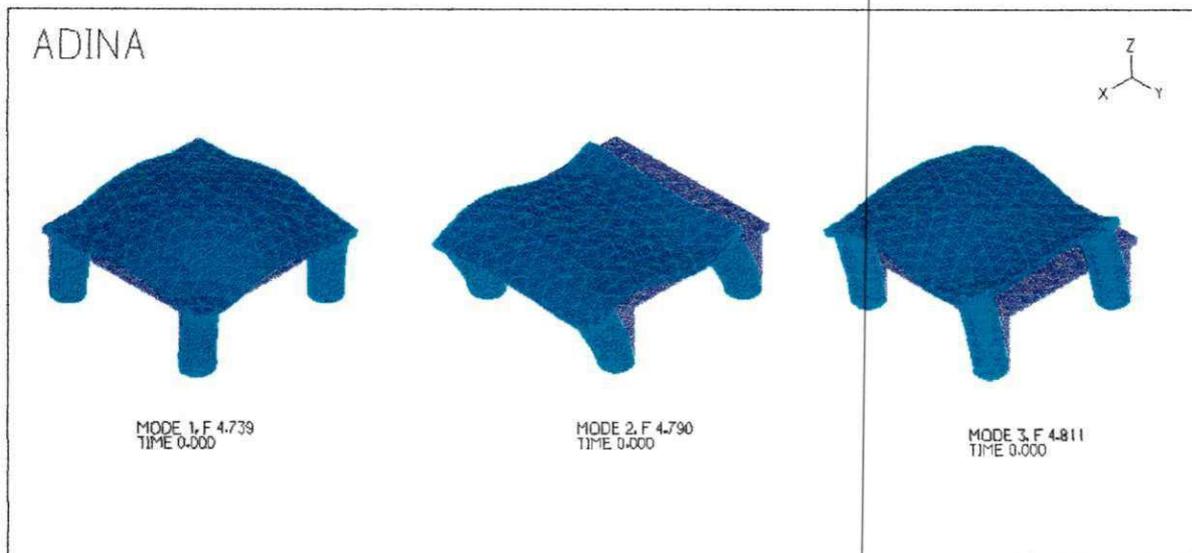


Figura 5.1 – Modos de vibração da plataforma semi-submersível

A identificação dos parâmetros modais, isto é, os cálculos dos autovalores e autovetores possibilitam, num primeiro momento, monitorar se existem alguns tipos de fratura na estrutura, as possíveis deformações causadas por esforços externos, etc. Na Tabela 5.1, apresenta-se as frequências naturais e seus respectivos modos de vibração considerando-se um diâmetro da coluna igual a 8m. A simulação foi processada considerando uma faixa de frequência compreendida entre 0 a 50 Hz, onde considerou-se 1024 para amostragem dos sinais de resposta que se deseja monitorar. A estrutura está com seus flutuadores fixos, portanto sem considerar suas deformações.

Tabela 5.1 – Frequências naturais da plataforma semi-submersível

ADINA: AUI version 7.5.0, 5 June 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	5.29974E+00
2	3.22777E+01
3	3.34937E+01
*** End of list.***	

Uma forma de se verificar se o cálculo dos autovalores e em consequência se o cálculo na obtenção das frequências naturais foram obtidas de forma correta, oriunda da

geração da malha e montagem das matrizes de massa e rigidez, é excitar a estrutura e observar se os picos máximos dos espectros das respostas encontram-se centradas nas suas respectivas frequências naturais. Naturalmente, este método trata de uma avaliação qualitativa de avaliação e regularidade dos resultados. Como colocado anteriormente, o ideal seria utilizar outro pacote computacional e comparar os resultado. Na figura 5.2, mostra-se o espectro da resposta, onde se podem observar os picos máximos de amplitudes correspondentes aos três primeiros modos de vibrações, e concomitantemente, localizar as três frequências naturais correspondentes aos seus respectivos modos de vibrações, ver tabela 5.1.

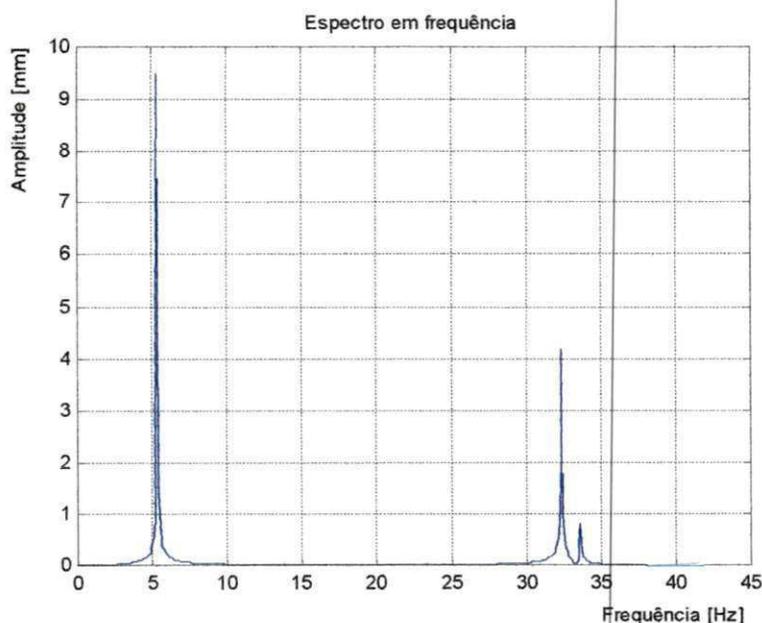


Figura 5.2 – Espectro da resposta em frequência

Como se pode observar pela figura 5.2, os picos máximos do espectro de resposta para um diâmetro da coluna da plataforma de 8m, encontra-se centradas para os três primeiro modos de vibrações em torno de 5.2, 32.213 e 33.4 Hz, respectivamente. Esta avaliação e/ou método, embora de forma qualitativa, nós acena um bom critério de teste para se verificar a regularidade dos resultados, no processo de geração da malha e a potencialidade e/ou robustez do “Software” utilizado.

Alguns resultados para se poder verificar se o método de avaliação utilizado, é consistente, procura-se variar o diâmetro das colunas da plataforma para diversas situações

utilizando o mesmo sinal de onda proposto. Isto é de extrema importância, pois se existir uma falha ou defeito na estrutura, a forma das curvas dos espectros de resposta poderá sofrer modificações. Um indicador deste fato, por exemplo, é que as curvas dos espectros das respostas não aparecem mais de forma contínua, a exemplo da Figura 5.2, mais sim, com alguma irregularidade.

5.2.1 Variação no diâmetro da coluna da Plataforma

Na Tabela 5.2, apresenta-se os cálculos das frequências naturais considerando um diâmetro de 10 metros de comprimento.

Tabela 5.2 – Frequências naturais da plataforma semi-submersível para diâmetro $d= 10m$.

ADINA: AUI version 7.5.0, 5 June 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	6.60642E+00
2	3.34937E+01
3	3.96297E+01
*** End of list.***	

De forma análoga, apresenta-se na Figura 5.3 o espectro da resposta para os três primeiros modos de vibrações.

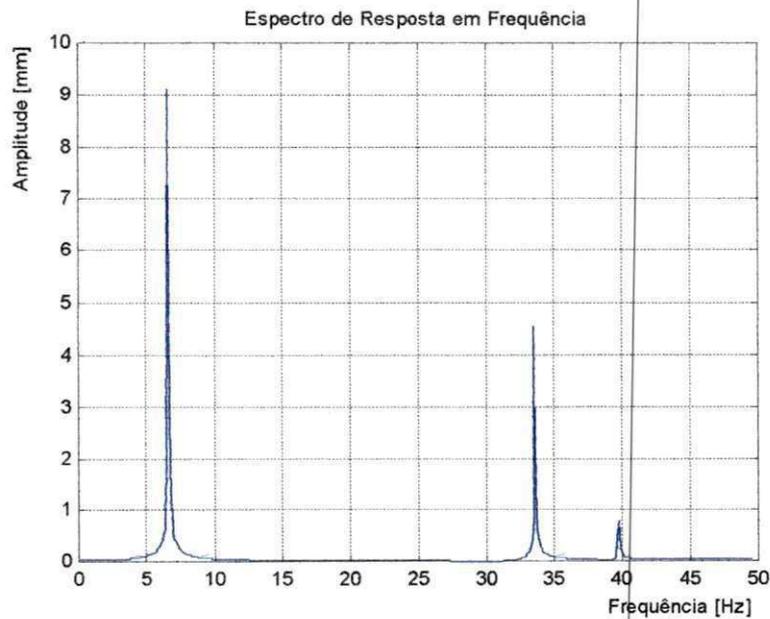


Figura 5.3 – Espectro de resposta em frequência para as três frequências naturais $d=10m$

Observa-se também, que os três picos máximos de amplitudes correspondentes as três frequências naturais associadas aos seus respectivos modos de vibração, encontram-se centradas nestas frequências. Como era de se esperar, qualquer variação nos parâmetros geométricos da estrutura e/ou nas propriedades mecânicas dos materiais utilizado acarreta variações nos cálculos dos autovalores e em conseqüência nas suas respectivas frequências naturais, e conseqüentemente, nas amplitudes dos espectros das respostas.

De forma análoga, apresentam-se na tabela 5.3 e Figura 5.4, os cálculos das frequências naturais e o espectro da resposta para uma situação onde se considera o diâmetro da coluna igual 12 metros. Como se pode observar, a regularidade dos resultados utilizando-se este método de avaliação para testar se a malha de elementos finitos, mais uma vez, indica que a montagem da malha se processou de forma adequada.

Tabela 5.3 – Frequências naturais da plataforma semi-submersível
para diâmetro $d= 12m$.

ADINA: AUI version 7.5.0, 5 June 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	7.90116E+00
2	3.34937E+01
3	4.65620E+01
*** End of list.***	

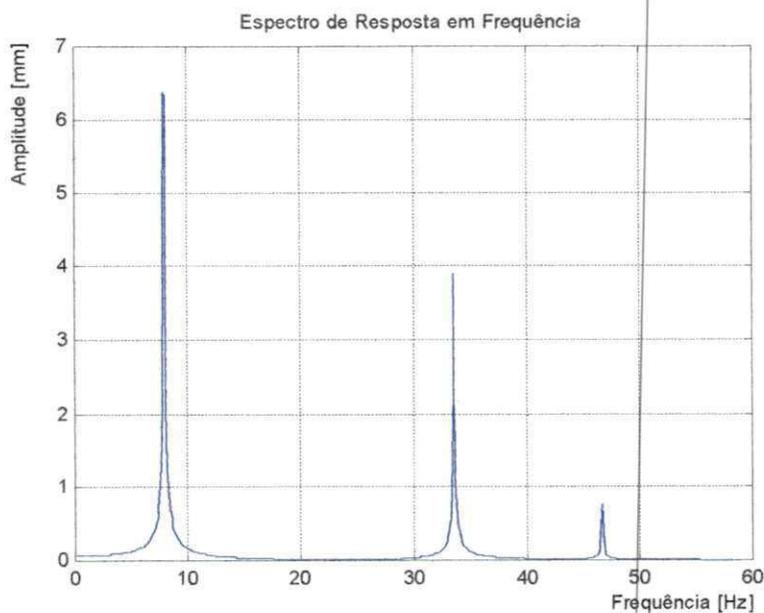


Figura 5.4 –Espectro de Resposta em Frequência para as três primeiras frequências naturais
 $d = 12m$

Na Figura 5.5, apresenta-se o resumo dos resultados da variação das relações diâmetros das colunas versus frequências naturais para os três casos considerados.

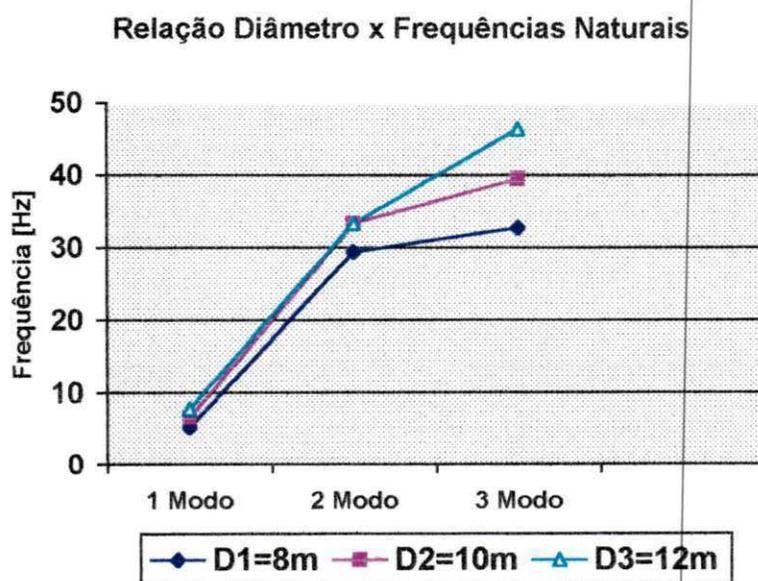


Figura 5.5 – Gráfico que relaciona as frequências naturais e seus respectivos modos de vibração com a variação do diâmetro da coluna da plataforma

Analisando os gráficos das relações entre as frequências naturais e seus respectivos modos de vibração, pode-se observar um aumento da sensibilidade dos parâmetros avaliados, variação das frequências naturais de vibração, quando se varia o diâmetro da coluna da plataforma. Para o primeiro modo de vibração os valores das frequências estão próximos, neste caso a variação na rigidez da estrutura não influenciou na frequência natural. Para o segundo modo de vibração os valores das frequências naturais para os diâmetros de 10 e 12 metros ficaram próximos com aumento da rigidez em relação ao diâmetro de 8 metros. Para o terceiro modo de vibração os valores para os três diâmetros ficaram dispersos com o aumento da rigidez. É importante conhecer cada modo de vibração associado a cada frequência natural para evitar que a estrutura trabalhe e seja projetada próxima de frequências de excitações de fontes de perturbações externas.

5.2.2 Força de Excitação de Impacto e Modelo Proposto

Neste item, procura-se utilizar fontes de excitação (força) impulsivas do tipo existente no próprio “Software”, mais agora interagindo somente sobre as colunas de sustentação da plataforma semi-submersível. O objetivo de se utilizar este tipo de excitação

é comparar com os resultados já apresentados e discutidos em relação aos espectros de resposta das Figuras 5.2, 5.3 e 5.4. Para uma situação genérica, apresenta-se na Figura 5.6 os cinco primeiros modos de vibração de uma coluna de sustentação. Como se pode observar neste caso, o primeiro e segundo modo de vibração, apresentam valores de frequências naturais muito próximos, isto é, em torno de 9.94 e 9.96 Hz. Neste caso, fica difícil de se localizar os dois picos máximos no espectro de resposta correspondentes as duas frequências naturais associadas. Daí, a preocupação patente na análise do comportamento dinâmico de estruturas em geral, se determinar a priori os autovalores do sistema para uma análise mais laboriosa e consistente do problema que se deseja avaliar. Se por exemplo, aparecem autovalores repetidos e/ou a matriz de rigidez não é definida positiva, isto pode sugerir, que a malha de elementos finitos não foi montada de forma adequada ou houve equívocos nos dados de entradas para alimentar o sistema, e concomitantemente, os cálculos dos autovalores e autovetores.

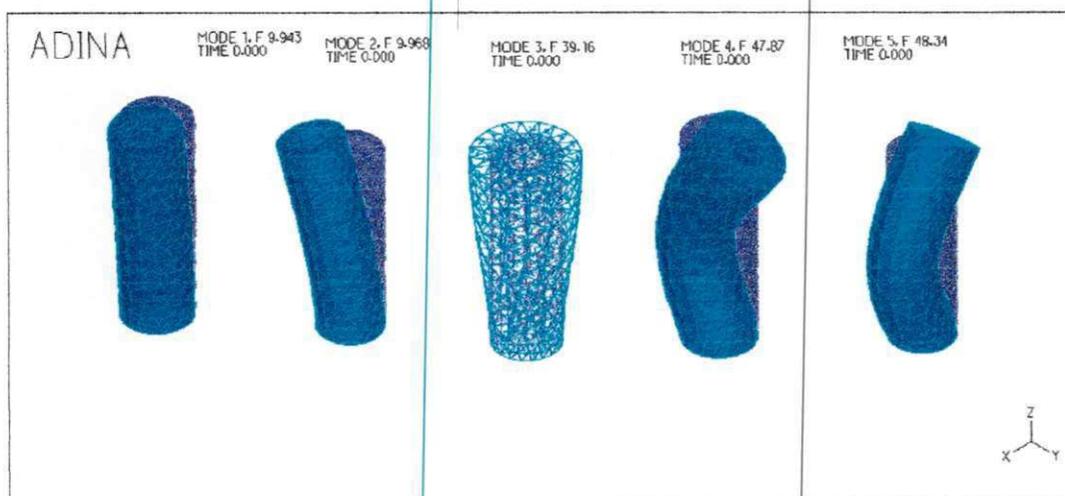


Figura 5.6 – Configuração dos modos de vibração da coluna da plataforma semi-submersível

5.2.2.1 Excitação de Impacto – Impulsional: atuando na coluna de 8 metros de diâmetros

Na Figura 5.7 (a e b, c e d, e e f), apresentam-se às repostas em deslocamento no domínio do tempo e os seus respectivos espectros, para forças de impactos e/ou impulsionais de 1000, 2000 e 3000 Newton, respectivamente.

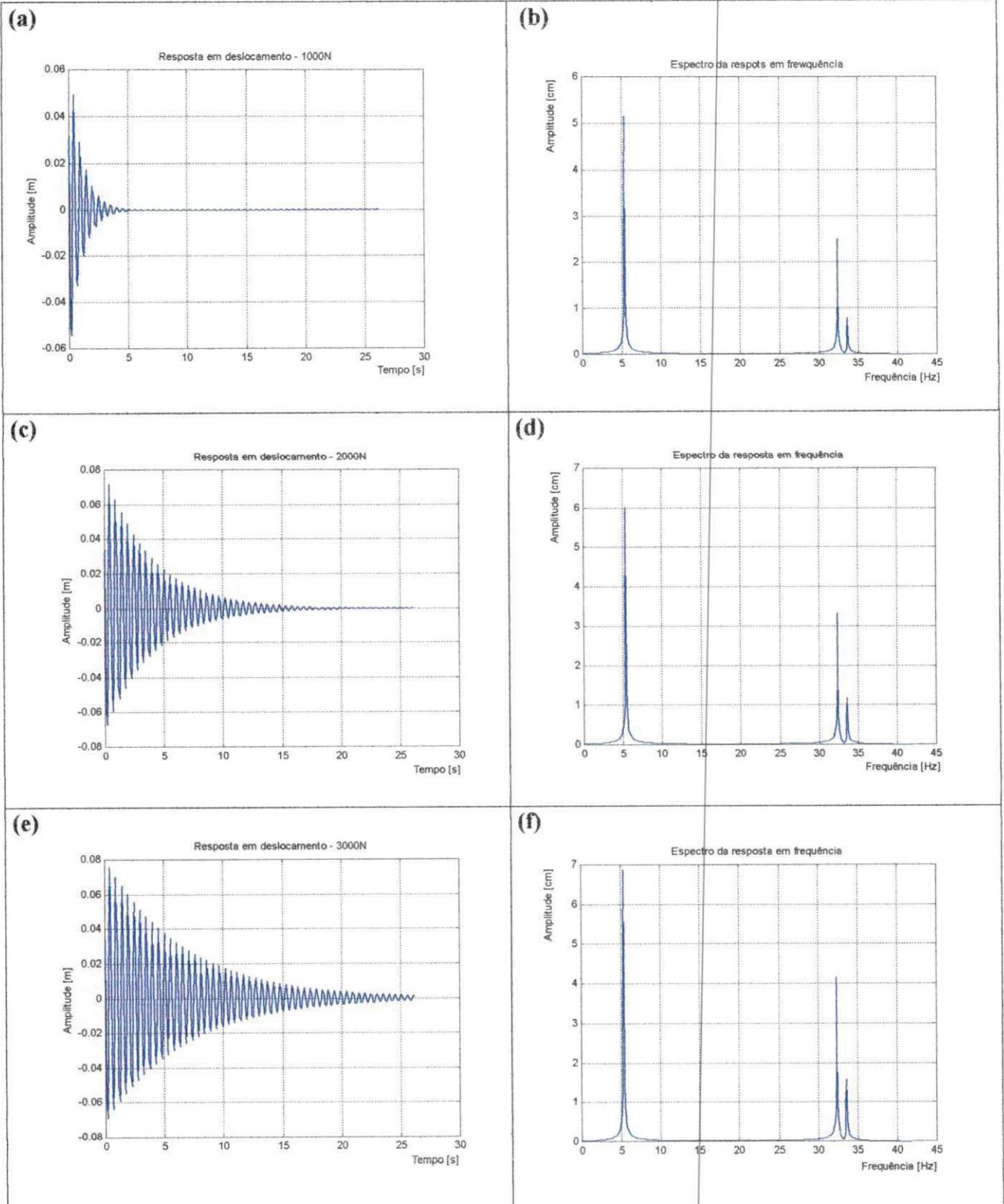


Figura 5.7 - Resposta em deslocamentos e seus respectivos espectros.

Sem perda de generalidades, a excitação de impacto é equivalente a uma excitação impulsional, isto é, a energia contida no sinal é inversamente proporcional ao intervalo de tempo da força e da sua amplitude. O intervalo de duração da força impulsional, encontra-se diretamente associada à banda de frequência que se deseja excitar. Se desejar excitar a estrutura nas altas frequências, procura-se excitar a estrutura com um martelo com a cabeça rígida com um intervalo de duração o mais curto possível. Caso contrário, para baixas frequências. Naturalmente, este é um procedimento utilizado quando se deseja trabalhar num procedimento experimental.

Como se pode observar pelos pares das Figuras 5.7 ((a, b), (c, d), (e, f)), as frequências naturais encontram-se localizadas em torno dos picos máximos dos espectros de respostas para os três modos de vibrações, independentemente, das amplitudes das forças impulsivas utilizadas. Nas situações analisadas, pode-se perceber claramente, as variações nos picos de amplitudes máximas das respostas no domínio da frequência, e destacar qualitativamente, suas variações em função das amplitudes das forças impulsivas.

5.2.2.2 Aplicação do modelo de Onda do Mar proposto

O modelo de onda proposto, equação (3.2.12) é aplicado à coluna da plataforma semi-submersível com o objetivo de simular a interação das ondas em alto mar sobre a estrutura. A equação (3.2.17), é utilizada agora considerando a Interação Fluido – Estrutura (Oliveira, 2002), para excitar a estrutura. Considerou-se 11000 nós, onde cada nó possui possuindo 03 graus de liberdade, redundando num total de 33000 graus de liberdade para a estrutura.

Para o espectro do sinal da Figura 5.8, observa-se que o sinal possui um conteúdo de energia plana, isto é, possui as mesmas propriedades estatísticas de um ruído branco, ou seja, variância constante, função de autocorrelação máxima, em $t=0$, etc.

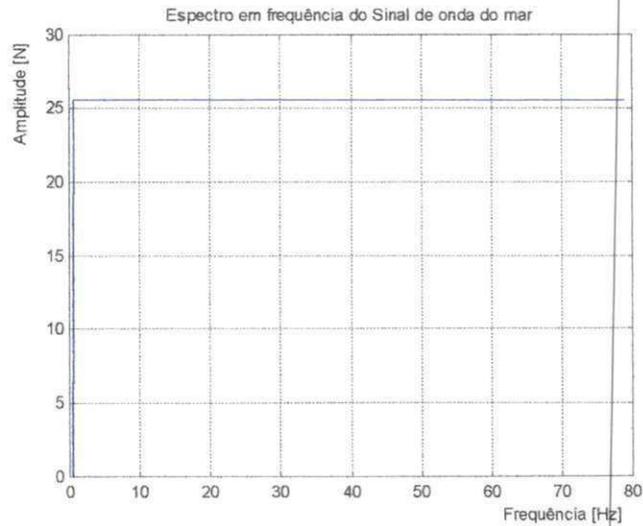


Figura 5.8 – Espectro do sinal de onda proposto

O espectro plano da fonte de excitação fisicamente significa, que a energia introduzida no sistema excita os modos de vibração com um conteúdo de energia distribuído de forma uniforme. Significa também, que não há perigo de se violar o princípio da linearidade do sistema, isto é, pode-se aplicar a Transformada de Fourier Rápida (FFT).

Apresenta-se na figura 5.9 o espectro da resposta, quando se submete à coluna da plataforma com excitação, a partir do modelo de onda dado pela equação (3.2.9).

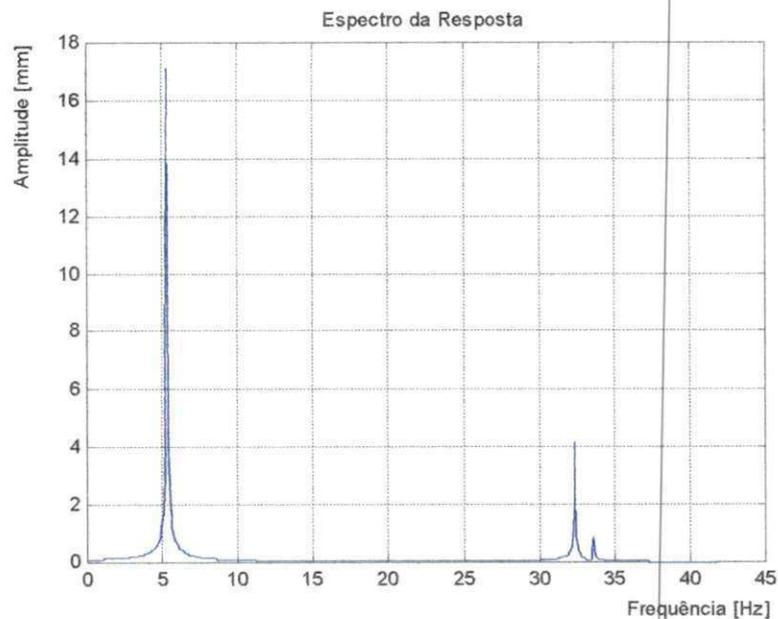


Figura 5.9 – Espectro da resposta da coluna para excitação de onda do mar

Observa-se na figura 5.9, um aumento significativo das amplitudes dos espectros para o primeiro modo em relação ao segundo e terceiro modo. Isto quer significa que a força de excitação foi mais significativa na direção X da coluna da plataforma.

5.2.2.3 Aplicação do modelo de onda considerando a Interação Fluido - Estrutura

Modelo que caracteriza a Interação Fluido - Estrutura, que é proposto neste trabalho, para excitar e simular a estrutura é aquele dado pela equação (3.2.17), e repetida aqui para facilitar o delineamento do texto.

$$F_n(y,t) = -\rho A_n y \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\omega_n^2 y/g} \beta_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t) \quad (3.2.17)$$

Apresenta-se nas Figuras 5.11 (a, b e c) os espectros das respostas para os três modos de vibrações, utilizando-se sinal de excitação de onda inicialmente proposto equação (3.2.9) (Shroeder, 1970 e Oliveira, 1997), para o modelo físico de um sistema genérico de três graus de liberdade, Figura 10. Em seguida, procura-se apresentar os espectros das respostas para o mesmo sistema, onde se utiliza o modelo do sinal de excitação dado pela equação (3.2.17), mas agora, considerando-se o comprimento de onda, a densidade da água e os demais parâmetros de interesse na geração do sinal, que é também, um modelo de perfil de onda proposto e discutido no capítulo 3, para o mesmo sistema da Figura 5.10.

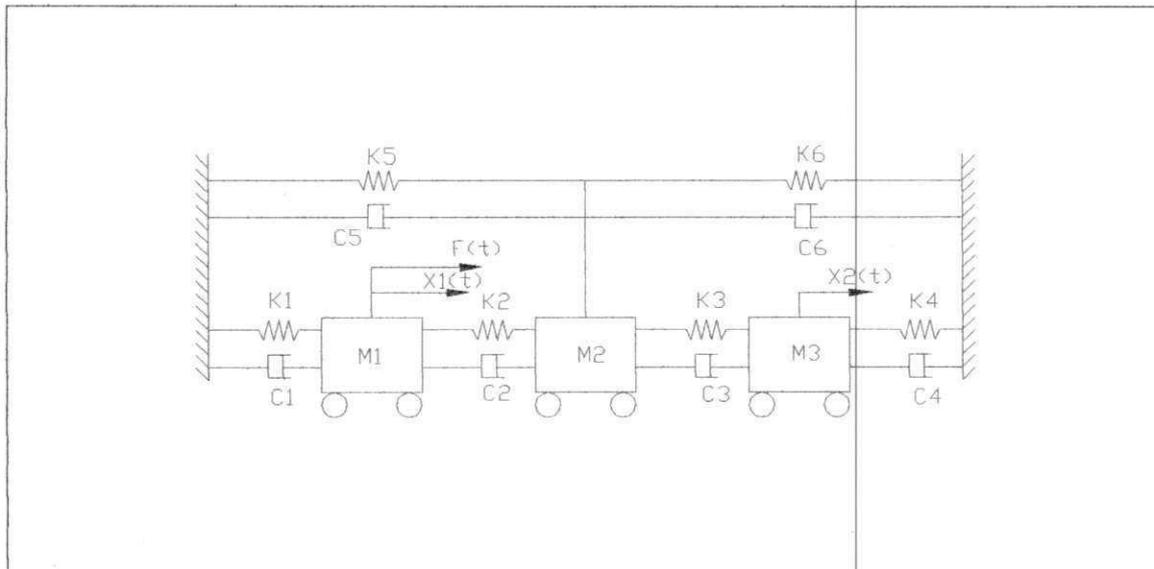
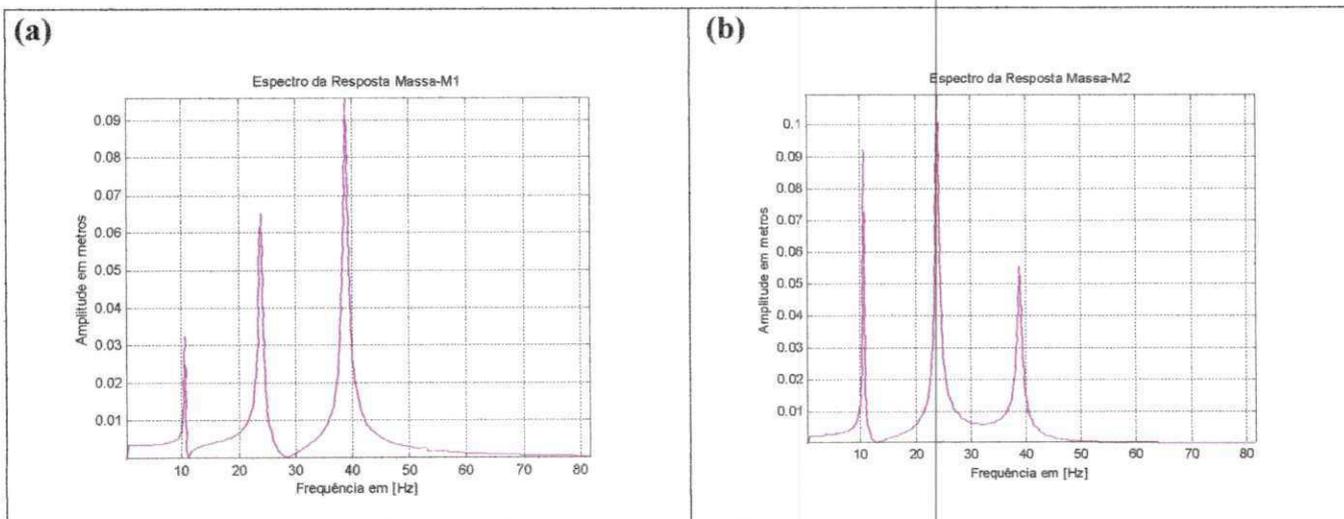
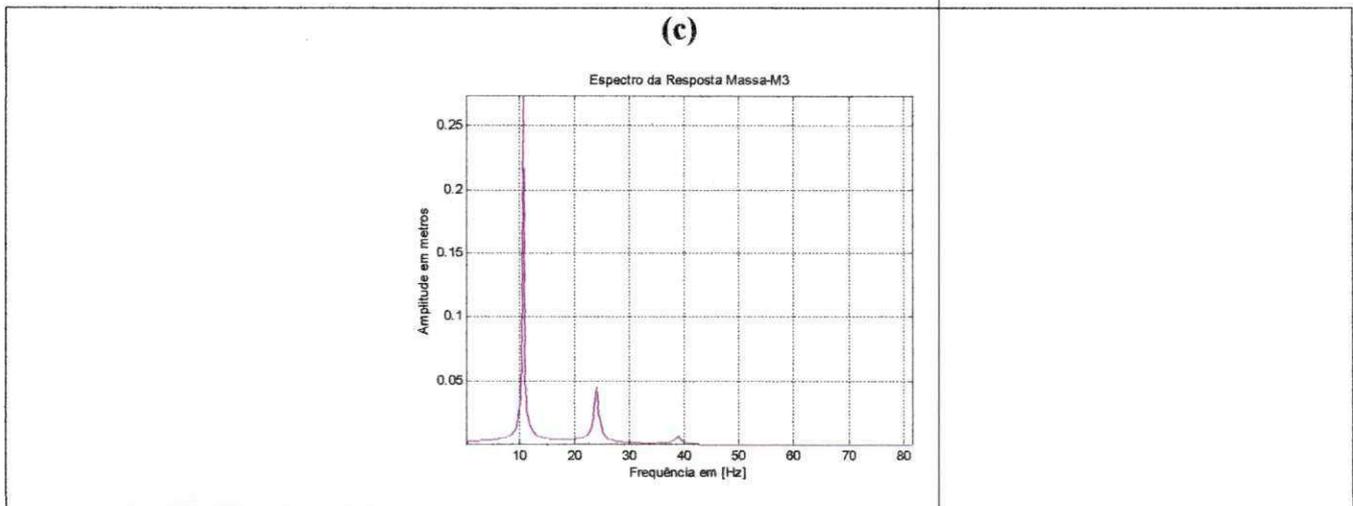


Figura 5.10 – Modelo físico do sistema genérico

Esse modelo foi construído para representar um sistema de três graus de liberdade genérico. As respostas em deslocamentos e seus respectivos espectros para cada massa do sistema são apresentadas a seguir e de forma análoga será construído o sistema de três graus de liberdade para simular a coluna da plataforma. Na figura 5.11 apresenta-se os espectros das respostas para os três modos de vibração para o sistema de três graus de liberdade genérico.





Figuras 5.11 (a, b e c) – Espectros das respostas para os três modos de vibração.
Sistema mecânico genérico de três graus de liberdade

Como se pode observar, os picos máximos de amplitudes dos espectros das respostas encontram-se centradas em torno das freqüências naturais, onde são determinadas inicialmente através do problema de autovalores, que são dados respectivamente por:

$$\lambda_{1,2} = (-2,11 \pm 244,2i)$$

$$\lambda_{3,4} = (-0,36 \pm 66,25i)$$

$$\lambda_{5,6} = (-1,52 \pm 150,44i)$$

Onde as freqüências naturais associadas ao sistema de 03 graus de liberdade dado, têm:

$$\omega_1 = 244,22 \text{ rad} / \text{s} = 38,88 \text{ Hz}$$

$$\omega_2 = 150,44 \text{ rad} / \text{s} = 23,95 \text{ Hz}$$

$$\omega_3 = 66,25 \text{ rad} / \text{s} = 10,54 \text{ Hz}$$

Para se comparar os resultados obtidos para um sistema genérico de 03 graus de liberdade, foi submetido a excitação proposta com base na Interação Fluido – Estrutura no mesmo sistema de 03 graus de liberdade com analogia a coluna de sustentação da

plataforma. Na figura 5.12, apresenta-se o sistema análogo que simula a coluna da plataforma com três graus de liberdade.

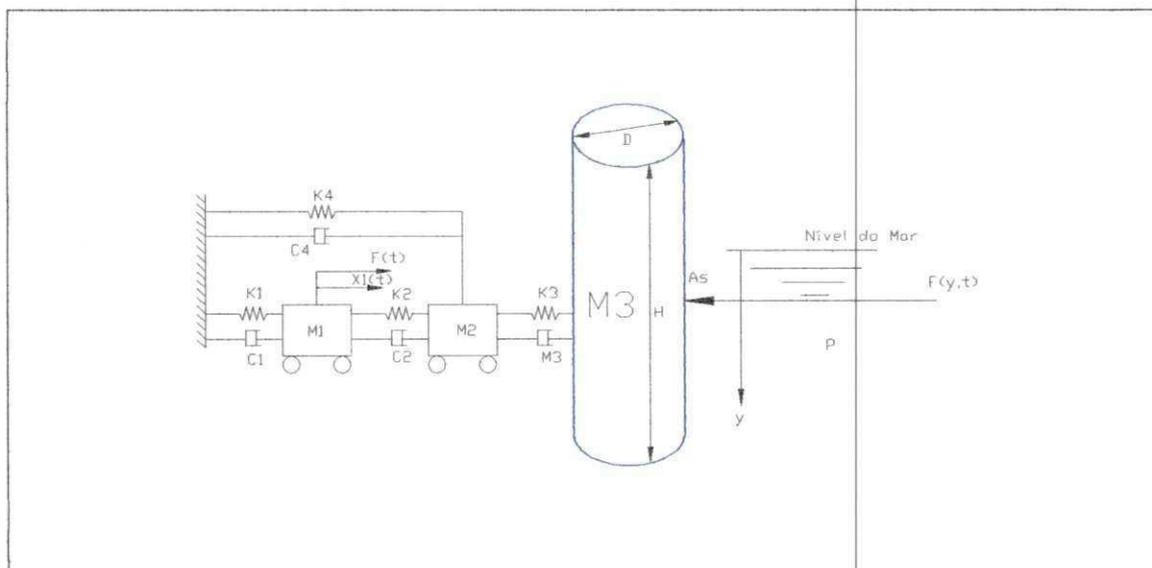


Figura 5.12 – Sistema de três graus de liberdade para a coluna

Para a simulação da coluna, deve-se considerar parâmetros que caracterizam a Interação Fluido – Estrutura, como densidade da água do mar, área lateral da coluna, diâmetro da coluna e altura da coluna. Na tabela 5.4, apresenta-se os parâmetros que representam a interação Fluido – Estrutura de acordo com a eq. (3.17).

Tabela 5.4 – Parâmetros que caracterizam a Interação Fluido - Estrutura

PARÂMETRO	DIMENSÃO
Densidade da água do mar	1025 Kg/m ³
Área da seção transversal da coluna	628,0 m ²
Diâmetro da coluna	8,0 m
Altura da coluna	25,0 m

As Figuras 5.13 e 5.14, mostram sinal de excitação no domínio do tempo e seu respectivo espectro, a partir da equação (3.17).

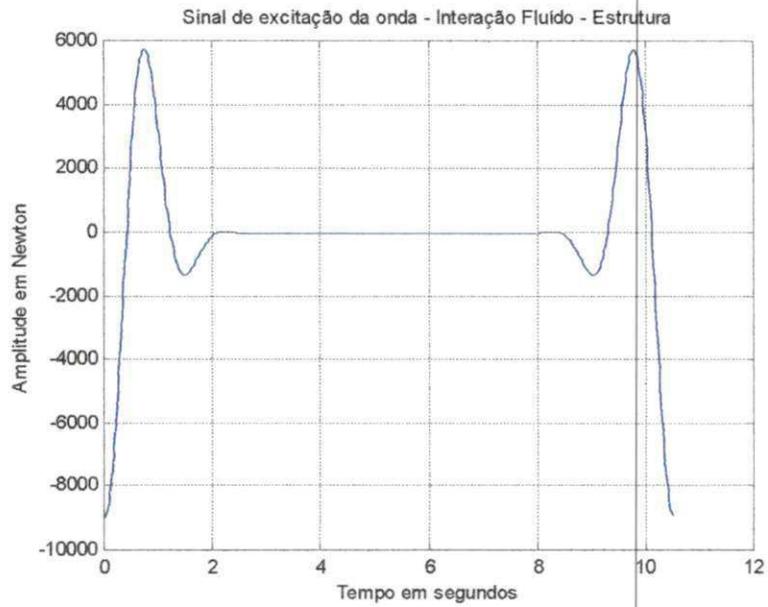


Figura 5.13 – Sinal no tempo da onda

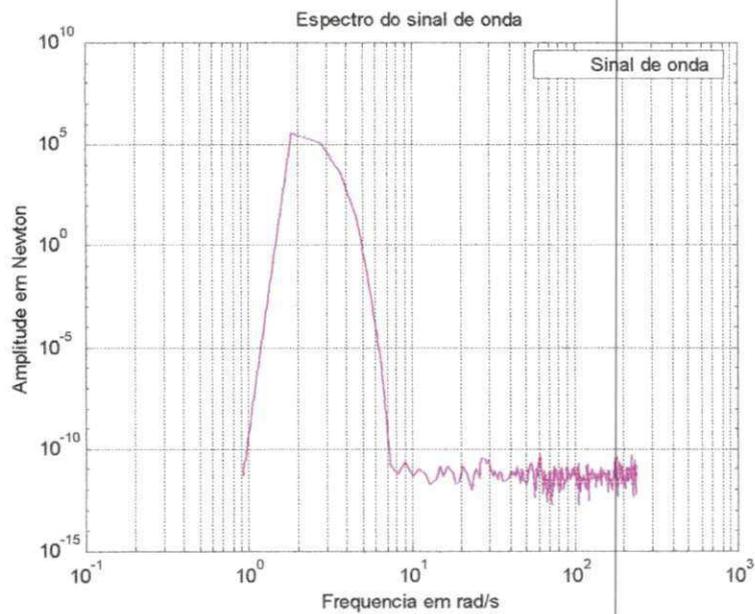


Figura 5.14 - Espectro do sinal da onda

Observando a figura 5.13, temos o sinal no tempo para o modelo que caracteriza a Interação Fluido – 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 no gráfico da figura

5.14 que apresenta o espectro do sinal, apresenta-se um pico máximo de amplitude que caracteriza esse primeiro impacto sobre a estrutura. Depois apresenta-se os picos máximos de amplitude que representa as frequências naturais associadas aos modos de vibração.

Na figura 5.15, apresenta-se os espectros das respostas para os três modos de vibração para o sistema de três graus de liberdade que caracteriza a Interação Fluido – Estrutura.

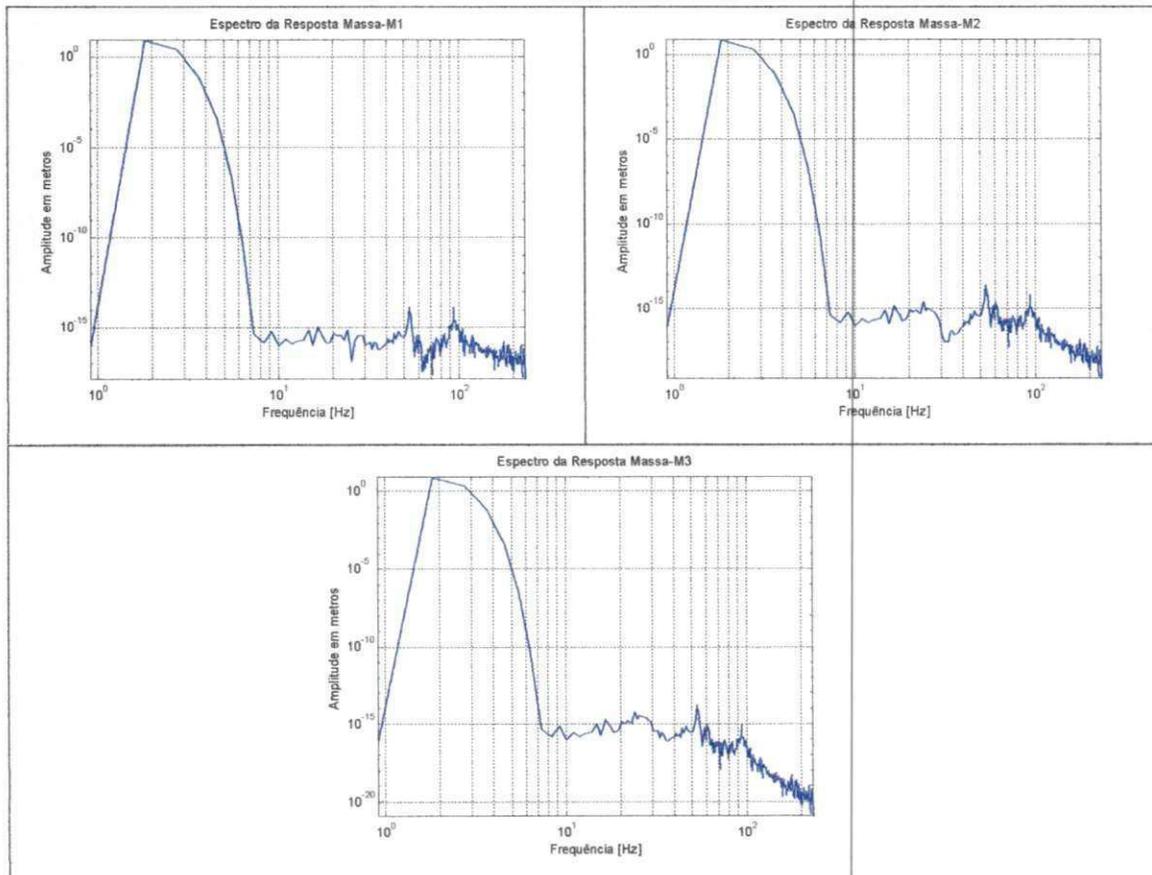


Figura 5.15 – Espectros das respostas em frequência para os três modos de vibração

5.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados resultados da análise do comportamento dinâmicos de uma Plataforma marítima representada por um sistema de 3 graus de liberdade submetido a um modelo de onda do mar proposto. O sistema foi simulado e modelado no software ADINA que se apresentou como uma ferramenta consistente no monitoramento e avaliação de estruturas quanto a existência de falhas projetuais. O modelo de onda proposto que caracteriza a Interação Fluido - Estrutura é apresentado e submetido a plataforma.

CAPITULO 6

CONCLUSÕES

6.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a conclusão do trabalho de dissertação que analisa o comportamento dinâmico de Estruturas de Plataforma Marítimas sob ação de forças em alto mar. Um modelo de onda foi proposto neste trabalho onde visa simular o sinal de onda do mar agindo sob a coluna de uma plataforma semi-submersível. Esse modelo possui características da Interação Fluido – Estrutura.

6.2 Conclusões

O software ADINA 7.5 possibilita identificar os parâmetros modais (Frequências naturais e seus modos de vibração), apresenta as deformações referentes a cada modo de vibração, e podendo ser utilizado para monitorar estruturas com ou sem existência de falhas ou defeitos, na simulação foi modificado parâmetros da estrutura e apresentado os seus modos de vibração e suas respectivas frequências naturais. Foi observado um aumento na

sensibilidade dos parâmetros avaliados, portanto, o ADINA 7.5 pode ser utilizado para avaliar e monitorar estruturas quanto a falhas projetuais.

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.

Na aplicação de forças de excitação Impulsional (energia inversamente proporcional ao intervalo de duração da força e da amplitude da força), foram de extrema importância pois mostram que a malha de elementos finitos foi gerada de forma adequada, quando os seus picos de amplitude máximas se encontram centrados nas suas frequências naturais.

Quando se aplicou o sinal proposto inicialmente que possui propriedades estatísticas de um ruído branco, os gráficos das respostas em frequência apresentaram um aumento significativo das suas amplitudes no primeiro modo em relação ao segundo e terceiro modo. Isto significou que a excitação foi mais forte na direção X da coluna da plataforma.

Para representar o sistema da coluna da plataforma, foram comparado resultados em um sistema genérico de 3 graus de liberdade submetido a excitação anteriormente citada. Foram observados que seus picos máximos de amplitude estavam centrados nas suas frequências naturais.

Em seguida com o mesmo sistema com 3 graus de liberdade que agora representava a coluna de sustentação da plataforma submetida ao modelo de força de excitação dado pela eq. (3.2.17) que caracteriza a Interação Fluido – Estrutura, o sinal de resposta no tempo apresentou picos iniciais periódicos que foram melhor observados no espectro de resposta em frequência, onde um grande pico de amplitude é apresentado podendo ser denominado de primeiro impacto da onda sobre a estrutura da plataforma e logo após o sinal se torna aleatório, pois interage com a próxima onda de encontro com a estrutura.

6.3 Sugestões

Simular e analisar o comportamento dinâmico da plataforma de modo experimental, fazendo uma simulação física de um protótipo da plataforma num tanque com água e ondas geradas mecanicamente. Fazer comparações de resultados experimentais e simulados por outras ferramentas de simulação computacional que utilizam o Método dos Elementos Finitos e controle utilizando redes neurais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADINA 7.5, 2000, **Theory and Modeling Guide**, Volume I, ADINA R&D, Inc.

ANP, 2000 – Agência Nacional de Petróleo, **Dois Anos**, Rio de Janeiro.

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, Hawaii.

CHAKRABARTI, S. K., 1987, **Hidroynamics of Offshore Structure**, Computational
Mechanics Publications, Boston.

CRAIG, JR. R. R., 1981, **Structural Dynamics – An Introduction to Computer
Methods**, John Wiley & Sons, Canada.

CLOUGH, R. H., AND PIEZEN, J. 1993, **Dynamics of Structures**, McGraw-Hill, New
York, N.Y.

CUMMINGS, W. E., 1962, **The Impulse Response Function and Ship Motions**,
Schiffstechnik, vol. 47, n.9.

DES DESERTS. L. 1992, **Architecture and application of various configurations of
compliant towers**, Proceedings of the 11th International Conference on Offshore
Mechanics and Artics Engineering, Vol. I-B, ASME, New York, 471-484.

FALTINSEN, O., MICHELSEN, F. C., 1974, **Hydrodynamic Forces Acting on Drilling
Platforms**, Publicação Didática, COPPE/UFRJ.

HALLAM, M. G., HEAF, N. J., AND WOOTTON, L. R., 1978, **Dynamics of Marine
Structure: Method of Calculating the Dynamic Response of Fixed Structure**

Subjected to Wave and Current Action, CIRIA Underwater Engineering Group Report UR8.

HASSELMAN, D. E., DUNCKEL, M., E EWING, J. A., 1973, **Directional Wave Spectral 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.

JORNAL DO BRASIL, 2001, **Jornal do Brasil**, Rio de Janeiro.

KNOW, Y. W., AND BANG, H., 1997, **The Finite Element Method using MATLAB**, Edited by Frank A. Kulacki, University of Minnessota.

MECCONEL, K. G., 1995, **Vibration Testing (Theory and Practice)**, John Wiley & Sons, Inc. Canada.

MEIROVITCH, L., 1975, **Elements of Vibration Analysis**, McGraw-Hill Kogakusha, Inc.

MINI-SITE PETROBRAS, 2000, **Águas Profundas**, www.petrobras.com.br/aguasprofundas.

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.

NEIVA, J., 1986, **Conheça o Petróleo**, AO LIVRO TÉCNICO, 5ª Edição, Rio de Janeiro.

NEWMAN, J. N., & HALLAM, 1978, **Marine Hydrodynamics**, The MIT Press, Cambridge, MA.

- 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.
- OLIVEIRA, N. V., 2002, **Anotações Didáticas**, Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Campina Grande, PB.
- PATEL, M. H., 1989, **Dynamics of Offshore Structure**, Butterworths and Co. LTD, London.
- PAVIC, A., 1999, **Workshop on Modal Analysis and its Applications to Vibration Problems in Engineering**, Center of Technology Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil.
- SARPKAYA, T., 2000, **On the force decompositions of lighthill and Morison**, Journal of Fluids and Structures, USA.
- 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.
- SITE PETROBRAS, 2000, www.petrobras.com.br
- TRIGGIA, A. A., CORREIA, C. A., VEROTTI FILHO, C., XAVIER, J. A. D., MACHADO, J. C. V., 2001, **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, Editora Interciência, Rio de Janeiro.

- 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.
- VELECTSOS, A. S., PRASAD, A. M., and HAHN, G. D., 1988, **Fluid-Structure Interaction Effects for Offshore Structures**, Journal of Earthquake engineering and Structural Dynamics, Vol. 16, 631-652.
- YOKOO, I H., MOROOKA, C. K., 1990, **Movimentos de Plataformas Petrolíferas Flutuantes em Ondas Direcionais**, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, SP.
- WOLTER, C., SAMPAIO, R., CATALDO, E., 1998, **Vibrações Mecânicas – Resumo da Teoria e Exercícios**, Agência Espacial Brasileira, Rio de Janeiro, RJ.

ANEXO 1

**TRABALHO PUBLICADO E APRESENTADO NO 1 CONGRESSO
BRASILEIRO DE P & D EM PETRÓLEO E GÁS, Novembro de 2001,
Natal, RN.**

ANÁLISE DINÂMICA E SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PLATAFORMAS E DUTOS MARÍTIMOS.

Rodrigues¹, M. C., Oliveira², N. V., Silva², A. A.

*1- Mestrando em Engenharia Mecânica e bolsista da ANP/PRH-25
e-mail: celo_cr@hotmail.com*

*2- Professores da Universidade Federal da Paraíba UFPB/CCT/DEM
Rua Aprígio Veloso, 882, CEP: 58109-970, Campina Grande, PB.*

ANÁLISE DINÂMICA E SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PLATAFORMAS E DUTOS MARÍTIMOS.

Resumo

Neste trabalho, procura-se analisar e simular previamente o comportamento dinâmico de estruturas de plataformas e dutos marítimos, conhecendo seus parâmetros modais (modos de vibração e frequência natural) para monitorar possíveis falhas causadas por esforços ambientais do tipo ondas do mar. 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 ambientais como, onda, vento e correnteza. Simulações de modelos de plataforma semi-submersível e de dutos (riser) são apresentadas. Cargas periódicas e estáticas são aplicadas como numa forma de simular tais esforços. Avaliar esses parâmetros é importante para projeto e concepção dessas estruturas.

Palavras-Chave: Simulação, Plataforma semi-submersível, dutos;

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 sistemas 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. Como 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 ondas gravitacionais são responsáveis por uma parcela significativa das forças atuantes sobre uma estrutura marítima (Patel, 1989). Os carregamentos de ondas sobre estruturas marítimas são assumidos onde ondas atingem a estrutura por apenas uma direção a cada instante. Esta hipótese pode ser razoável em locais de pouca profundidade, onde o fundo do mar interfere no escoamento, mas em locais de alta profundidade, como no caso de plataformas semi-submersíveis, o fundo do mar não interfere no escoamento, a distribuição da energia do mar 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 suas respectivas frequências naturais) para monitorar as estruturas quanto à existência de falhas e defeitos causados por esforços ambientais. Este trabalho apresenta uma parte inicial a dissertação de mestrado. Apresenta-se a seguir uma introdução a metodologia utilizada, a seguir apresenta-se uma proposta formulação matemática para esforços de

Pode-se generalizar a forma da onda considerando-se um sinal com frequência fundamental ω e representá-lo como uma série de Fourier contendo componentes de múltiplos da frequência fundamental.

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N a_n \cdot \cos(n\omega t + \varepsilon_n) \quad (2)$$

que pode ser reescrito como:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (3)$$

onde N é o número de componentes de Fourier.

Os coeficientes de Fourier são:

$$a_n = \frac{2}{T_s} \int_0^{T_s} \eta(t) \cos n\omega t dt \quad (4)$$

$$b_n = \frac{2}{T_s} \int_0^{T_s} \eta(t) \sin n\omega t dt \quad (5)$$

Esta representação do estado de mar dada por a_n , b_n e N finitos não é representativa de um estado de mar aleatório mas pode ser utilizada na simulação de ondas em computador ou em laboratório (Chakrabarti, 1987).

3.1 CARREGAMENTO DE ONDAS

A determinação das forças das ondas sobre uma plataforma semi-submersível é uma tarefa difícil, pois envolve complexidade de interações entre ondas e estrutura. Dependendo do tipo de estrutura, diferentes formulações podem ser aplicadas baseando-se o tamanho dos membros estruturais, na altura e no comprimento de onda incidente. Estes parâmetros podem ser escritos na forma de duas razões: diâmetro do membro estrutural por comprimento de onda (D/λ), e altura de onda por diâmetro do membro estrutural (H/D).

Existem três formulações para estimar as forças de onda, que são: *Equação de Morison*, *Teoria de Froude-Krylov* e *Teoria da Difração*.

Para membros estruturais pequenos ($D/\lambda < 0.2$), 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).

$$F_T = \int_L \rho C_M A_S \dot{u} ds + \int_L \frac{1}{2} \rho C_D D u |u| ds \quad (6)$$

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

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

$$\ddot{u}(y, t) = - \sum_{i=1}^n \exp(-\omega_i^2 \cdot y / g) \cdot \omega_i^2 \cdot \alpha_i \cdot \text{sen}(\omega_i t - \theta_i) \quad (7)$$

onde: g - gravidade, ω_i - frequência (rad/s), α_i - amplitude de deslocamento correspondente a α_i , θ_i - ângulo de fase aleatório uniformemente distribuído 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 ($D / \lambda > 0.2$) aplica-se a teoria de difração para considerar a reflexão e a radiação das ondas devido à presença da estrutura, que não considera a viscosidade.

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 $H/D < 1.5$ não há separação em desenvolvimento de vórtices. Neste caso as forças de atrito são pequenas, com a predominância das forças de inércia e a teoria de difração pode ser usada. Para H/D grandes > 8 há formação de vórtices então as forças viscosas são grandes e a equação de Morison pode ser aplicada (Yokoo, 1990).

Para $1.5 < H/D < 8$ o regime de fluxo é muito complexo e difícil de determinar. Um outro parâmetro mais completo pode substituir a razão H/D , trata-se do adimensional número de Keulegan-Carpenter.

$$KC = u_o T / D \quad (8)$$

onde u_o é a máxima velocidade horizontal da partícula d'água num fluxo de período T em torno de um corpo de dimensão característica D . Quando KC é uma medida importante do efeito da força viscosa. Quando KC é grande há predominância das forças de atrito e o parâmetro D/λ (que mede a difração) é pequeno, e vice-versa.

4 SIMULAÇÃO

Em modelos de estruturas podem existir mais de dez mil graus de liberdade para a equação do movimento do sistema

$$M\ddot{U} + KU = 0 \quad (9)$$

onde M é a matriz de massa do sistema, K é a matriz de rigidez do sistema, \ddot{U} é o vetor aceleração e U é vetor deslocamento do sistema.

A análise dinâmica destas estruturas geralmente envolve o cálculo de parâmetros modais como os modos de vibração (autovetores) e as frequências naturais (autovalores) ao resolver a equação

$$(K - \lambda_i M)\phi_i = 0 \quad (10)$$

onde $\lambda_i \equiv \omega_i^2$ (Roy & Craig, 1981).

O cálculo dos autovetores e autovalores envolve a primeira etapa da análise dinâmica de estruturas, pois é necessário conhecê-los para poder monitorar o sistema quanto ao surgimento de falhas e defeitos.

4.1 PLATAFORMA SEMI-SUBMERSÍVEL

Nesta simulação, a partir de escala reduzida de um modelo de plataforma semi-submersível encontrada na literatura, obtém-se três modos de vibração e suas respectivas frequências naturais. Na figura 1, apresenta-se uma plataforma semi-submersível e na figura 2 o modelo de plataforma semi-submersível de 04 colunas modelada no software ADINA para simulação com 24000 elementos na estrutura.



Figura 1 – Plataforma semi-submersível

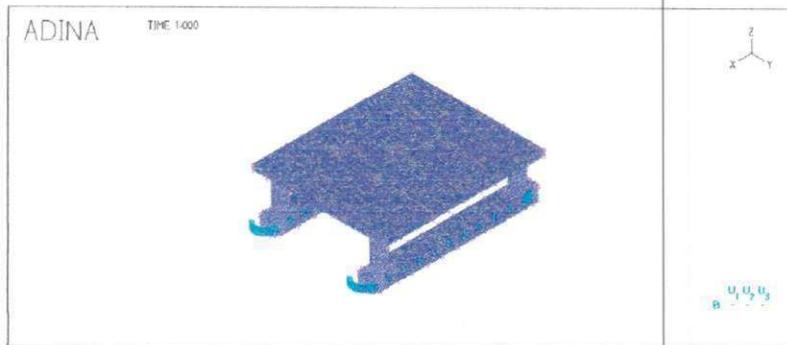


Figura 2 – Modelo de plataforma semi-submersível

4.2 DUTO DE EXPLORAÇÃO (RISER)

Nesta simulação, considera-se um Riser (duto de exploração) que está conectado na plataforma e na cabeça do poço (árvore de natal). Este duto está submetido a carregamentos de ondas. A figura 3 apresenta a configuração esquemática do sistema constituído pelo modelo da plataforma semi-submersível e o duto (riser). O duto será simulado com carga periódica, pontual (1000N) e sem carga.

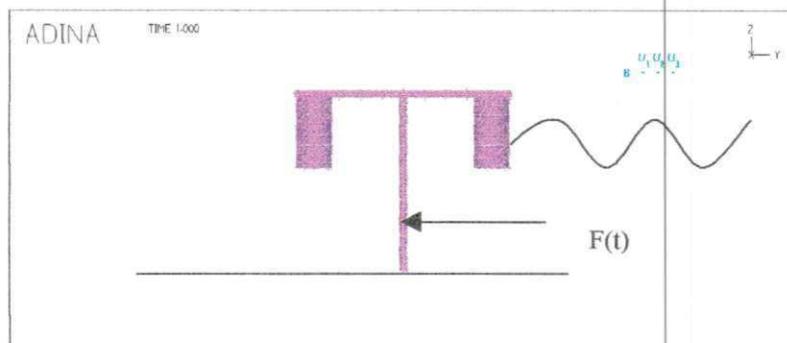


Figura 3 – Modelo de plataforma semi-submersível e riser

Para simulação do modelo acima, considera-se o sistema engastado nas suas extremidades, e as dimensões para os cálculos são: comprimento do tubo é 5 metros, diâmetro de 10" (25,4 cm) e espessura da parede de 1cm (0,01m).

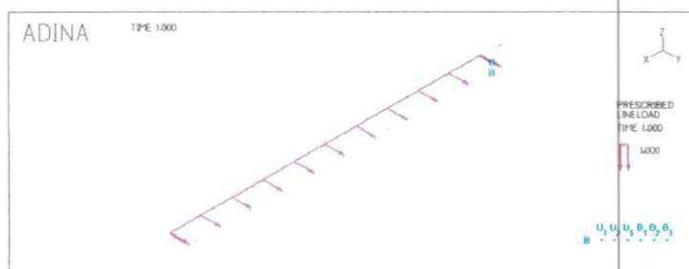


Figura 4 – Modelo do riser de exploração para simulação (carga periódica)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 PLATAFORMA SEMI-SUBMERSÍVEL

Como resultados, apresenta-se na figura 5 e na tabela 1, os três modos de vibração do modelo da plataforma semi-submersível e suas respectivas frequências naturais. Observa-se que a plataforma pode se deformar de acordo com seus modos, dependendo da frequência de excitação aplicada sobre a estrutura.

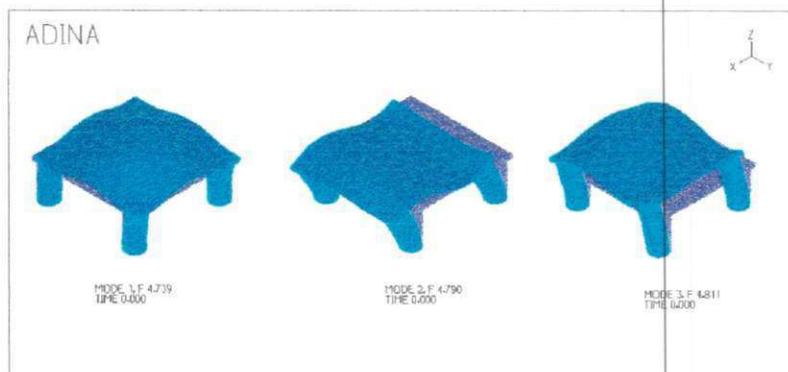


Figura 5 – Configuração dos modos de vibração do modelo da plataforma semi-submersível

A identificação dos parâmetros modais possibilita conhecer as possíveis deformações causadas por esforços externos.

```
ADINA: AUI version 7.5.0, 30 October 2001:
Licensed from ADINA R&D, Inc.
Finite element program ADINA, response range type mode-shape:
Listing for zone WHOLE_MODEL:
MODE      NATURAL
NUMBER    FREQUENCY (Hz)
  1        2.97791E+01
  2        3.00945E+01
  3        3.02303E+01
```

Tabela 1 – Frequências naturais do modelo da plataforma semi-submersível

5.2 RISER (DUTO DE EXPLORAÇÃO)

Na simulação do riser, foi aplicada uma carga cossenoidal do tipo $F(t) = A \cdot \cos(\omega t)$, onde $A = 1000$, $\omega = 2\pi f$, f é a frequência de excitação em Hz. A frequência utilizada foi de 150Hz numa faixa de 0 a 250Hz, isto é, de 0 a 0,004s. Na figura 6, apresenta-se a resposta em frequência para a carga aplicada sobre o riser.

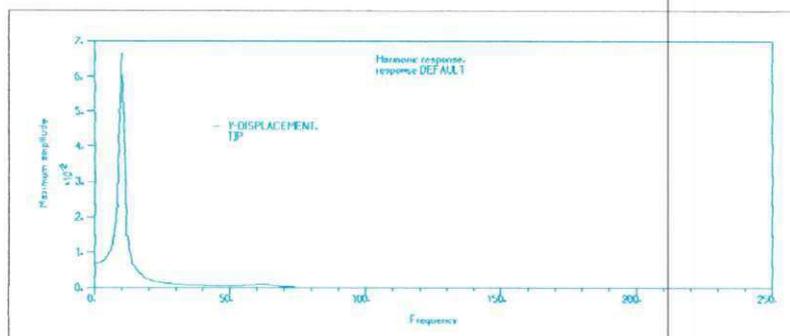


Figura 6 – Resposta em frequência

A tabela 2 apresenta as frequências naturais respectivas aos modos de vibração do modelo do sistema.

```

ADINA: AUI version 7.5.0, 19 November 2001:
  Licensed from ADINA R&D, Inc.
Finite element program ADINA, response range type mode-shape:
Listing for zone WHOLE_MODEL:
  MODE
  NUMBER  FREQUENCY
    1      9.94719E+00
    2      6.30095E+01
    3      1.80853E+02
  
```

Tabela 2 – Frequências naturais do duto com carga periódica

Observa-se que o pico do espectro ocorre perto da frequência de 10Hz, próxima à frequência natural do sistema (duto). Isto é esperado, pois valores de frequência de excitação próximos a 10Hz causa o fenômeno de ressonância.

Para o duto sem carga, na tabela 3, são apresentadas as frequências naturais.

```

ADINA: AUI version 7.5.0, 24 November 2001:
  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      5.76516E+01
    2      8.15317E+01
    3      1.74380E+02
  
```

Tabela 3 – Frequências naturais do duto sem carga periódica

Para o caso da carga aplicada ser pontual, é apresentada na figura 7 os campo de tensões ao longo do duto.

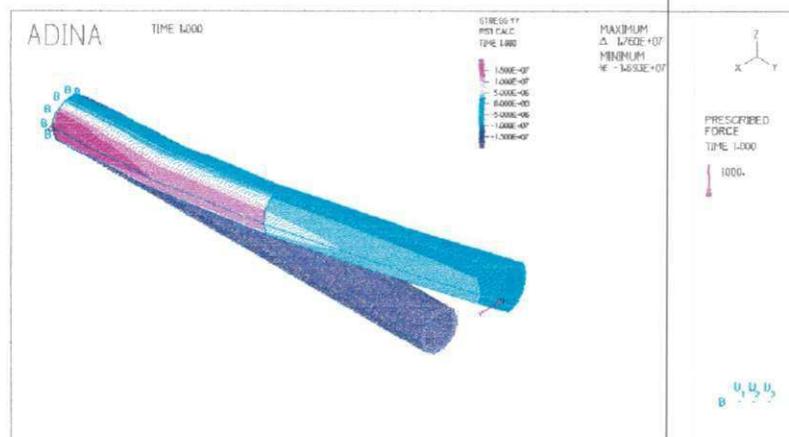


Figura 7 – Campo de tensões ao longo do duto

Observa-se que para o caso do duto com carga periódica, suas frequências naturais diminuem em virtude da frequência de excitação que atua no sistema, isto é, o sistema começa a vibrar com aquela frequência determinada pelo esforço aplicado.

5.3 DISCUSSÕES

Para análise em laboratório, a simulação faz-se necessário, pois é um método de menor custo, maior rapidez, e eficiente se comparando a métodos de experimentais que requer mais equipamentos de precisão de alto custo. Esse trabalho é parte inicial da dissertação de mestrado, que tem como objetivo analisar o comportamento dinâmico de estruturas de plataformas e dutos marítimos devido a esforços de ondas em alto mar, onde essas ondas podem sofrer influências do vento e da correnteza. Faz-se necessário, maiores investigações e incluir o estado de ondas aleatório para posteriores simulações.

6. CONCLUSÃO

Com relação aos parâmetros modais avaliados (modos de vibração e frequência natural), eles são importantes para monitoramento e indicadores de falhas e defeitos em estruturas. Isto é, ao conhecer tais parâmetros pode-se avaliar a vida útil de uma estrutura quando submetida a esforços cíclicos ambientais como ondas, vento e correnteza. Dada a complexidade de projetar estruturas de grande porte e sujeitas a vários esforços externos, seria de extrema importância o estudo mais detalhado sobre essas forças atuantes para diminuir custos gastos com manutenção e proteção a essas estruturas.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ADINA 7.5, "*Theory and Modeling Guide*", Volume I, ADINA R&D, Inc, 2000.
- Chakrabarti, S. K., "*Hidrodynamics of Offshore Structure*", Computational Mechanics Publications, Boston, 1987.
- Hasselman, D. E., Dunckel, M., e Ewing, J. A., "*Directional Wave Spectra Observed During JONSWAP 1973*", Journal Physics Oceanography, 8, pp 1264-1280.
- Huebner, K. H., Thornton, E. A., "*The Finite Element Method for Engineer*", second edition, JOHN WILEY & SONS, New York, USA, 1982.
- 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.
- Patel, M. H., "*Dynamics of Offshore Structures*", Butterworths and Co. LTD, London 1989.
- Sarpkaya, T., and Isaacson, M., 1981, "*Mechanics of Wave Force on Offshore Structures*", Van Nostran Reinhold, New York.
- Yokoo, I. H., Morooka, C. K., "*Movimentos de Plataformas Petrolíferas Flutuantes em ondas direcionais*", Dissertação de Mestrado, UNICAMP, SP, 1990.

ANEXO 2

**TRABALHO PUBLICADO NA REVISTA TÉCNICA DE ENERGIA
PETRÓLEO E GÁS. Maio de 2002.**

ANÁLISE DINÂMICA E SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PLATAFORMAS E DUTOS MARÍTIMOS

RODRIGUES, M. C.⁽¹⁾; OLIVEIRA, N. V.⁽²⁾; SILVA, A. A.⁽²⁾

(1) Mestrando em Engenharia Mecânica e bolsista da ANP/PRH-25 - e-mail:celo_cr@hotmail.com

(2) Professores da Universidade Federal da Paraíba UFPB/CCT/DEM - Rua Aprígio Veloso, 882, CEP: 58109-970, Campina Grande, PB.

Resumo

Neste trabalho, procura-se analisar e simular previamente o comportamento dinâmico de estruturas de plataformas e dutos marítimos, conhecendo seus parâmetros modais (modos de vibração e frequência natural) para monitorar possíveis falhas causadas por esforços ambientais do tipo ondas do mar. 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 ambientais como, onda, vento e correnteza. Simulações de modelos de plataforma semi-submersível e de dutos (riser) são apresentadas. Cargas periódicas e estáticas são aplicadas como numa forma de simular tais esforços. Avaliar esses parâmetros é importante para projeto e concepção dessas estruturas.

Palavras-Chave: *Simulação, Plataforma semi-submersível, dutos.*

Abstract

In this work, it tries to analyze and to previously simulate the dynamic behavior of structures of platforms and marine pipes, knowing your modal parameters (mode shapes and natural frequency) to monitor possible flaws caused by environmental efforts of the type waves of the sea. 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. Simulations of models of semi-submersible platform and of pipes (riser) they are presented. Periodic loads and statics are applied as in a form of simulating such efforts. To evaluate those parameters is important for project and conception of those structures.

Keywords: *Semi-submersible Platform, pipes, Finite Elements, Sea wave.*

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. Como 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 ondas gravitacionais são responsáveis por uma parcela significativa das forças atuantes sobre uma estrutura marítima (Patel, 1989). Os carregamentos de ondas sobre estruturas marítimas são assumidos onde ondas atingem a estrutura por apenas uma direção a cada instante. Esta hipótese pode ser razoável em locais de pouca profundidade, onde o fundo do mar interfere no escoamento, mas em locais de alta profundidade, como no caso de plataformas semi-submersíveis, o fundo do mar não interfere no escoamento, a distribuição da energia do mar 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 suas respectivas frequências naturais) para monitorar as estrutu-

ras quanto à existência de falhas e defeitos causados por esforços ambientais. Este trabalho apresenta uma parte inicial a dissertação de mestrado. Apresenta-se a seguir uma introdução a metodologia utilizada, a seguir apresenta-se uma proposta formulação matemática para esforços de ondas do mar, a seguir apresenta-se às simulações produzidas no software ADINA 7.5 (*Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis*). A seguir apresenta-se os resultados, discussões e a conclusão.

2. METODOLOGIA

O método dos Elementos Finitos é utilizado para gerar a malha na estrutura requerida, pois o software é baseado nesse método. Utilizando o software ADINA 7.5, com base nos cálculos dos elementos finitos, pode-se simular modelos de vigas, barras, cilindros, chapas que caracterizam estruturas de plataformas offshore e dutos marítimos.

Os modelos são construídos no próprio software ADINA 7.5, de acordo com suas dimensões e características. Após a construção os modelos são simulados e depois são introduzidos a outro ambiente no software para obtenção dos resultados.

A modelagem por elementos finitos consiste em dividir a estrutura em um número de partes menores e mais simples. Estas partes são chamadas de *elementos finitos* e o processo de divisão da estrutura é chamado de discretização. Cada elemento é usualmente muito simples, como uma barra ou uma viga, o qual tem equação de movimento que pode ser facilmente resolvida ou aproximada. Cada elemento é limitado por pontos chamados nós, os quais o conecta aos outros elementos em sua vizinhança imediata. A coleção de elementos finitos e nós é chamada de *malha de elementos finitos* (Wolter, Sampaio, Cataldo, 1998). A equação de vibração de cada elemento finito individual é então determinada e resolvida. Isso forma a segunda forma de aproximação no método. As soluções das equações dos elementos são aproximadas por uma combinação linear de polinômios de baixa ordem. Cada uma destas soluções polinomiais individuais é tornada compatível com a solução adjacente, (condições de continuidade), nos nós aos dois elementos. Essas soluções são reunidas em um procedimento, resultando em matrizes de massa e rigidez globais, as quais descrevem a vibração da estrutura como um todo. Esse modelo global de massa e rigidez representa uma aproximação da estrutura que pode ser analisada e resolvida usando métodos de solução de sistemas de multi graus de liberdade (Wolter, Sampaio, Cataldo, 1998).

3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA FORÇA DE EXCITAÇÃO (ONDAS DO MAR)

A forma mais simples de se representar uma onda do mar é uma oscilação senoidal da superfície. Uma onda senoidal simples de frequência ω pode ser representada por:

$$\eta(t) = (H/2) \cdot \cos(\omega t) \quad (1)$$

onde $H/2$ é a amplitude da onda.

Pode-se generalizar a forma da onda considerando-se um sinal com frequência fundamental ω e representá-lo como uma série de Fourier contendo componentes de múltiplos da frequência fundamental.

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos(n\omega t + \varepsilon_n) \quad (2)$$

que pode ser reescrito como:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (3)$$

onde N é o número de componentes de Fourier.

Os coeficientes de Fourier são:

$$a_n = \frac{2}{T_s} \int_0^{T_s} \eta(t) \cos n\omega t dt \quad (4)$$

$$b_n = \frac{2}{T_s} \int_0^{T_s} \eta(t) \sin n\omega t dt \quad (5)$$

Esta representação do estado de mar dada por a_n , b_n e N finitos não é representativa de um estado de mar aleatório mas pode ser utilizada na simulação de ondas em computador ou em laboratório (Chakrabarti, 1987).

3.1. CARREGAMENTO DE ONDAS

A determinação das forças das ondas sobre uma plataforma semi-submersível é uma tarefa difícil, pois envolve complexidade de interações entre ondas e estrutura. Dependendo do tipo de estrutura, diferentes formulações podem ser aplicadas baseando-se o tamanho dos membros estruturais, na altura e no comprimento de onda incidente. Estes parâmetros podem ser escritos na forma de duas razões: diâmetro do membro estrutural por comprimento de onda, e altura de onda por diâmetro do membro estrutural por comprimento de onda (D/λ), e altura de onda por diâmetro do membro estrutural (H/D).

Existem três formulações para estimar as forças de onda, que são: *Equação de Morison*, *Teoria de Froude-Krylov* e *Teoria da Difração*.

Para membros estruturais pequenos ($D/\lambda < 0.2$), 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).

$$F_T = \int_L \rho C_M A_s \ddot{u} ds + \int_L \frac{1}{2} \rho C_D D \dot{u} |u| ds \quad (6)$$

onde F_T é a força hidrodinâmica total;

$C_M = 1 + k_M \sum_{i=1}^n$ e k_M é o coeficiente de massa acres-

centada da seção; ρ é a densidade da água; C_D é o coeficiente de arrasto; D é o diâmetro característico do membro; A_s é a área da seção transversal do membro; \dot{u} mostra a derivada em relação ao tempo de \ddot{u}/dt ; e L é o comprimento do membro.

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

$$\ddot{u}(y, t) = - \sum_{n=1}^n \exp(-\omega_n^2 y / g) \omega_n^2 a_n \sin(\omega_n t - \theta_n) \quad (7)$$

onde: g - gravidade, ω_n - frequência (rad/s), a_n - amplitude de deslocamento correspondente a a_n , θ_n - ângulo de fase aleatório uniformemente distribuído 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 ($D/\lambda > 0.2$) aplica-se a teoria de difração para considerar a reflexão e a radiação das ondas devido à presença da estrutura, que não considera a viscosidade.

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 $H/D < 1.5$ não há separação em desenvolvimento de vórtices. Neste caso as forças de atrito são pequenas, com a predominância das forças de inércia e a teoria de difração pode ser usada. Para H/D grandes > 8 há formação de vórtices então as forças viscosas são grandes e a equação de Morison pode ser aplicada (Yokoo, 1990).

Para $1.5 < H/D < 8$ o regime de fluxo é muito complexo e difícil de determinar. Um outro parâmetro mais completo pode substituir a razão H/D , trata-se do adimensional número de Keulegan-Carpenter.

$$KC = u_0 T / D \tag{8}$$

onde u_0 é a máxima velocidade horizontal da partícula d'água num fluxo de período T em torno de um corpo de dimensão característica D . Quando KC é uma medida importante do efeito da força viscosa. Quando KC é grande há predominância das forças de atrito e o parâmetro D/λ (que mede a difração) é pequeno, e vice-versa.

4. SIMULAÇÃO

Em modelos de estruturas podem existir mais de dez mil graus de liberdade para a equação do movimento do sistema

$$M\ddot{U} + KU = 0 \tag{9}$$

onde M é a matriz de massa do sistema, K é a matriz de rigidez do sistema. \ddot{U} é o vetor aceleração e U é vetor deslocamento do sistema.

A análise dinâmica destas estruturas geralmente envolve o cálculo de parâmetros modais como os modos de vibração (autovetores) e as frequências naturais (autovalores) ao resolver a equação

$$(K - \lambda_i M) \phi_i = 0 \tag{10}$$

onde $\lambda_i = \omega_i^2$ (Roy & Craig, 1981).

O cálculo dos autovetores e autovalores envolve a primeira etapa da análise dinâmica de estruturas, pois é necessário conhecê-los para poder monitorar o sistema quanto ao surgimento de falhas e defeitos.

4.1. PLATAFORMA SEMI-SUBMERSÍVEL

Nesta simulação, a partir de escala reduzida de um modelo de plataforma semi-submersível encontrada na literatura, obtém-se três modos de vibração e suas respectivas frequências naturais. Na figura 1, apresenta-se uma plataforma semi-submersível e na figura 2 o modelo de plataforma semi-submersível de 04 colunas modelada no software ADINA para simulação com 24000 elementos na estrutura.

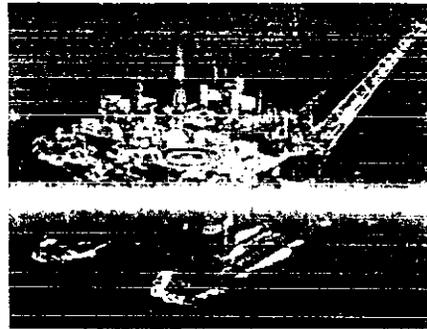


Figura 1 - Plataforma semi-submersível

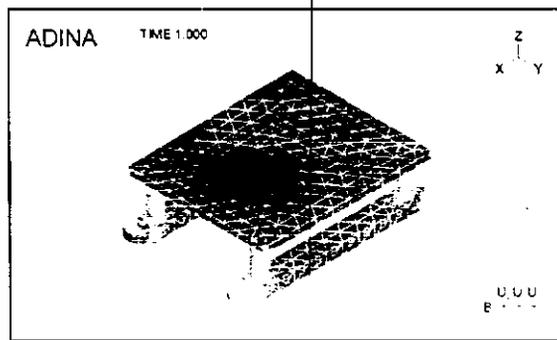


Figura 2 - Modelo de plataforma semi-submersível

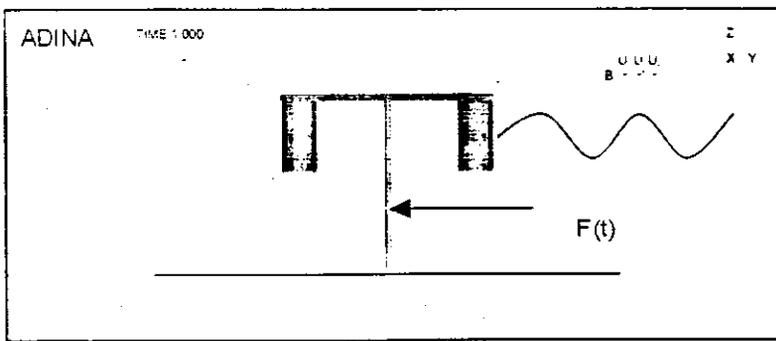


Figura 3 - Modelo de plataforma semi-submersível e riser

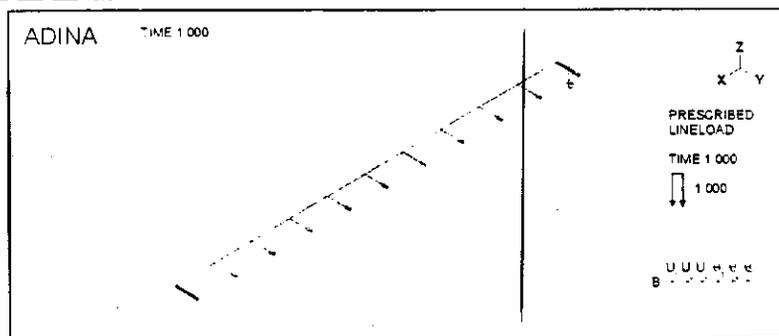


Figura 4 - Modelo do riser de exploração para simulação (carga periódica)

EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO

4.2. DUTO DE EXPLORAÇÃO (RISER)

Nesta simulação, considera-se um Riser (duto de exploração) que está conectado na plataforma e na cabeça do poço (árvore de natal). Este duto está submetido a carregamentos de ondas. A figura 3 apresenta a configuração esquemática do sistema constituído pelo modelo da plataforma semi-submersível e o duto (riser). O duto será simulado com carga periódica, pontual (1000N) e sem carga.

Para simulação do modelo acima, considera-se o sistema engastado nas suas extremidades, e as dimensões para os cálculos são: comprimento do tubo é 5 metros, diâmetro de 10" (25,4 cm) e espessura da parede de 1cm (0,01m).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. PLATAFORMA SEMI-SUBMERSÍVEL

Como resultados, apresenta-se na figura 5 e na tabela 1, os três modos de vibração do modelo da plataforma semi-submersível e suas respectivas frequências naturais. Observa-se que a plataforma pode se deformar de acordo com seus modos, dependendo da frequência de excitação aplicada sobre a estrutura.

A identificação dos parâmetros modais possibilita conhecer as possíveis deformações causadas por esforços externos.

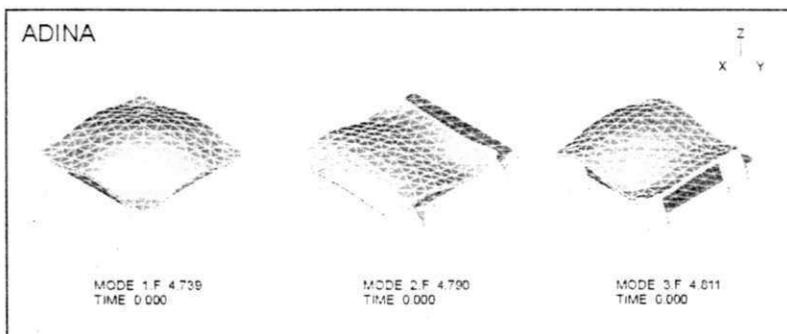


Figura 5 - Configuração dos modos de vibração do modelo da plataforma semi-submersível

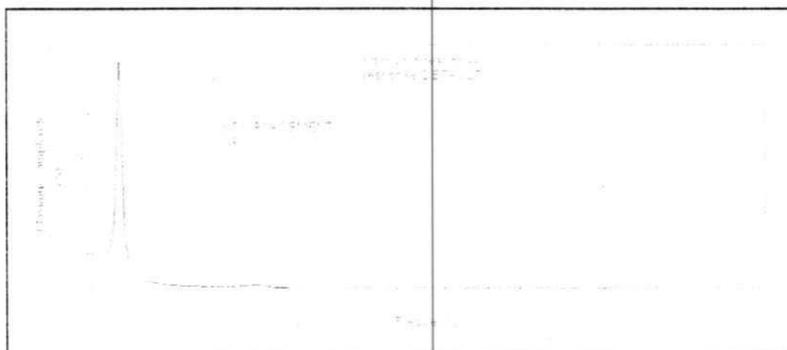


Figura 6 - Resposta em frequência

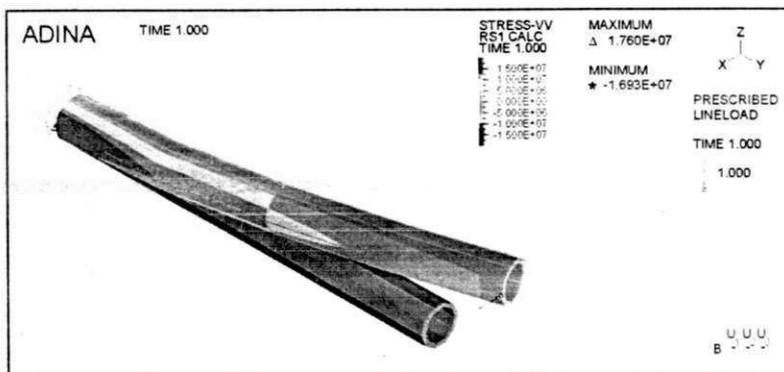


Figura 7 - Campo de tensões ao longo do duto

ADINA: AUI version 7.5.0, 30 October 2001:
Licensed from ADINA R&D, Inc.
Finite element program ADINA, response range
type mode-shape:
Listing for zone WHOLE_MODEL:

MODE NUMBER	NATURAL FREQUENCY (Hz)
1	2.97791E+01
2	3.00945E+01
3	3.02303E+01

Tabela 1 - Frequências naturais do modelo da plataforma semi-submersível

ADINA: AUI version 7.5.0, 24 November 2001:
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	5.76516E+01
2	8.15317E+01
3	1.74380E+02

Tabela 3 - Frequências naturais do duto sem carga periódica

5.2. RISER (DUTO DE EXPLORAÇÃO)

Na simulação do riser, foi aplicada uma carga cossenoidal do tipo $F(t) = A \cdot \cos(\omega t)$, onde $A = 1000$, $\omega = 2\pi f$, f é a frequência de excitação em Hz. A frequência utilizada foi de 150Hz numa faixa de 0 a 250Hz, isto é, de 0 a 0,004s. Na figura 6, apresenta-se a resposta em frequência para a carga aplicada sobre o riser.

A tabela 2 apresenta as frequências naturais respectivas aos modos de vibração do modelo do sistema.

ADINA: AUI version 7.5.0, 19 November 2001:
Licensed from ADINA R&D, Inc.
Finite element program ADINA, response range
type mode-shape:
Listing for zone WHOLE_MODEL:

MODE NUMBER	FREQUENCY
1	9.94719E+00
2	6.30095E+01
3	1.80853E+02

Tabela 2 - Frequências naturais do duto com carga periódica

Observa-se que o pico do espectro ocorre perto da frequência de 10Hz, próxima à frequência natural do sistema (duto). Isto é esperado, pois valores de frequência de excitação próximos a 10Hz causa o fenômeno de ressonância.

Para o duto sem carga, na tabela 3, são apresentadas as frequências naturais.

Para o caso da carga aplicada ser pontual, é apresentada na figura 7 os campo de tensões ao longo do duto.

Observa-se que para o caso do duto com carga periódica, suas frequências naturais diminuem em virtude da frequência de excitação que atua no sistema, isto é, o sistema começa a vibrar com aquela frequência determinada pelo esforço aplicado.

5.3. DISCUSSÕES

Para análise em laboratório, a simulação faz-se necessário, pois é um método de menor custo, maior rapidez, e eficiente se comparando a métodos de experimentais que requer mais equipamentos de precisão de alto custo. Esse trabalho é parte inicial da dissertação de mestrado, que tem como objetivo analisar o comportamento dinâmico de estruturas de plataformas e dutos marítimos devido a esforços de ondas em alto mar, onde essas ondas podem sofrer influências do vento e da correnteza. Faz-se necessário, maiores investigações e incluir o estado de ondas aleatório para posteriores simulações.

6. CONCLUSÃO

Com relação aos parâmetros modais avaliados (modos de vibração e frequência natural), eles são importantes para monitoramento e indicadores de falhas e defeitos em estruturas. Isto é, ao conhecer tais parâmetros pode-se avaliar a vida útil de uma estrutura quando submetida a esforços cíclicos ambientais como ondas, vento e correnteza. Dada a complexidade de projetar estruturas de grande porte e sujeitas a vários esforços externos, seria de extrema importância o estudo mais detalhado sobre essas forças atuantes para diminuir custos gastos com manutenção e proteção a essas estruturas.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ADINA 7.5, "Theory and Modeling Guide", Volume I, ADINA R&D, Inc, 2000.
- CHAKRABARTI, S. K., *Hidroynamics of Offshore Structure*", Computational Mechanics Publications, Boston, 1987.
- HASSELMAN, D. E., DUNCKEL, M., E EWING, J. A., "Directional Wave Spectra Observed During JONSWAP 1973", Journal Physics Oceanography. 8, pp 1264-1280.
- HUEBNER, K. H., THORNTON, E. A., "The Finite Element Method for Engineer", second edition, JOHN WILEY & SONS, New York, USA, 1982.
- 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.
- PATEL, M. H., "Dynamics of Offshore Structures", Butterworths and Co. LTD, London 1989.
- SARPKAYA, T., AND ISAACSON, M., 1981, *Mechanics of Wave Force on Offshore Structures*, Van Nostran Reinhold, New York.
- YOKOO, I. H., MOROOKA, C. K., "Movimentos de Plataformas Petrolíferas Flutuantes em ondas direcionais". Dissertação de Mestrado, UNICAMP, SP, 1990.

ANEXO 3

TRABALHO PUBLICADO NO CONEM 2002. Agosto de 2002

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, 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, 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).

$$\eta(t) = (H/2) \cdot \cos(\omega t) \quad (1)$$

onde $H/2$ é a amplitude da onda e ω 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).

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N \beta_n \cdot \cos(n\omega t) \quad (2)$$

onde β_n é dado pela Eq. (3)

$$\beta_n = H/2 \cdot \left\{ 1 - 2 \left[\frac{\phi_n}{\pi} \right] \right\} \quad (3)$$

e ϕ_n dado pela Eq. (4),

$$\phi_n = 1 - \pi \left[\frac{n^2}{2N} \right] \Rightarrow \phi_n = \frac{H}{2} \left[1 - \pi \left(\frac{n^2}{2N} \right) \right] \quad (4)$$

onde o ângulo de fase, ϕ_n , varia entre (0 e π) e β_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.

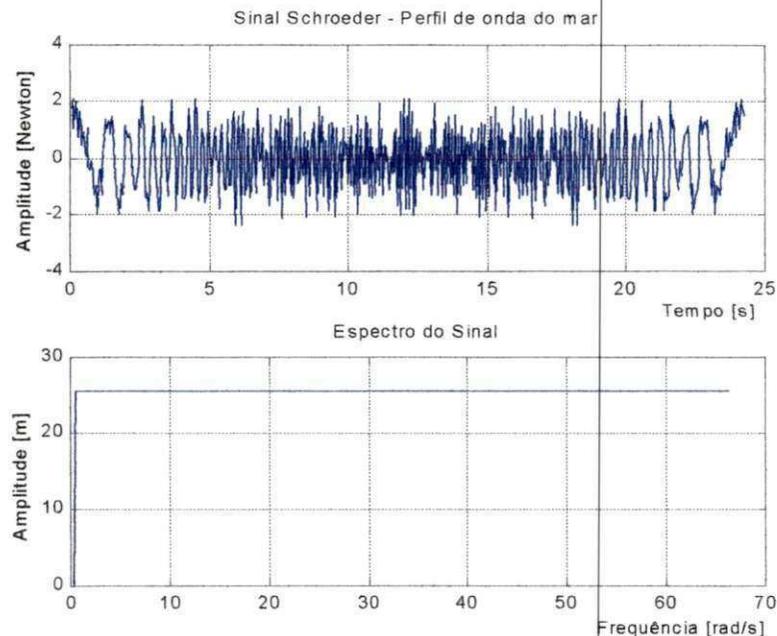


Figura 1. Sinal do perfil de onda proposto e seu espectro.

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/λ); 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 ($D/\lambda < 0,2$), 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,

$$F_T = \int_L \rho C_M A_S \dot{u} ds + \int_L \frac{1}{2} \rho C_D D u |u| ds \quad (5)$$

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,

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

onde: g - aceleração da gravidade, ω_i - frequência (rad/s), a_i - amplitude de deslocamento correspondente a a_i , θ_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 $(D/\lambda > 0,2)$, 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

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.

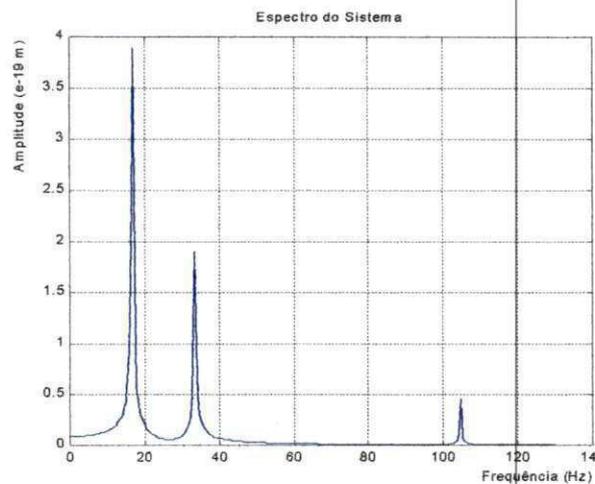


Figura 4. Espectro do sistema relativo as três primeiras frequências naturais.

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.

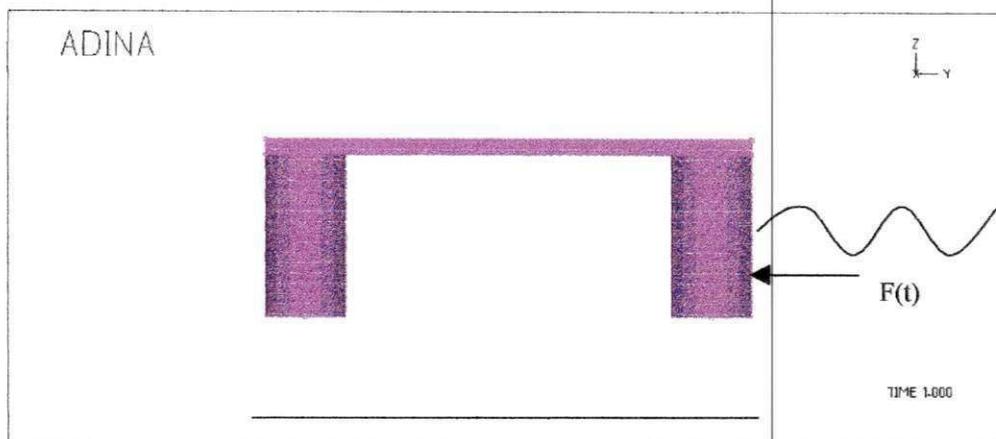


Figura 5. Modelo de Plataforma Semi-Submersível submetida a excitações externas das ondas do mar

• **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).

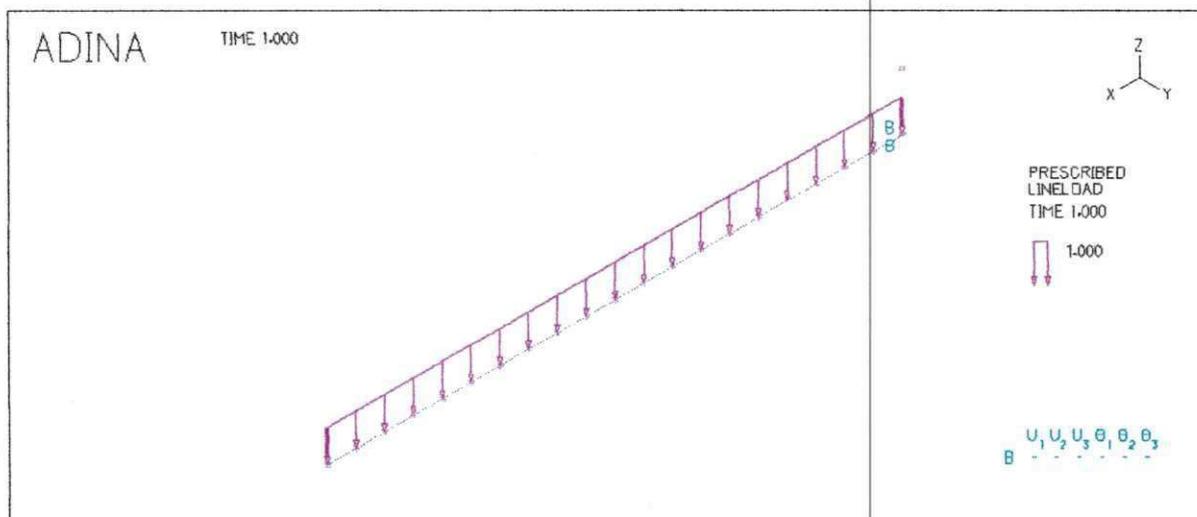


Figura 6. Modelo da Coluna da Plataforma para simulação com excitação periódica distribuída.

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.

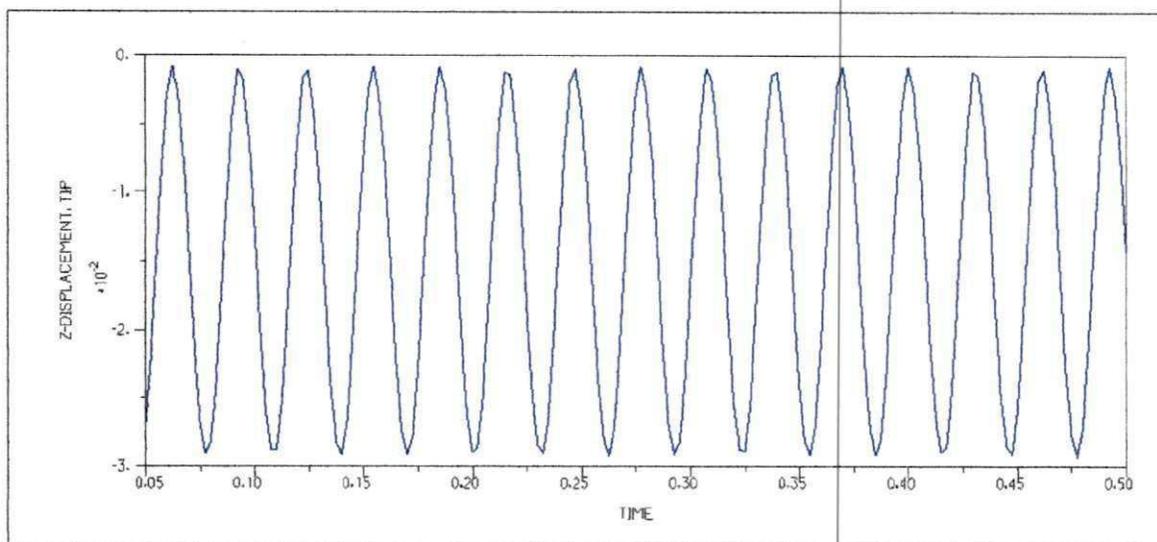


Figura 7. Resposta em deslocamento para a coluna submetida à excitação periódica.

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 Structures", Computational Mechanics Publications, Boston.
- Hasselmann, 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;*