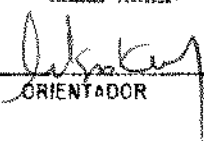


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia Mecânica
Como Requisito Parcial à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

ESTUDO DOS MOVIMENTOS DE UMA PLATAFORMA
SEMI-SUBMERSÍVEL ATRAVÉS DA
SIMULAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por Eduardo
Vardaro e aprovada
pela comissão julgadora em 22.11.1991


ORIENTADOR

54/91

Autor : Eduardo Vardaro 403
Orientador : Celso Kazuyuki Morooka *

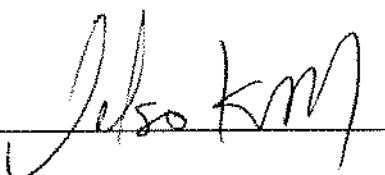
novembro de 1991

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

A dissertação "Estudo dos Movimentos de uma Plataforma Semi-submersível através da Simulação no Domínio do Tempo", elaborada por Eduardo Vardaro e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora foi aceita pela Sub-Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 27 de novembro de 1991.

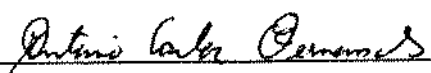
Banca Examinadora



Celso Kazuyuki Morooka, Ph.D.



José A. Penteado Aranha, Ph.D.



Antônio Carlos Fernandes, Ph.D.

À minha família

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. CELSO KAZUYUKI MOROOKA pela orientação e incentivo na realização desse trabalho.

À PETROBRÁS pela oportunidade de realização desse trabalho.

Aos Colegas de Mestrado em Engenharia de Petróleo pela amizade e companheirismo.

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
2	SIMULAÇÃO DOS MOVIMENTOS	7
2.1	SISTEMA DE COORDENADAS	7
2.2	EQUAÇÃO DO MOVIMENTO	9
2.3	FUNÇÃO DE MEMÓRIA	12
2.4	ESFORÇOS DE ONDA	13
2.5	ESFORÇOS DE VENTO	15
2.6	ESFORÇOS DE CORRENTEZA	21
2.7	SISTEMA DE ANCORAGEM	21
2.8	RISER	22
2.9	INTEGRAÇÃO DA EQUAÇÃO DO MOVIMENTO	23
3	CÁLCULO DOS COEFICIENTES E ESFORÇOS DA EQUAÇÃO DO MOVIMENTO	28
3.1	DESCRIÇÃO DAS PLATAFORMAS	28
3.2	CÁLCULO DAS FUNÇÕES DE MEMÓRIA E COEFICIENTES DE MASSA ADICIONAL INDEPENDENTE DA FREQUÊNCIA	34
3.3	COEFICIENTES DE AMORTECIMENTO VISCOSO	49
3.4	DISCRETIZAÇÃO PARA O CÁLCULO DOS ESFORÇOS DE VENTO E CORRENTEZA	49
3.5	CÁLCULO DOS ESFORÇOS DE ONDA	51

3.6	CARACTERÍSTICAS DO RISER	59
3.7	RESULTADOS	62
4	ANÁLISE DO SISTEMA DE ANCORAGEM ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO DOS MOVIMENTOS NO DOMÍNIO DO TEMPO	84
4.1	CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS DE ANCORAGEM	84
4.2	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA CONDIÇÃO CENTENÁRIA .	87
4.3	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO QUANDO OCORRE A RUPTURA DE UMA LINHA DE ANCORAGEM	91
4.4	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO QUANDO OCORRE ALTERAÇÃO NAS CONDIÇÕES DE VENTO	94
4.5	VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS ESFORÇOS AMBIENTAIS NO SISTEMA DE ANCORAGEM	97
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	111
6	APÊNDICE A	116
7	APÊNDICE B	125
8	APÊNDICE C	128
9	APÊNDICE D	133

Lista de Tabelas

3.1	Caracteísticas da plataforma "A"	30
3.2	Caracteísticas da plataforma "B"	31
3.3	Coordenadas das âncoras e "fairlead" para plataforma "A"	33
3.4	Coordenadas das âncoras e "fairlead" para plataforma "B"	33
3.5	Fatores de adimensionalização	34
3.6	Massa adicional independente da frequência	48
3.7	Coefficientes de amortecimento viscoso	49
3.8	Coefficientes de altura	50
3.9	Função de transferência quadrática na direção do movimento de sway para a plataforma "A".	58
3.10	Características do riser	59
3.11	Perfis de correnteza	60
3.12	Resultados dos movimentos de sway e roll para plataforma "A"	75
3.13	Resultados dos movimentos de sway e roll para plataforma "B"	76
3.14	Resultados dos movimentos com ou sem o conjunto de risers	81
4.1	Características das linhas	85
4.2	Condições ambientais	85
4.3	Resultados dos movimentos de sway e roll para condição centenária	87
4.4	Esforços na linha 2	88
4.5	Resultados dos movimentos após avaria da linha 2	91
4.6	Resultados dos movimentos após mudança nas condições de vento.	94

Lista de Figuras

2.1	Resultados obtidos pelo calculo através de painéis e os obtidos de ensaios feitos por Maeda,Nishimoto e Eguchi [21] para as forças de vento nas direções x e y	19
2.2	Resultados obtidos pelo calculo através de painéis e os obtidos de ensaios feitos por Maeda,Nishimoto e Eguchi [21] para os momentos devido ao vento nas direções x e y	20
3.1	Geometria da plataforma "A"	29
3.2	Geometria da plataforma "B"	29
3.3	Distribuição das linhas de ancoragem para a plataforma "A"	32
3.4	Distribuição das linhas de ancoragem para a plataforma "B"	32
3.5	Coefficientes de massa adicional da plataforma A	35
3.6	Coefficientes de amortecimento potencial da plataforma A	36
3.7	Coefficientes de massa adicional da plataforma B	37
3.8	Coefficientes de amortecimento potencial da plataforma B	38
3.9	Função de memória (K_{11}) para a plataforma "A"	40
3.10	Função de memória (K_{22}) para a plataforma "A"	40
3.11	Função de memória (K_{33}) para a plataforma "A"	41
3.12	Função de memória (K_{44}) para a plataforma "A"	41
3.13	Função de memória (K_{55}) para a plataforma "A"	42
3.14	Função de memória (K_{66}) para a plataforma "A"	42
3.15	Função de memória (K_{15}) para a plataforma "A"	43
3.16	Função de memória (K_{24}) para a plataforma "A"	43

3.17 Função de memória (K_{11}) para a plataforma "B"	44
3.18 Função de memória (K_{22}) para a plataforma "B"	44
3.19 Função de memória (K_{33}) para a plataforma "B"	45
3.20 Função de memória (K_{44}) para a plataforma "B"	45
3.21 Função de memória (K_{55}) para a plataforma "B"	46
3.22 Função de memória (K_{66}) para a plataforma "B"	46
3.23 Função de memória (K_{15}) para a plataforma "B"	47
3.24 Função de memória (K_{24}) para a plataforma "B"	47
3.25 Amplitude e fase da função de transferência da plataforma "A" para onda incidindo a 90 graus	52
3.26 Amplitude e fase da função de transferência da plataforma "B" para onda incidindo a 90 graus	53
3.27 Amplitude da função de transferência da plataforma "B" para onda inci- dindo a 45 graus	54
3.28 Fase da função de transferência da plataforma "B" para onda incidindo a 45 graus	55
3.29 Esquema do riser de produção	61
3.30 Esforço horizontal agindo na plataforma devido a um conjunto de 16 risers em função do offset da plataforma	61
• 3.31 Espectro da onda	63
3.32 Amplitudes da onda	63
3.33 Movimento de sway e roll devido apenas ação da onda - plat. "A"	64
3.34 Movimento de sway e roll devido apenas ação da onda - plat. "B"	65

3.35	Movimento de sway e roll devido apenas ação da correnteza - plat. "A" . . .	66
3.36	Movimento de sway e roll devido apenas ação da correnteza - plat. "B" . . .	67
3.37	Espectro da parte flutuante da velocidade do vento	68
3.38	Parte flutuante da velocidade do vento	69
3.39	Movimento de sway e roll devido apenas ação do vento - plat. "A"	70
3.40	Movimento de sway e roll devido apenas ação do vento - plat. "B"	71
3.41	Movimento de sway e roll considerando todos os efeitos ambientais - plat. "A"	72
3.42	Movimento de sway e roll considerando todos os efeitos ambientais - plat. "B"	73
3.43	Histograma dos movimentos de sway e roll para a plataforma "A"	77
3.44	Histograma dos movimentos de sway e roll para a plataforma "B"	78
3.45	Análise espectral dos movimentos de sway e roll para a plataforma "A" . . .	79
3.46	Análise espectral dos movimentos de sway e roll para a plataforma "B" . . .	80
3.47	Movimentos de surge e sway para plataforma "B" com e sem o conjunto de risers	82
3.48	Deslocamento planar da plataforma "B" e o limite de 10 % da lâmina d'agua	83
4.1	Curva dos esforços em uma linha de ancoragem em função do deslocamento da plataforma	86
4.2	Movimentos de sway e roll na condição centenária para plataforma "A" . . .	89
4.3	Espectro da força na linha 2 para a condição anual	90
4.4	Espectro da força na linha 2 para a condição centenária	90

4.5	Movimentos de surge e sway da plataforma "A" quando ocorre a ruptura da linha2	92
4.6	Movimento de yaw da plataforma "A" quando ocorre a ruptura da linha2 .	93
4.7	Deslocamento planar quando ocorre ruptura da linha 2	93
4.8	Movimentos de surge e sway da plataforma "A" quando ocorre mudança na direção e intensidade do vento	95
4.9	Movimento de yaw da plataforma "A" quando ocorre mudança na direção e intensidade do vento	96
4.10	Deslocamento planar quando ocorre alteração nas condições de vento . . .	96
4.11	Movimento de sway em função da velocidade do vento	98
4.12	Altura significativa e período médio de sway em função da velocidade do vento	99
4.13	Tração na linha 2 em função da velocidade do vento	100
4.14	Altura significativa e período médio da tração em função da velocidade do vento	101
4.15	Movimento de sway médio em função da altura significativa e do período médio da onda	102
4.16	Movimento de sway máximo em função da altura significativa e do período médio da onda	103
4.17	Movimento de sway mínimo em função da altura significativa e do período médio da onda	103
4.18	Movimento de sway médio em função do quadrado da altura significativa e do período médio da onda	104

4.19	Altura significativa e período médio de sway em função da altura significativa e do período médio da onda	105
4.20	Tração média em função da altura significativa e do período médio da onda	106
4.21	Tração máxima em função da altura significativa e do período médio da onda	107
4.22	Tração mínima em função da altura significativa e do período médio da onda	107
4.23	Altura significativa e período médio da tração em função da altura significativa e do período médio da onda	108
4.24	Movimento de sway e tração na linha 2 em função da velocidade da correnteza	109
4.25	Altura significativa e período médio da tração em função da velocidade da correnteza	110
A.1	Discretização da plataforma	117
A.2	Definição dos sistemas de coordenadas	117
B.1	Esquema de uma linha de ancoragem	126
B.2	Gráfico genérico da catenária	127

Nomenclatura

Letras Romanas:

A_p	área projetada na direção do vento ou correnteza
a_{ij}	coeficiente de massa adicional na direção i devido ao movimento na direção j
B_{ij}	coeficiente de amortecimento viscoso na direção i devido ao movimento na direção j
b_{ij}	coeficiente de amortecimento potencial na direção i devido ao movimento na direção j
C_d	coeficiente de arrasto para ação do vento
C_{dc}	coeficiente de arrasto para ação da correnteza
C_{ij}	matriz dos coeficientes de restauração hidrostática
C_s	coeficiente de forma
C_h	coeficiente de altura
E	parâmetro de dispersão do espectro
F_i	força ou momento na direção i
F_a	força de restauração do sistema de ancoragem
F_c	força devido a correnteza
F_o^1	força de onda de primeira ordem
F_o^2	força de onda de segunda ordem
F_r	força devido ao riser
F_v	força devido ao vento
g	aceleração da gravidade
H	calado
$H_{1/3}$	altura significativa de onda

$H_1(\omega)$	função de transferência linear
$H_2(\omega_1, \omega_2)$	função de transferência quadrática
$h_1(t)$	função resposta ao impulso linear
$h_2(t_1, t_2)$	função resposta ao impulso quadrática
K_{ij}	função de memória na direção i devido ao movimento na direção j
M_{ij}	matriz de inércia
m_{ij}	coeficiente de massa adicional independente da frequência na direção i devido ao movimento na direção j
$\vec{n}$	vetor normal à superfície externa da estrutura apontando para fora
n_k	componente do vetor normal à superfície na direção k
R	matriz de rotação
$S(\omega)$	espectro de energia da onda
$S_v(\omega)$	espectro de energia da parte flutuante do vento
T	período médio da onda
t	tempo
V_v	módulo da velocidade do vento
$\vec{V}_v$	vetor velocidade do vento
V_c	módulo da velocidade da correnteza
$\vec{V}_c$	vetor velocidade da correnteza
x_j	deslocamento na direção j
$\dot{x}_j$	velocidade na direção j
$\ddot{x}_j$	aceleração na direção j

Letras gregas:

ζ	amplitude de onda
ρ	massa específica da água
ρ_a	massa específica do ar
ω	frequência angular
ϕ	rotação em relação ao eixo $O'x'$
ψ	rotação em relação ao eixo $O'y'$
ϑ	rotação em relação ao eixo $O'z'$
η	amplitude do movimento
ε	ângulo de incidência da onda em relação a plataforma
μ	média
σ	desvio padrão

Sumário

Neste trabalho desenvolveu-se um procedimento para a simulação no domínio do tempo dos movimentos de uma plataforma semi-submersível sujeita a ação de onda, vento e correnteza. Os efeitos devido ao vento e correnteza são obtidos pela discretização da superfície da semi-submersível em painéis. Também são considerados (quase-estaticamente) os efeitos do sistema de ancoragem e riser. A reação hidrodinâmica é determinada pela convolução da transformada de Fourier no domínio do tempo da reação hidrodinâmica obtida no domínio da frequência .

Através da simulação no domínio do tempo foi analisada a influência do vento, onda e correnteza no comportamento do sistema de ancoragem. Além disso, verificou-se o que ocorre quando uma linha do sistema de ancoragem se rompe ou as condições de vento subitamente se alteram.

Abstract

In this work a time domain procedure is developed to simulate the motions of a semisubmersible subjected to wave, wind and current. The effects of wind and current are obtained dividing the semisubmersible surface in panels. The effects of mooring system and riser are also quasi-statically considered. The hydrodynamic reaction is determined by the integral convolution from the Fourier transformed in the time domain of the frequency domain hydrodynamic reaction.

Trough the time domain simulation it is analysed the influence of the wind, wave and current on the behavior of the mooring system. Besides it is verified what happen when a rope of the mooring system failures or when the wind conditions change quickly.

1 INTRODUÇÃO

O petróleo tem sido ao longo dos anos o principal elemento da matriz energética mundial tornando-se, assim, um fator estratégico para a economia de todos os países. Isto tem motivado a exploração e produção das reservas de petróleo no mar em águas de profundidade cada vez maior, onde freqüentemente são utilizadas plataformas semi-submersíveis.

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 certos requisitos devem ser satisfeitos para que as atividades de perfuração e produção sejam realizadas com máxima segurança e economia. Um aspecto que deve ser considerado na escolha ou projeto de uma semi-submersível é garantir que tal estrutura mantenha uma posição de equilíbrio estável nas mais diversas condições de operação e sob solicitações do meio ambiente. Outro aspecto a ser considerado é garantir que os movimentos da estrutura sejam tais que ao longo da sua vida útil os movimentos estejam dentro de certos limites de forma que as operações de perfuração e produção não necessitem aguardar um período de tempo muito longo para serem efetuadas.

Portanto é importante para o projetista conhecer a dinâmica dos movimentos de uma semi-submersível para que seja possível escolher a forma e as dimensões do casco que melhor satisfaçam os requisitos de projeto previamente definidos, além do que permitir o dimensionamento do sistema de ancoragem ou posicionamento dinâmico e riser.

O comportamento de uma plataforma semi-submersível pode ser determinado através da realização de testes em tanque de provas com modelos em escala reduzida ou através da simulação numérica em computador. A utilização da simulação em computador nas etapas iniciais do projeto de uma semi-submersível permite estudar os movimentos da

estrutura variando muitos parâmetros evitando-se, assim, a construção de vários modelos. Ocorre, também, que certos testes são de custo muito elevado devido a complexidade do modelo e das condições ambientais a serem testadas, desta forma o emprego da simulação em computador evitaria a realização de testes indesejáveis. Algumas vezes as limitações nas instalações e nos equipamentos não permitem que testes sejam realizados para certas condições, assim o emprego da simulação em computador possibilitaria a verificação de tais condições.

A simulação dos movimentos de uma semi-submersível pode ser feita no domínio do tempo através da integração das equações do movimento da estrutura ou no domínio da frequência através das transformadas de Laplace ou Fourier das mesmas. Embora a análise no domínio da frequência seja mais simples em termos computacionais, tal análise requer que as não linearidades sejam substituídas por aproximações lineares o que já não ocorre na análise no domínio do tempo.

Neste trabalho procurou-se estudar os movimentos de uma plataforma semi-submersível sujeita à ação dos esforços ambientais de vento, correnteza e onda e analisar o comportamento do sistema de ancoragem através da simulação no domínio do tempo.

Existem dois métodos para a simulação dos movimentos de uma plataforma semi-submersível no domínio do tempo. Um método baseia-se na descrição proposta por Cummings [1] em que os movimentos da estrutura podem ser representados pela sucessão de pequenos deslocamentos impulsivos. Tal método foi revisto por Ogilvie [2] introduzindo as funções de memória e aplicado por Oortmerssen [3] para a determinação dos movimentos no domínio do tempo de embarcações ancoradas. Outro método consiste em considerar os coeficientes da equação diferencial do movimento constantes. Takagi e Saito [4] apresentam uma descrição deste método e comparação com o método anterior. Ferreira [5] discute os principais problemas provenientes da utilização das funções de memória na simulação dos movimentos de uma semi-submersível.

Os movimentos de uma plataforma semi-submersível são resultantes da ação

dos esforços de vento, correnteza e onda. Na simulação dos movimentos no domínio do tempo estes esforços devem ser determinados a cada instante de tempo para que seja possível efetuar a integração da equação do movimento.

Os esforços de onda podem ser divididos em esforços de primeira ordem proporcionais à altura da onda e com frequência de oscilação igual à frequência da onda e esforços de segunda ordem que são proporcionais ao quadrado da altura da onda e com frequência de oscilação muito menor que a frequência da onda. Os esforços de segunda ordem apresentam uma componente de força constante que tende a afastar a semi-submersível da sua posição inicial e uma componente variável de baixa frequência. Esta componente de baixa frequência é de particular importância no estudo dos movimentos de uma semi-submersível ancorada, pois a frequência de oscilação destes esforços encontra-se próxima da frequência natural de oscilação da semi-submersível no plano horizontal resultando em movimentos de grande amplitude.

Um modelo utilizado para a determinação dos esforços de primeira e segunda ordem no domínio baseia-se nos dois primeiros termos da série de Volterra. A utilização de séries de potência de funcionais no estudo do comportamento de embarcações foi inicialmente sugerido por Tick [6] e aplicado por Dalzell [7] no estudo do aumento da resistência ao avanço de embarcações causado pelas ondas.

Os esforços de primeira ordem são obtidos admitindo que o escoamento ao redor de uma estrutura flutuante pode ser considerado incompressível e irrotacional de forma que a velocidade da partícula fluida possa ser representada pelo gradiente de uma função potencial que satisfaça a equação de Laplace e as condições de contorno na superfície do corpo, na superfície livre e no fundo. Esta função potencial pode ser numericamente determinada utilizando-se o método de distribuição de fontes e sorvedouros que se baseia na resolução equação integral bidimensional de Fredholm obtida com o auxílio do teorema de Green. Assim uma vez determinada a função potencial pode-se calcular o campo de pressões ao redor da estrutura utilizando-se a equação linearizada de Bernoulli. Obido o

campo de pressões as forças e os momentos de primeira ordem podem ser determinados através da integração deste campo de pressões. Uma revisão dos métodos utilizados, bem como uma descrição mais detalhada sobre a determinação dos esforços de primeira ordem podem ser obtidas nas referências [8], [9], [10], [11] e [12].

Calculando-se a função potencial até a aproximação de segunda ordem, de forma que as condições de contorno até segunda ordem na superfície livre também sejam satisfeitas pode-se, então, calcular as forças e os momentos através da integração do campo de pressões determinado pela equação de Bernoulli contendo todos os termos de segunda ordem. Pinkster [13], Pinkster e Huijsmans [15] e Faltinsen e Løken [16] descrevem a teoria dos esforços de segunda ordem para estruturas flutuantes obtendo tais esforços através da integração direta do campo de pressões utilizando o método de distribuição de fontes e sorvedouros.

Alguns trabalhos procuram utilizar certas aproximações de forma que não seja necessário calcular o potencial de segunda ordem para se determinar os esforços. Newman [17] estabeleceu uma aproximação de modo a expressar os esforços de segunda ordem em função da componente constante de segunda ordem. Na mesma linha de raciocínio Hsu e Blenkarn [18] dividiram uma onda irregular em partes que podem ser aproximadamente consideradas como partes de ondas regulares, sendo que cada uma destas partes exerce sobre a estrutura uma força ou momento constante de segunda ordem. Ogilvie [19] apresenta uma revisão dos métodos e dos conceitos envolvidos no cálculo dos esforços de segunda ordem.

Os esforços devido ao vento e correnteza geralmente são determinados através de formulações semi-empíricas fornecidas pelas regras de Sociedades Classificadoras, tais como ABS [20] e DnV [21], ou através de ensaio em túnel de vento conforme apresentado por Maeda, Nishimoto e Eguchi [22]. Considerações sobre a determinação dos esforços de vento e correnteza para o dimensionamento do sistema de ancoragem ou posicionamento dinâmico de estruturas oceânicas são feitas por Remery e Oortmerssen [23].

Para o cálculo dos esforços de vento e correnteza através das formulações das Sociedades Classificadoras é necessário a determinação das áreas da semisubmersível expostas ao vento ou correnteza. Neste trabalho é apresentado um procedimento baseado nas formulações do ABS [20] para o cálculo dos esforços de vento e correnteza a cada instante de tempo considerando-se as variações de área projetada decorrentes dos movimentos da plataforma.

Além dos esforços ambientais que são esforços de excitação tem-se os esforços de restauração resultantes do sistema de ancoragem. O efeito do sistema de ancoragem pode ser considerado quase-estaticamente modelando as linhas através da equação da catenária. Basicamente o projeto do sistema de amarração consiste na verificação da tensão estática da linha mais solicitada e do deslocamento máximo permitido da semi-submersível em relação à cabeça do poço. Isto é feito determinando-se a posição de equilíbrio da estrutura resultante do balanço entre as forças ambientais consideradas constantes, que afastam a estrutura da sua posição inicial, e as forças restauradoras que tendem a mantê-la nesta posição. A esta posição de equilíbrio são somados os deslocamentos máximos de primeira e segunda ordem obtendo-se, assim, o deslocamento final.

Neste trabalho a análise do sistema de ancoragem da semi-submersível é feito integrando-se a equação do movimento no domínio do tempo de modo que os esforços não lineares do sistema de ancoragem possam ser considerados exatamente como agem na plataforma.

O estudo do sistema de ancoragem de plataformas semi-submersíveis tem sido abordado por vários autores. Takezawa e Hirayama [24] investigaram experimentalmente as tensões no sistema de ancoragem e o ângulo de inclinação de uma semi-submersível aplicando esforços ambientais devido a onda irregular, vento irregular e correnteza constante. Takezawa, Hirayama e Morooka [25] apresentam resultados de um estudo considerando os efeitos da lâmina d'água e do sistema de ancoragem nos movimentos de uma semi-submersível quando sujeita a ondas compostas por uma larga faixa de frequências.

No Capítulo 2 é apresentada uma descrição dos principais aspectos teóricos envolvidos no estudo dos movimentos de uma plataforma semi-submersível, sendo apresentados a equação que rege os movimentos da plataforma e o procedimento de integração desta equação .

Estes conceitos teóricos são aplicados no Capítulo 3 na simulação dos movimentos de duas plataformas. Procurou-se mostrar como foram numericamente avaliados os vários fatores que influenciam nos movimentos de uma semi-submersível. São apresentados resultados de simulações considerando a ação do vento, correnteza e onda agindo separadamente e simultaneamente. Também são mostrados alguns resultados considerando o efeito de um conjunto de risers nos movimentos de uma semi-submersível.

Pretende-se mostrar, no Capítulo 4, através da simulação numérica como um sistema de ancoragem se comporta quando sujeito a condições ambientais dinâmicas e a condições críticas, como por exemplo a avaria de uma das linhas do sistema de ancoragem. Além disso pretende-se apresentar uma análise do sistema de ancoragem baseado na análise estatística dos históricos dos movimentos obtidos através da simulação no domínio do tempo para várias condições de vento, correnteza e onda.

As principais conclusões e recomendações para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 5.

2 SIMULAÇÃO DOS MOVIMENTOS

2.1 SISTEMA DE COORDENADAS

Para o estudo dos movimentos de uma plataforma semi-submersível foram considerados os seguintes sistemas de eixos ortogonais :

- um sistema OXYZ fixo com a origem "O" no plano de linha d'água e sobre a cabeça do poço;
- um sistema Gxyz fixo na estrutura e com a origem "G" no centro de gravidade da estrutura;

Os movimentos de uma plataforma semi-submersível podem ser decompostos em movimentos de translação e em movimentos de rotação . Os movimentos de translação x_1 , x_2 e x_3 (surge, sway e heave respectivamente) em relação ao referencial fixo OXYZ são obtidos aplicando-se a Lei de Newton como se toda a massa da estrutura estivesse concentrada no centro de gravidade. A descrição dos movimentos de rotação da estrutura é feita através de um conjunto de ângulos chamados de ângulos de Euler e definidos da seguinte forma : considerando o referencial Gxyz com eixos paralelos aos eixos do referencial OXYZ então inicialmente aplica-se uma rotação x_6 (yaw) em relação ao eixo Gz; em torno da nova posição do eixo Gy aplica-se uma nova rotação x_5 (pitch); após estas duas rotações aplica-se uma rotação x_4 (roll) em relação ao eixo Gx.

Desta forma é possível descrever no sistema OXYZ a posição (x,y,z) de um ponto no sistema Gxyz através da seguinte expressão :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_2 \\ z_3 \end{pmatrix} + [R] \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

onde $[R]$ é a matriz de transformação de coordenadas definida da seguinte forma

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos x_6 \cos x_5 & \cos x_6 \sin x_5 \sin x_4 - \sin x_6 \cos x_4 & \sin x_6 \sin x_4 + \cos x_6 \sin x_5 \cos x_4 \\ \sin x_6 \cos x_5 & \cos x_6 \cos x_4 + \sin x_6 \sin x_5 \sin x_4 & \sin x_6 \sin x_5 \cos x_4 - \cos x_6 \sin x_4 \\ -\sin x_5 & \cos x_5 \sin x_4 & \cos x_5 \cos x_4 \end{bmatrix}$$

Assumindo que as rotações x_4, x_5 e x_6 sejam pequenas e desprezando os termos de segunda ordem é possível reescrever a matriz de transformação $[R]$ do seguinte modo :

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & -x_6 & x_5 \\ x_6 & 1 & -x_4 \\ -x_5 & x_4 & 1 \end{bmatrix}$$

Obtem-se, assim, uma relação linear de transformação entre o sistema inercial OXYZ e o sistema fixo na estrutura Gxyz dado por :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_2 \\ z_3 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -x_6 & x_5 \\ x_6 & 1 & -x_4 \\ -x_5 & x_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

2.2 EQUAÇÃO DO MOVIMENTO

Uma estrutura flutuante pode ser modelada como um sistema massa, mola e amortecedor. Assim, segundo a Lei de Newton, a equação do movimento para os seis graus de liberdade apresentados anteriormente terá a seguinte forma :

$$\sum_{j=1}^6 (M_{ij} + a_{ij}) \ddot{x}_j + b_{ij} \dot{x}_j + C_{ij} x_j = F_i(t), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (2.1)$$

onde M_{ij} é a matriz de inércia; a_{ij} e b_{ij} representam a reação hidrodinâmica e são as matrizes de massa adicional e amortecimento potencial respectivamente; C_{ij} é a matriz de restauração hidrostática; $F_i(t)$ é o vetor dos esforços variável ao longo do tempo.

Na equação (2.1) as matrizes a_{ij} e b_{ij} que representam a reação hidrodinâmica variam com a frequência de oscilação dos movimentos, sendo portanto conveniente para uma descrição dos movimentos no domínio da frequência, onde a frequência de oscilação dos movimentos é constante. Assim para se obter a equação do movimento no domínio do tempo que instantaneamente relacione as variáveis devido ao movimento e as forças externas pode-se utilizar as funções resposta ao impulso conforme apresentado por Cummings [1]. Desta forma a resposta de um sistema linear estável sujeito a uma excitação arbitrária $f(t)$ é dada por

$$x(t) = \int_{-\infty}^t K(t - \delta) f(\delta) d\delta$$

onde $K(t - \delta)$ é a função resposta ao impulso unitário.

Assim pode-se descrever um movimento qualquer como uma sucessão de pequenos impulsos de deslocamento, de modo que a reação total do fluido em cada instante seja igual à soma da força de reação devido a cada impulso de deslocamento. A partir destas idéias a força de reação hidrodinâmica na equação do movimento no domínio do

tempo é determinada por certas funções e constantes que podem ser obtidas através da relação entre as equações do movimento no domínio do tempo e no domínio da frequência conforme mostra Oortmerssen [3].

Logo a equação do movimento no domínio do tempo pode ser escrita da seguinte forma :

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{ij} + m_{ij})\ddot{x}_j + \int_{-\infty}^t K_{ij}(t-\tau)\dot{x}_j(\tau)d\tau + C_{ij}x_j] = F_i(t), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (2.2)$$

onde M_{ij} é a matriz de massa; C_{ij} é a matriz de restauração hidrostática; K_{ij} é a função resposta ao impulso ou função de memória; m_{ij} são os coeficientes de massa adicional independente da frequência; $F_i(t)$ representa os esforços de excitação externos e os esforços do sistema de ancoragem.

Os coeficientes de massa adicional a_{ij} e amortecimento potencial b_{ij} dependentes da frequência estão relacionados com os coeficientes m_{ij} e com a função resposta ao impulso K_{ij} através das seguintes relações :

$$a_{ij} = m_{ij} - \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} K_{ij}(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau \quad (2.3)$$

$$b_{ij} = \int_0^{\infty} K_{ij}(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau \quad (2.4)$$

No Apêndice C são mostrados alguns passos para a dedução da equação (2.2) e das expressões (2.3) e (2.4).

Assim a função resposta ao impulso pode ser obtida através da transformada inversa de Fourier da equação (2.4). Logo

$$K_{ij} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{ij}(\omega) \cos \omega t d\omega$$

O coeficiente m_{ij} é determinado através da equação (2.3) para um valor arbitrário de frequência, uma vez que este é independente da frequência. Assim

$$m_{ij} = a_{ij}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^\infty K_{ij}(t) \sin \omega t dt$$

Na equação do movimento (2.2) a reação hidrodinâmica foi considerada linear. Existem, porém, efeitos não lineares, como os efeitos viscosos, que se manifestam principalmente devido à separação do fluido causando forças de arrasto. Tais efeitos podem ser incorporados na equação do movimento utilizando-se um modelo de escoamento no qual o movimento da partícula fluida não dependa do movimento da estrutura. Isto é feito introduzindo-se a matriz de coeficientes de amortecimento viscoso B_{ij} na equação do movimento da seguinte forma :

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{ij} + m_{ij}) \ddot{x}_j + \int_{-\infty}^t K_{ij}(t - \tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + B_{ij} | \dot{x}_j | \dot{x}_j + C_{ij} x_j] = F_i(t), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (2.5)$$

O vetor de esforços da equação (2.5) pode ser decomposto nos esforços devido ao sistema de ancoragem, nos esforços de primeira e segunda ordem devido à ação da onda, nos esforços devido ao vento, nos esforços de arrasto devido ao movimento da partícula fluida e eventualmente nos esforços devido ao riser. Para determinação dos esforços devido ao movimento da partícula fluida deve-se observar que a velocidade da partícula é resultante da soma da velocidade da correnteza e da velocidade da partícula devido à onda. Neste trabalho desprezou-se a velocidade da partícula devido à onda considerando-se apenas a velocidade da correnteza. Assim reescrevendo a equação (2.5) obtem-se :

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{ij} + m_{ij}) \ddot{x}_j + \int_{-\infty}^t K_{ij}(t - \tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + B_{ij} | \dot{x}_j | \dot{x}_j + C_{ij} x_j] = F_o^1(t) + F_o^2(t) + Fv_i(t) + Fc_i(t) + Fa_i(t) + Fr_i(t), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (2.6)$$

onde

$Fa_i^1(t)$ é o esforço de onda de primeira ordem na direção i ;

$Fa_i^2(t)$ é o esforço de onda de segunda ordem na direção i ;

$Fv_i(t)$ é o esforço devido ao vento na direção i ;

$Fc_i(t)$ é o esforço devido a correnteza na direção i ;

$Fr_i(t)$ é o esforço devido ao riser na direção i ;

$Fa_i(t)$ é o esforço devido ao sistema de ancoragem na direção i .

Nos próximos itens serão detalhados os procedimentos para a determinação dos coeficientes e dos esforços da equação (2.6) necessários para a simulação numérica dos movimentos da semi-submersível.

2.3 FUNÇÃO DE MEMÓRIA

Como apresentado anteriormente a função de memória é dada por:

$$K_{ij} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty b_{ij}(\omega) \cos \omega t d\omega$$

Portanto para se determinar K_{ij} é necessário o conhecimento do amortecimento potencial (b_{ij}) para toda a faixa de freqüências . Para contornar esta dificuldade pode-se admitir que o amortecimento potencial apresente um comportamento assintótico para zero em altas freqüências conforme proposto por Oortmerssen [3] para o caso de navios. Desta forma tem-se o seguinte ajuste :

$$b_{ii} = \frac{C_i}{\omega^n}$$

para $i = 1, 2, 4, 6$ $n = 3$ e para $i = 3, 5$ $n = 7$

Para estruturas com dupla simetria apenas os termos cruzados b_{15}, b_{51}, b_{24} e b_{42} para o amortecimento potencial estão presentes e para os quais $n = 5$ conforme apresentado por Ferreira [5].

Desta forma utilizando-se estas aproximações assintóticas pode-se determinar as funções de memória através da seguinte expressão :

$$K_{ij} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\omega_1} b_{ij}(\omega) \cos \omega t d\omega + \frac{2}{\pi} \int_{\omega_1}^{\infty} \frac{C_i}{\omega^n} \cos \omega t d\omega$$

Nesta equação admitem-se conhecidos os amortecimentos potenciais para uma faixa de frequências entre 0 e ω_1 e os coeficientes C_i são determinados de acordo com o valor do amortecimento potencial para a frequência ω_1 . No Capítulo 4 são apresentados os procedimentos numéricos utilizados no cálculo das funções de memória, assim como são apresentados alguns exemplos.

2.4 ESFORÇOS DE ONDA

Os esforços devido à ação da onda ao longo do tempo atuando em uma plataforma semi-submersível podem ser modelados pelos dois primeiros termos de uma série de Volterra, conforme Dalzell [7], da seguinte forma :

$$Fo(t, \varepsilon) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau, \varepsilon) \zeta(t - \tau) d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2, \varepsilon) \zeta(t - \tau_1) \zeta(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (2.7)$$

Nesta equação $\zeta(t)$ representa as amplitudes de onda ao longo do tempo em uma dada posição no mar. Assume-se, neste trabalho, que a onda incidente é unidirecional e sem espalhamento de energia. As funções $h_1(\tau, \varepsilon)$ e $h_2(\tau_1, \tau_2, \varepsilon)$ são as funções resposta ao impulso de primeira e segunda ordem respectivamente, dependentes do ângulo de incidência da onda ε em relação à plataforma. Assim o primeiro termo do lado direito da

equação (2.7) representa os esforços de primeira ordem linear na faixa de frequência das ondas e o segundo termo os esforços não lineares de baixa frequência. Deve-se observar que o esforço de onda é função do ângulo de incidência da onda em relação à plataforma, ou seja, as funções resposta ao impulso de primeira e segunda ordem também dependem da posição da plataforma em relação a onda. No presente trabalho, porém, não considerou-se tal dependência reescrevendo a equação (2.7) da seguinte forma :

$$Fo(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau)\zeta(t-\tau)d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2)\zeta(t-\tau_1)\zeta(t-\tau_2)d\tau_1d\tau_2 \quad (2.8)$$

As funções resposta ao impulso podem ser obtidas através das seguintes relações

$$h_1(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_1(\omega) \exp^{i\omega t} d\omega \quad (2.9)$$

$$h_2(t_1, t_2) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_2(\omega_1, \omega_2) \exp^{i(\omega_1 t_1 - \omega_2 t_2)} d\omega_1 d\omega_2 \quad (2.10)$$

onde $H_1(\omega)$ é a função de transferência do esforço de onda de primeira ordem e $H_2(\omega_1, \omega_2)$ é a função de transferência quadrática do esforço de onda de segunda ordem.

A função de transferência de primeira ordem é obtida calculando-se os esforços de primeira ordem no domínio da frequência através da teoria tridimensional da difração de onda, como pode ser encontrado em várias referências, tais como Mei [12], Chakrabarti e Cotter [26]. Os esforços de onda de segunda ordem no domínio da frequência para o cálculo da função de transferência quadrática pode ser feito através do método da integração direta conforme apresentado por Pinkster [13].

A geração das amplitudes de onda ao longo do tempo na equação (2.8) pode ser feita através do modelo não determinístico de amplitude espectral (NSA) no qual a amplitude e a fase de cada componente da onda irregular são aleatórios conforme indicado

por Hearn, Lau e Tong [14]. Assim para um dado espectro de energia de onda $S(\omega)$ as amplitudes ao longo do tempo são obtidas pela seguinte relação :

$$\zeta(t) = \sum_1^N A_i \cos \omega_i t - B_i \sin \omega_i t \quad (2.11)$$

onde N é o número de componentes da onda irregular; ω_i é a frequência de cada componente e

$$A_i = \alpha_i [S(\omega_i) \Delta \omega_i]^{\frac{1}{2}}$$

$$B_i = \beta_i [S(\omega_i) \Delta \omega_i]^{\frac{1}{2}}$$

sendo que α_i e β_i são variáveis aleatórias com distribuição Gaussiana, média zero e variância unitária.

O espectro de energia utilizado para a simulação das amplitudes de onda é o espectro de dois parâmetros do ITTC dado pela seguinte expressão :

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp^{-\frac{B}{\omega^4}}$$

onde

$$A = \frac{124 H_s}{T^4}$$

$$B = \frac{495.6}{T^4}$$

H_s é a altura significativa da onda e

T é o período médio.

2.5 ESFORÇOS DE VENTO

Os esforços devido à ação do vento que atuam em um elemento da semi-submersível podem ser obtidos através da seguinte expressão :

$$\vec{F}_v = \frac{1}{2} \rho_a C_d A_p |\vec{V}_v| \vec{V}_v \quad (2.12)$$

onde

$\vec{V}_v$ é a velocidade do vento;

ρ_a é a massa específica do ar;

C_d é o coeficiente de arrasto do elemento;

A_p é a área projetada do elemento.

Desta forma para se determinar o esforço de vento em cada instante de tempo é necessário conhecer a área exposta ao vento e a velocidade da semi-submersível. Para a determinação da área dividiu-se a parte emersa da estrutura em painéis retangulares ou triangulares conforme descrito no Apêndice A. Assim utilizando os coeficientes de arrasto fornecidos pelas regras do ABS [20] as forças e momentos atuando na semi-submersível devido à ação do vento podem ser obtidos somando-se as forças e os momentos de cada painel.

Neste trabalho para o cálculo dos esforços de vento foram feitas as seguintes considerações :

- a velocidade do vento é paralela à superfície do mar e possui direção constante em relação ao referencial OXYZ;
- a velocidade do vento é composta por uma componente de velocidade constante e uma componente de velocidade flutuante;
- a velocidade da semi-submersível possui a mesma direção da velocidade do vento;
- não foram considerados os efeitos de sombra e esteira e os efeitos de sustentação .

Para ilustrar a validade do método proposto anteriormente as Figuras 2.1 e 2.2 apresentam alguns resultados experimentais obtidos por Maeda, Nishimoto e Eguchi [22] e os resultados calculados pelo método dos painéis. Os esforços adimensionalizados da seguinte forma :

$$\text{força : } C_{df} = \frac{F}{0.5\rho_a V_R^2 A_f}$$

$$\text{momento : } C_{dm} = \frac{M}{0.5\rho_a V_R^2 A_f L_o}$$

onde

V_R é a velocidade do vento a 15.3 m acima do nível do mar;

A_f é a área frontal total projetada da semi-submersível;

L_o é o comprimento do convés;

foram obtidos para vários ângulos de incidência do vento considerando a plataforma fixa e sem ângulo de inclinação . Deve-se observar que estes resultados têm apenas um caráter ilustrativo, uma vez que o modelo utilizado no experimento possuía todos os elementos do convés, como por exemplo, torre, guindastes, casarias, heliporto, etc, enquanto no modelo utilizado para o cálculo apenas a torre foi considerada.

Para a determinação da velocidade do vento a componente constante pode ser obtida através do perfil de velocidades proposto pelas regras do ABS [20], enquanto que a parte flutuante pode ser determinada a partir do espectro de energia sugerido pela OCIMF [27] dado pela seguinte expressão :

$$Sv(\omega) = \frac{4041 K V_v}{[1 + (202 \frac{\omega}{V_v})^2]^{\frac{5}{6}}}$$

onde

K é o fator de turbulência e igual a 0.005 para mar aberto;

V_v é a velocidade média do vento a 10.0m acima do nível do mar.

Desta forma a parte flutuante da velocidade do vento ao longo do tempo pode

ser obtida através da seguinte expressão :

$$Vf_v(t) = \sum_1^N A_i \cos \omega_i t - B_i \sin \omega_i t$$

onde N é o número de componentes da velocidade flutuante; ω_i é a frequência de cada componente e

$$A_i = \alpha_i [Sv(\omega_i) \Delta \omega_i]^{\frac{1}{2}}$$

$$B_i = \beta_i [Sv(\omega_i) \Delta \omega_i]^{\frac{1}{2}}$$

sendo que α_i e β_i são variáveis aleatórias com distribuição Gaussiana, média zero e variância unitária.

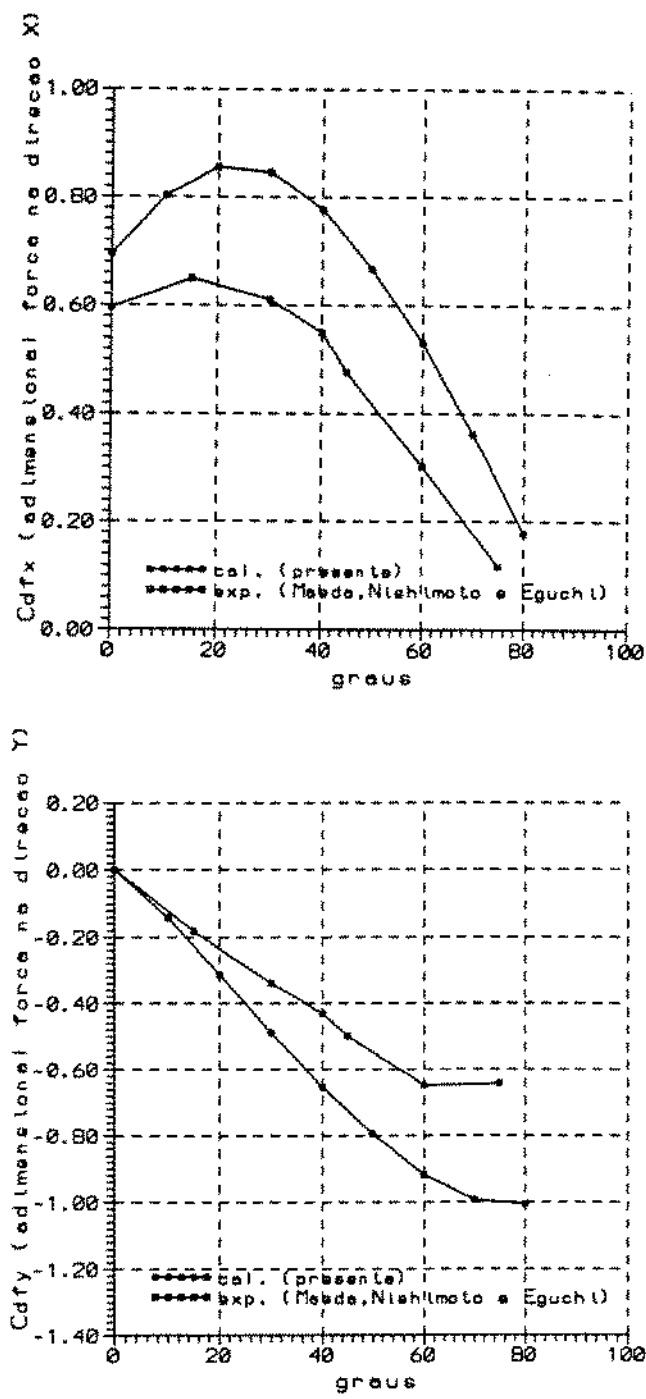


Figura 2.1: Resultados obtidos pelo calculo através de painéis e os obtidos de ensaios feitos por Maeda,Nishimoto e Eguchi [21] para as forças de vento nas direções x e y

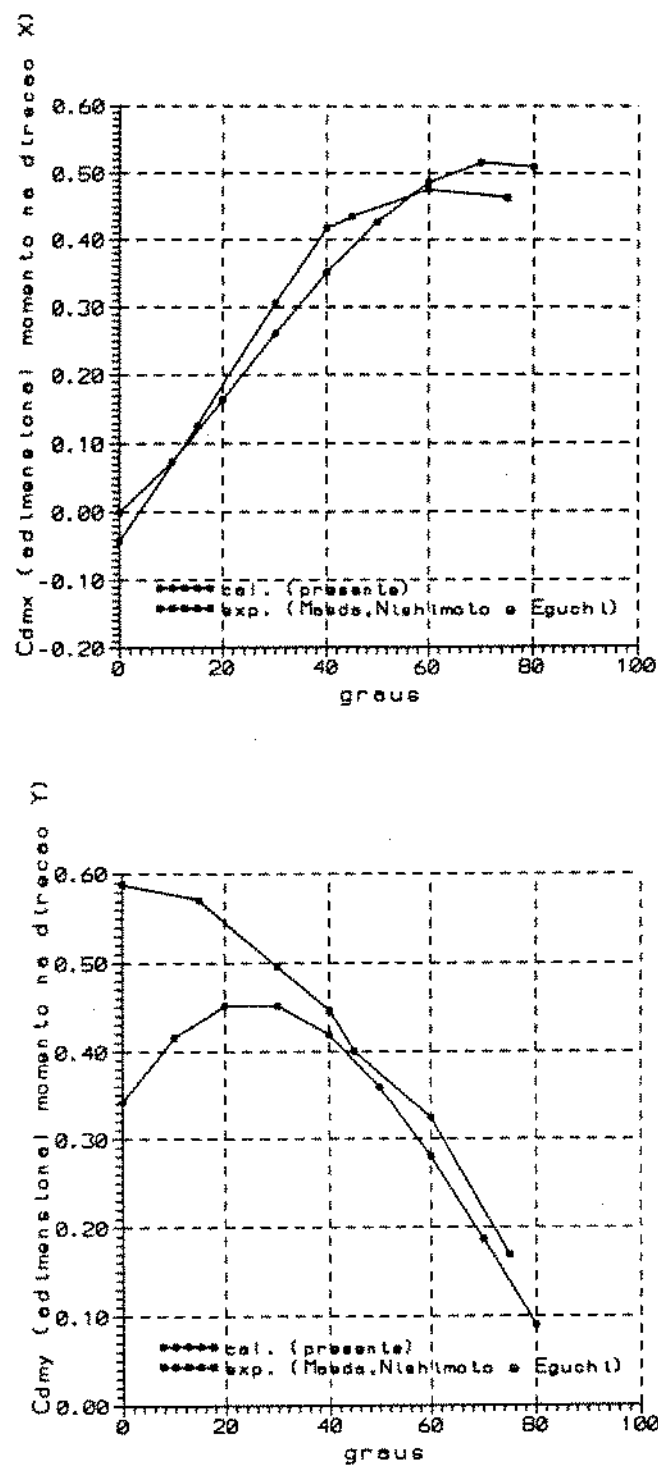


Figura 2.2: Resultados obtidos pelo calculo através de painéis e os obtidos de ensaios feitos por Maeda,Nishimoto e Eguchi [21] para os momentos devido ao vento nas direções x e y

2.6 ESFORÇOS DE CORRENTEZA

Os esforços de arrasto em um elemento da semi-submersível devido à ação da correnteza podem ser obtidos através da seguinte expressão :

$$\vec{F}_c = \frac{1}{2} \rho C_{dc} A_p |\vec{x} - \vec{V}_c| (\vec{x} - \vec{V}_c)$$

onde

$\vec{V}_c$ é a velocidade da correnteza;

$\vec{x}$ é a velocidade da estrutura;

C_{dc} é o coeficiente de arrasto;

ρ é a massa específica da água;

A_p é a área projetada do elemento.

Analogamente ao cálculo dos esforços devido à ação do vento os esforços de correnteza em cada instante podem ser determinados dividindo-se a parte imersa da estrutura em painéis retangulares ou triangulares e somando-se a contribuição de cada painel para as forças e momentos conforme descrito no Apêndice A.

No cálculo dos esforços de correnteza considerou-se que a velocidade e a direção da correnteza são constantes em relação ao referencial OXYZ e que os coeficientes de arrasto para cada painel podem ser obtidos através das regras do ABS [20]. Como no cálculo dos esforços de vento, os efeitos de sombra, esteira e sustentação não foram considerados.

2.7 SISTEMA DE ANCORAGEM

Os esforços devido ao sistema de ancoragem são esforços de restauração forne-

cidos por um sistema de linhas de ancoragem constituído de cabos de aço ou corrente que unem a plataforma em um ponto chamado "fairlead" ao ponto de ancoragem no fundo do mar. O comportamento destas linhas pode ser modelado através da equação da catenária, conforme mostra o Apêndice B, resultando, desta forma, em esforços de restauração não lineares.

Assim fornecidas as características das linhas, as coordenadas dos pontos de ancoragem em relação ao referencial OXYZ e as coordenadas dos "fairleads" no referencial oxyz conforme definido no Apêndice A é possível determinar os esforços de restauração em cada instante de tempo devido ao sistema de ancoragem através de uma análise quase-estática, onde não são considerados os efeitos dinâmicos das linhas. Para tanto a cada instante as distâncias no plano OXY dos "fairleads" aos pontos de ancoragem devem ser determinadas. Com estas distâncias e desprezando-se a variação de cota dos "fairleads" consegue-se através das equações apresentadas no Apêndice B obter o esforço horizontal em cada linha do sistema de ancoragem. Tal esforço atua na direção da projeção da reta que une o "fairlead" à ancora no plano OXY e com sentido do "fairlead" para a ancora.

Procedendo-se, assim, pode-se obter os esforços resultantes nas direções OX e OY e o momento em relação ao eixo OZ atuando no centro de gravidade da semi-submersível projetando-se os esforços horizontais para cada linha do sistema de ancoragem. Deve-se observar que neste trabalho não foi considerada a influência dos esforços verticais das linhas de ancoragem nos movimentos da plataforma e nem o efeito da elasticidade das linhas.

2.8 RISER

O efeito do riser ou conjunto de risers agindo na semi-submersível pode ser considerado através de uma análise quase-estática como feito para o sistema de ancoragem.

Para tanto é necessário conhecer os esforços do riser atuando na semi-submersível em função do deslocamento da plataforma em relação à cabeça do poço (Offset). Esta curva de esforços depende das características geométricas e de operação do riser e das condições ambientais podendo ser obtida utilizando-se, por exemplo o método dos elementos finitos.

Neste trabalho as seguintes considerações foram feitas para a determinação dos esforços devido ao riser :

- riser acoplado no centro de gravidade da semi-submersível;
- considerou-se apenas os esforços horizontais atuando na estrutura;
- a direção do esforço horizontal é determinada pela projeção da reta no plano OXY que une o centro de gravidade (CG) da semi-submersível e a cabeça do poço, sendo que o sentido é do CG para o poço;
- foram desprezadas as variações de cota do topo do riser.

Desta forma para cada instante o efeito do riser na semi-submersível pode ser obtido calculando-se a distância do CG até a cabeça do poço e através da curva força horizontal por deslocamento obter o módulo da força cuja direção foi definida anteriormente. Assim projetando-se esta força nas direções OX e OY obtem-se o efeito do riser em cada instante.

2.9 INTEGRAÇÃO DA EQUAÇÃO DO MOVIMENTO

A seguir será descrito o procedimento numérico utilizado para integração da equação do movimento. Por simplicidade inicialmente apresentar-se-á o procedimento de integração para um grau de liberdade, sendo posteriormente generalizado para o caso de

seis graus de liberdade acoplados. Portanto escrevendo a equação do movimento (2.6) para um grau de liberdade tem-se:

$$(M + m)\ddot{x} + \int_0^\infty K(\tau)\dot{x}(t - \tau)d\tau + B|\dot{x}| + Cx = F \quad (2.13)$$

onde

M é a inércia da estrutura;

m é o coeficiente de massa adicional independente;

K é a função de memória;

B é o amortecimento viscoso;

C é a restauração hidrostática;

$F(t)$ é o vetor de esforços.

A integral de convolução da equação (2.13) pode ser aproximada por uma soma finita utilizando-se a regra trapezoidal da seguinte forma :

$$\int_0^\infty K(\tau)\dot{x}(t - \tau)d\tau \approx \frac{\Delta t}{2}[K(0)\dot{x}(t) + K(N\Delta t)\dot{x}(t - N\Delta t)] + \Delta t \sum_{i=1}^{N-1} K(i\Delta t)\dot{x}(t - i\Delta t) \quad (2.14)$$

onde N é o número de intervalos de tempo para os quais a função de memória foi avaliada.

A função de memória tende para zero ao longo do tempo, assim considerando o termo $K(N\Delta t)\dot{x}(t - N\Delta t)$ na equação (2.15) pequeno em comparação com os outros termos este pode ser desprezado e a equação do movimento (2.13) reescrita da seguinte forma :

$$(M + m)\ddot{x} + \frac{\Delta t}{2}K(0)\dot{x} + \Delta t \sum_{i=1}^{N-1} K(i\Delta t)\dot{x}(t - i\Delta t) + B|\dot{x}| + Cx = F \quad (2.15)$$

Fazendo

$$\frac{\Delta t}{2} K(0) \dot{x} = B'$$

$$\Delta t \sum_1^{N-1} K(i\Delta t) \dot{x}(t - i\Delta t) = D$$

obtem-se

$$(M + m)\ddot{x} + B'\dot{x} + B|\dot{x}| + Cx + D = F \quad (2.16)$$

Assim a equação (2.16) deve ser integrada para a obtenção da aceleração, velocidade e deslocamento da semi-submersível em cada instante. Para integração desta equação utilizou-se o método Wilson- θ conforme descrito na referência [28]. Tal método estabelece que a aceleração varia linearmente, a velocidade quadraticamente e o deslocamento cubicamente no tempo conforme as seguintes expressões :

$$\ddot{x}_{t+\tau} = \ddot{x}_t + \frac{\tau}{\Delta t} (\ddot{x}_{t+\Delta t} - \ddot{x}_t) \quad (2.17)$$

$$\dot{x}_{t+\tau} = \dot{x}_t + \tau \ddot{x}_t + \frac{\tau^2}{2\Delta t} (\ddot{x}_{t+\Delta t} - \ddot{x}_t) \quad (2.18)$$

$$x_{t+\tau} = x_t + \tau \dot{x}_t + \frac{\tau^2}{2} \ddot{x}_t + \frac{\tau^3}{6\Delta t} (\ddot{x}_{t+\Delta t} - \ddot{x}_t) \quad (2.19)$$

onde $\tau = \theta \Delta t$

Na resolução de sistemas lineares este método é incondicionalmente estável para $\theta \geq 1.37$ e o valor $\theta = 1.4$ é geralmente utilizado. Assim isolando o termo $(\ddot{x}_{t+\Delta t} - \ddot{x}_t)$ na equação 2.17 e substituindo nas equações (2.18) e (2.19) tem-se :

$$\dot{x}_{t+\tau} = \dot{x}_t + \tau \ddot{x}_t + \frac{\tau^2}{2} (\ddot{x}_{t+\tau} - \ddot{x}_t) \quad (2.20)$$

$$x_{t+\tau} = x_t + \tau \dot{x}_t + \frac{\tau^2}{2} \ddot{x}_t + \frac{\tau^3}{6} \dddot{x}_t + \dots \quad (2.21)$$

Logo substituindo estas expressões na equação 2.16 obtém-se :

$$\begin{aligned} & (M + m + \frac{\tau B'}{2} + \frac{\tau^2 C}{6}) \ddot{x}_{t+\tau} + \\ & B(\dot{x}_t + \frac{\tau}{2} \ddot{x}_t + \frac{\tau^2}{2} \dddot{x}_t) | \dot{x}_t + \frac{\tau}{2} \ddot{x}_t + \frac{\tau^2}{2} \dddot{x}_t | \\ & + (\frac{\tau B'}{2} + \frac{\tau^2 C}{3}) \ddot{x}_t + (B' + C\tau) \dot{x}_t + Cx_t + D = F(t + \tau) \end{aligned}$$

Esta equação válida para um grau de liberdade pode ser escrita da seguinte forma para representar um sistema com seis graus de liberdade acoplados :

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^6 (M_{ij} + m_{ij} + \frac{\tau B'_{ij}}{2} + \frac{\tau^2 C_{ij}}{6}) \ddot{x}_j(t + \tau) + \\ & B_{ij}(\dot{x}_j(t) + \frac{\tau}{2} \ddot{x}_j(t) + \frac{\tau^2}{2} \dddot{x}_j(t)) | \dot{x}_j(t) + \frac{\tau}{2} \ddot{x}_j(t) + \frac{\tau^2}{2} \dddot{x}_j(t) | \\ & + (\frac{\tau}{2} B'_{ij} + \frac{\tau^2}{3} C_{ij}) \ddot{x}_j(t) + (B'_{ij} + \tau C_{ij}) \dot{x}_j(t) \\ & + C_{ij} x_j(t) + D_i = F_i(t + \tau), \quad i = 1, \dots, 6 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Para resolver este sistema de equações não lineares assume-se um valor para $\ddot{x}_j(t + \tau)$ e calcula-se o segundo termo da equação (2.22)

$$B_i^*(t + \tau) = B_{ij}(\dot{x}_j(t) + \frac{\tau}{2} \ddot{x}_j(t) + \frac{\tau^2}{2} \dddot{x}_j(t)) | \dot{x}_j(t) + \frac{\tau}{2} \ddot{x}_j(t) + \frac{\tau^2}{2} \dddot{x}_j(t) |$$

utilizando os valores de $\ddot{x}_j(t)$, $\dot{x}_j(t)$ e $x_j(t)$ calculados anteriormente. Desta forma o sistema de equações não lineares se reduz ao seguinte sistema de equações lineares :

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^6 [P_{ij} \ddot{x}_j(t + \tau) + Q_{ij} \ddot{x}_j(t) + R_{ij} \dot{x}_j(t) \\ & + C_{ij} x_j(t)] = F_i(t + \tau) - D_i - B_i^*(t + \tau), \quad i = 1, \dots, 6 \end{aligned} \quad (2.23)$$

onde

$$P_{ij} = (M_{ij} + m_{ij} + \frac{\tau B'_{ij}}{2} + \frac{\tau^2 C_{ij}}{6})$$

$$Q_{ij} = (\frac{\tau}{2} B'_{ij} + \frac{\tau^2}{3} C_{ij})$$

$$R_{ij} = (B'_{ij} + \tau C_{ij})$$

Logo resolvendo a equação (2.23) obtem-se um novo valor para $\tilde{x}_j(t + \tau)$. Se o valor de $\tilde{x}_j(t + \tau)$ assim obtido não estiver próximo do valor assumido inicialmente repete-se o processo até atingir a precisão desejada. Uma vez determinado $\tilde{x}_j(t + \tau)$ pode-se calcular $\tilde{x}_j(t + \Delta t)$, $\dot{x}_j(t + \Delta t)$ e $x_j(t + \Delta t)$ utilizando as equações (2.17), (2.20) e (2.21) conforme as expressões a seguir :

$$\tilde{x}_j(t + \Delta t) = \frac{\tilde{x}_j(t + \tau) + (\theta - 1)\dot{x}_j(t)}{\theta}$$

$$\dot{x}_j(t + \Delta t) = \dot{x}_j(t) + \Delta t \dot{x}_j(t) + \frac{\Delta t^2}{2} [\ddot{x}_j(t + \Delta t) - \ddot{x}_j(t)]$$

$$x_j(t + \Delta t) = x_j(t) + \Delta t \dot{x}_j(t) + \frac{\Delta t^2}{3} \ddot{x}_j(t) + \frac{\Delta t^2}{6} \ddot{x}_j(t + \Delta t)$$

Desta forma é possível integrar a equação do movimento da semi-submersível e obter a aceleração , velocidade e posição a cada instante de tempo permitindo, assim, estudar o comportamento da semi-submersível sujeita a ação dos esforços ambientais, do sistema de ancoragem e do riser como será apresentado nos próximos Capítulos.

3 CÁLCULO DOS COEFICIENTES E ESFORÇOS DA EQUAÇÃO DO MOVIMENTO

3.1 DESCRIÇÃO DAS PLATAFORMAS

Utilizando o modelo matemático descrito no Capítulo 2 foram feitas simulações dos movimentos no domínio do tempo para duas plataformas denominadas plataforma "A" e plataforma "B", conforme mostram as Figuras 3.1 e 3.2. A plataforma "A" é a plataforma padrão adotada para os cálculos comparativos do ITTC. As principais características das plataformas "A" e "B" são apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2 respectivamente. A distribuição das linhas de ancoragem são mostradas nas Figuras 3.3 e 3.4 e as coordenadas dos pontos de ancoragem e dos "fairleads" são apresentadas nas Tabelas 3.3 e 3.4. As características do sistema de ancoragem encontram-se descritas no Capítulo 4.

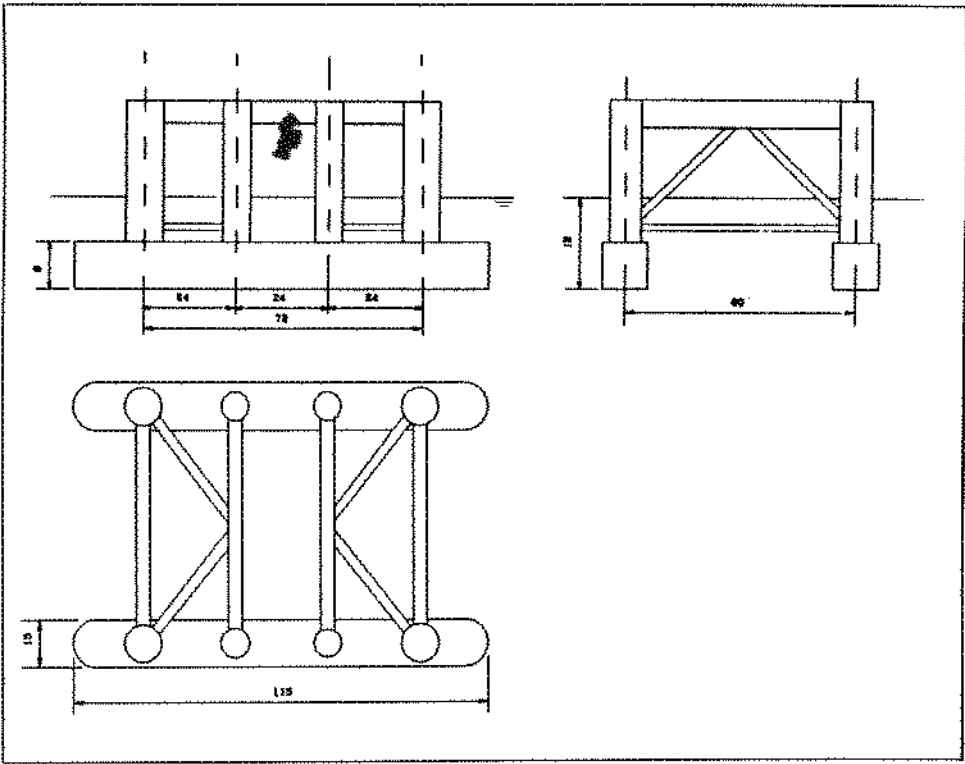


Figura 3.1: Geometria da plataforma "A"

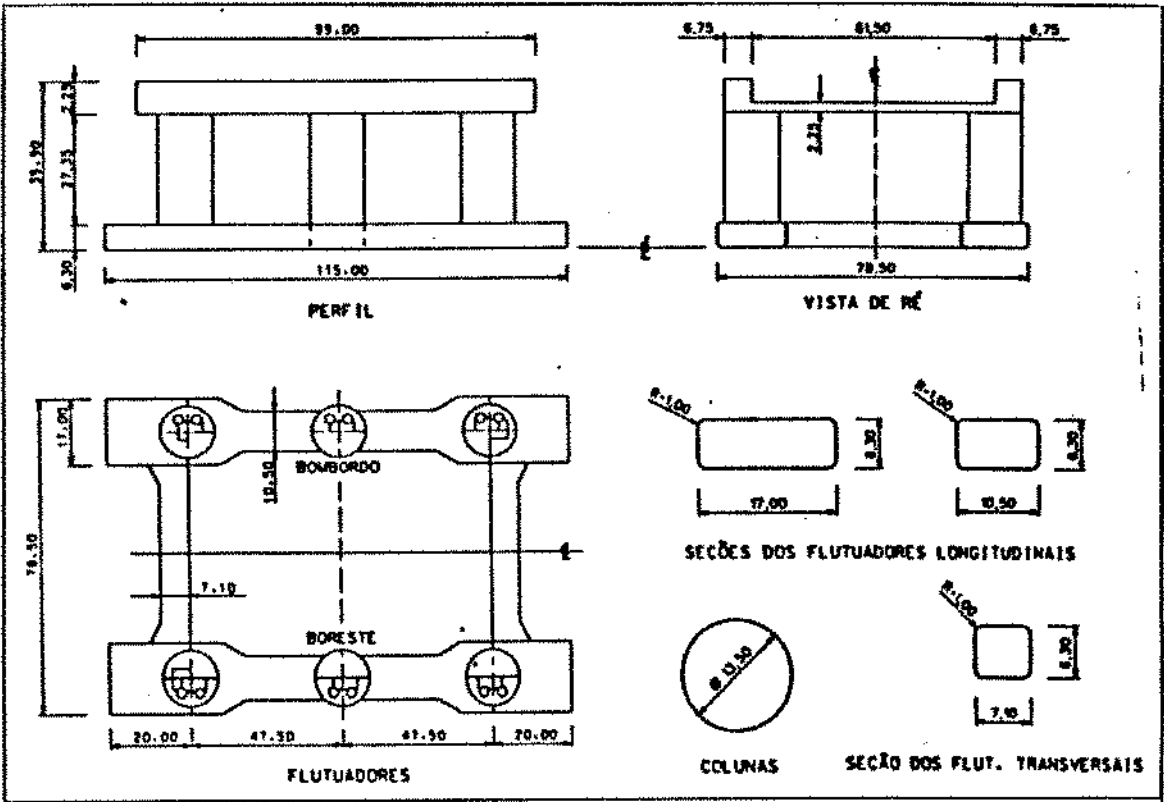


Figura 3.2: Geometria da plataforma "B"

comprimento	115.0 m	
boca	75.0 m	
convés	43.0 m	
flutuadores (2)	compr.	115.0 m
	boca	15.0 m
	altura	8.0 m
colunas (8)	diâm. maior	10.0 m
	diâm. menor	8.0 m
calado	20.0 m	
deslocamento	35000.0 ton	
posição CG	VCG	17.5 m
	LCG	0.0 m
	TCG	0.0 m
altura metacêntrica	Long.	2.37 m
	Trans.	2.87 m
raio de giração	Roll	32.512 m
	Pitch	35.392 m
	Yaw	41.088 m

Tabela 3.1: Características da plataforma "A"

comprimento	115.0 m	
boca	78.5 m	
convés	41.7 m	
flutuadores (2)	compr.	115.0 m
	boca máx.	17.0 m
	altura	6.3 m
colunas (6)	diâmetro	13.5 m
calado	23.2 m	
deslocamento	40595.0 ton	
posição CG	VCG	26.0 m
	LCG	0.0 m
	TCG	0.0 m
altura metacentrica	Long.	2.7 m
	Trans.	2.7 m
raio de giração	Roll	29.845 m
	Pitch	29.845 m
	Yaw	29.845 m

Tabela 3.2: Características da plataforma "B"

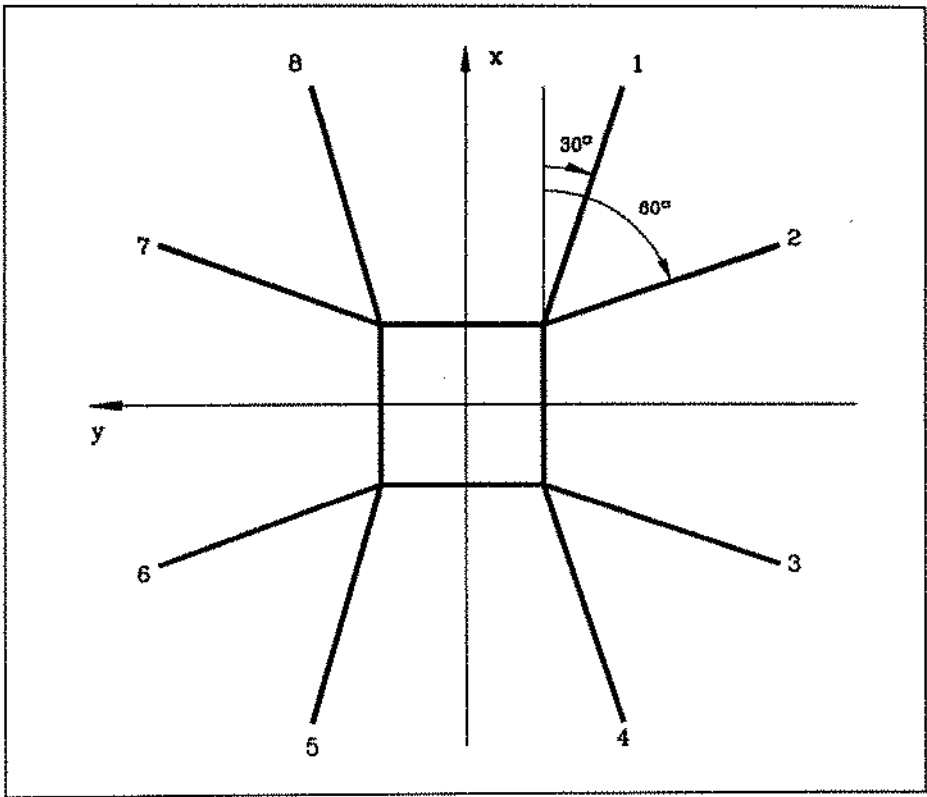


Figura 3.3: Distribuição das linhas de ancoragem para a plataforma "A"

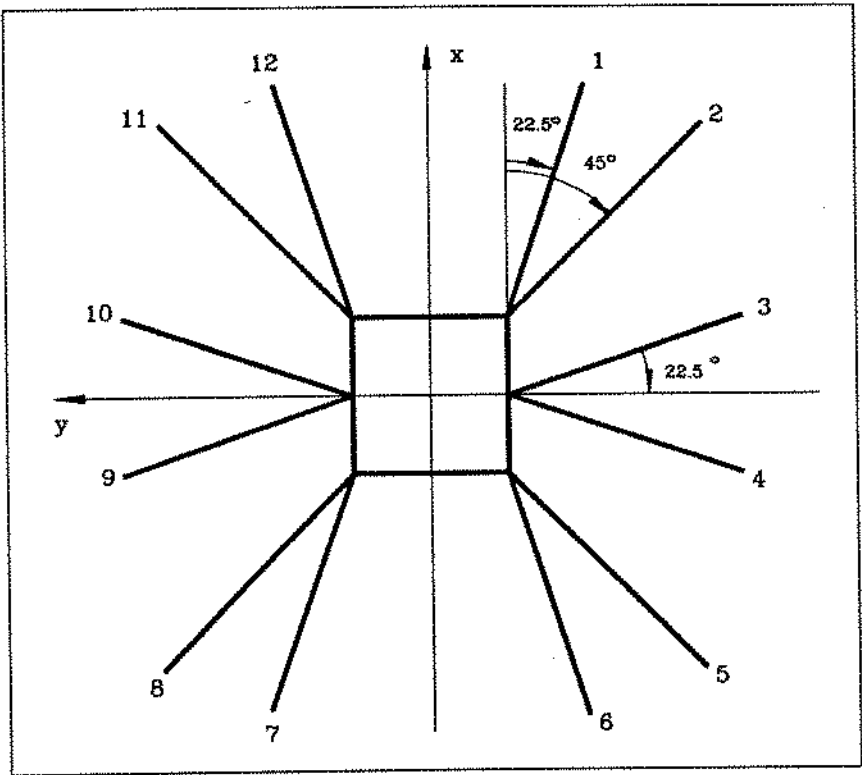


Figura 3.4: Distribuição das linhas de ancoragem para a plataforma "B"

linha	âncoras		"fairlead"		
	X (m)	Y (m)	x (m)	y (m)	z (m)
1	4994.0	-2897.5	36.0	-35.0	9.0
2	2898.5	-4993.0	36.0	-35.0	9.0
3	-2898.5	-4993.0	-36.0	-35.0	9.0
4	-4994.0	-2897.5	-36.0	-35.0	9.0
5	-4994.0	2897.5	-36.0	35.0	9.0
6	-2898.5	4993.0	-36.0	35.0	9.0
7	2898.5	4993.0	36.0	35.0	9.0
8	4994.0	2897.5	36.0	35.0	9.0

Tabela 3.3: Coordenadas das âncoras e "fairlead" para plataforma "A"

linha	âncoras		"fairlead"		
	X (m)	Y (m)	x (m)	y (m)	z (m)
1	5326.7	-2228.4	37.5	-37.5	12.0
2	4085.7	-4085.7	37.5	-37.5	12.0
3	2190.9	-5326.7	0.0	-37.5	12.0
4	-2190.9	-5326.7	0.0	-37.5	12.0
5	-4085.7	-4085.7	-37.5	-37.5	12.0
6	-5326.7	-2228.4	-37.5	-37.5	12.0
7	-5326.7	2228.4	-37.5	37.5	12.0
8	-4085.7	4085.7	-37.5	37.5	12.0
9	-2190.9	5326.7	0.0	37.5	12.0
10	2190.0	5326.7	0.0	37.5	12.0
11	4085.7	4085.7	37.5	37.5	12.0
12	5326.7	2228.4	37.5	37.5	12.0

Tabela 3.4: Coordenadas das âncoras e "fairlead" para plataforma "B"

3.2 CÁLCULO DAS FUNÇÕES DE MEMÓRIA E COEFICIENTES DE MASSA ADICIONAL INDEPENDENTE DA FREQUÊNCIA

Conforme descrito anteriormente para a simulação dos movimentos de uma semi-submersível é necessário determinar as funções de memória e os coeficientes de massa adicional constante conforme as seguintes equações :

$$K_{ij} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\omega_1} b_{ij}(\omega) \cos \omega t d\omega + \frac{2}{\pi} \int_{\omega_1}^{\infty} \frac{C_i}{\omega^n} \cos \omega t d\omega \tag{3.1}$$

$$m_{ij} = a_{ij}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} K_{ij}(t) sen \omega t dt \tag{3.2}$$

As Figuras 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8, apresentam os valores adimensionalizados dos coeficientes de massa adicional (a_{ij}) e amortecimento potencial (b_{ij}) em função da frequência para as plataformas "A" e "B" e que foram utilizados nas expressões (3.1) e (3.2). Tais coeficientes foram obtidos pelo método de distribuição tridimensional de fontes e sorvedouros. Os fatores de adimensionalização são apresentados na Tabela 3.5.

parâmetro	i=j (1,2,3)	i ≠ j	i=j (4,5,6)
massa adicional	$\rho(\frac{L}{2})^3$	$\rho(\frac{L}{2})^4$	$\rho(\frac{L}{2})^5$
amort. potencial	$\rho(\frac{L}{2})^2 \sqrt{g \frac{L}{2}}$	$\rho(\frac{L}{2})^3 \sqrt{g \frac{L}{2}}$	$\rho(\frac{L}{2})^4 \sqrt{g \frac{L}{2}}$
amort. viscoso	ρL^2	ρL^3	ρL^4
restauração	$\rho g (\frac{L}{2})^2$	$\rho g (\frac{L}{2})^3$	$\rho g (\frac{L}{2})^5$

Tabela 3.5: Fatores de adimensionalização

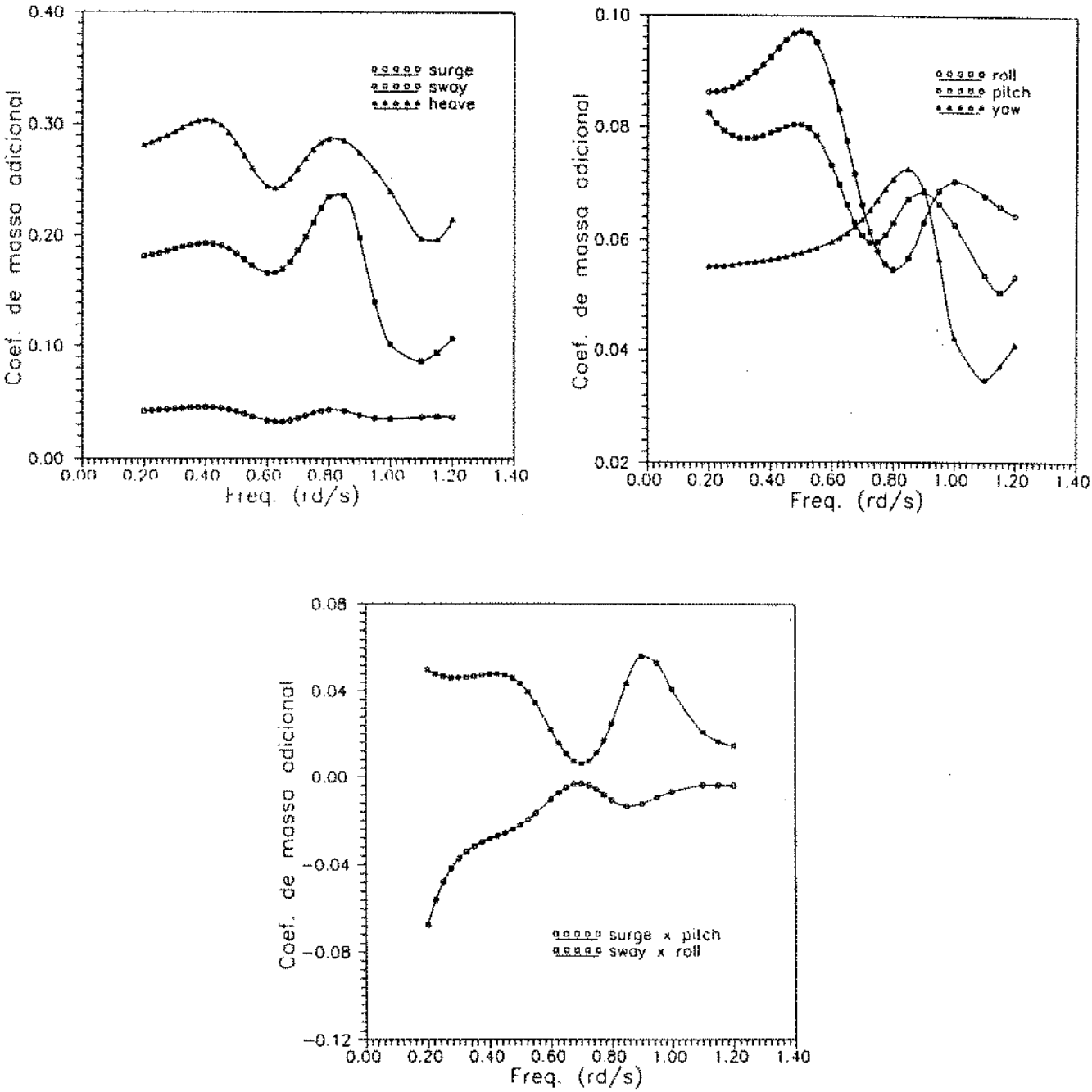


Figura 3.5: Coeficientes de massa adicional da plataforma A

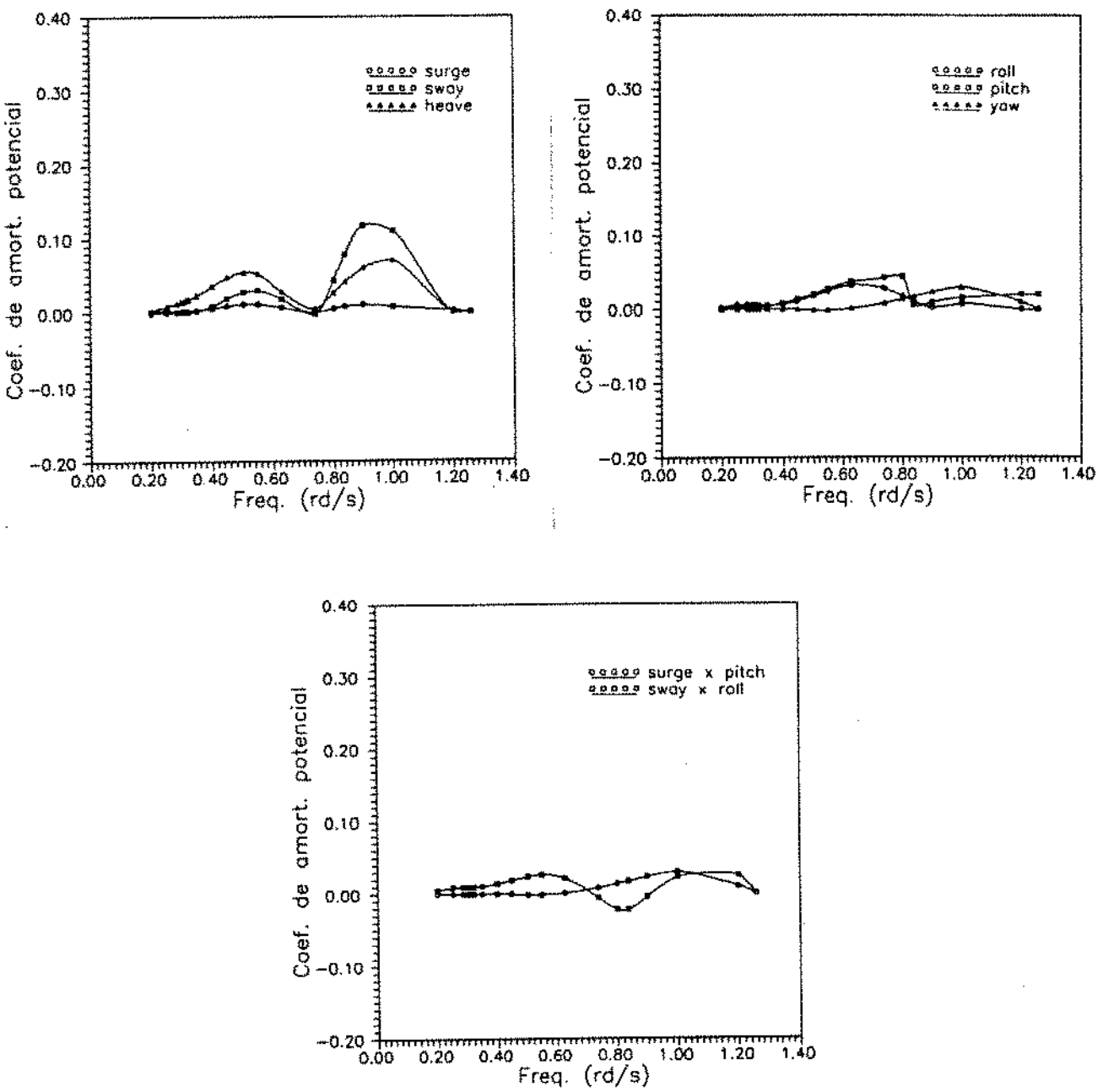


Figura 3.6: Coeficientes de amortecimento potencial da plataforma A

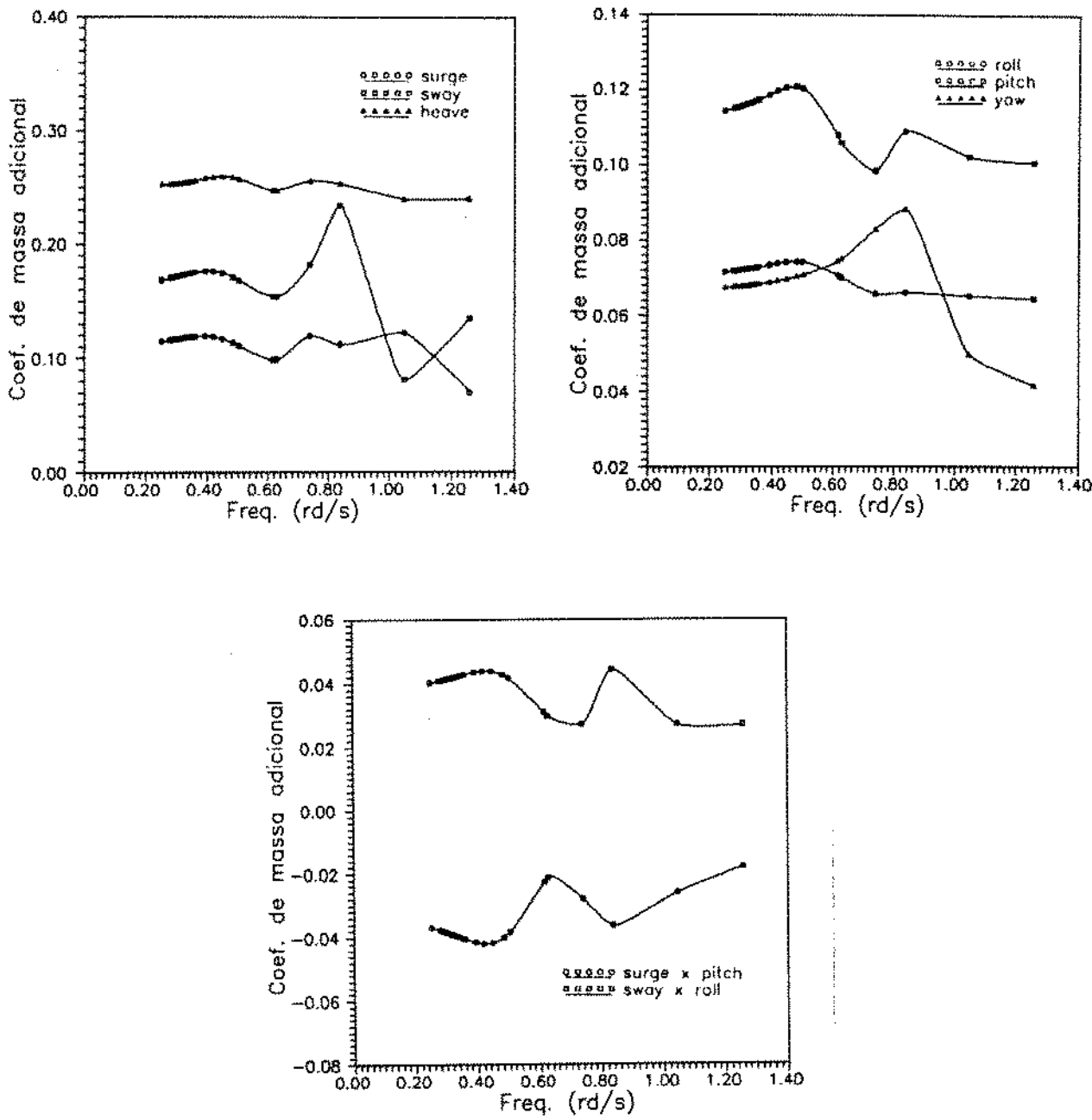


Figura 3.7: Coeficientes de massa adicional da plataforma B

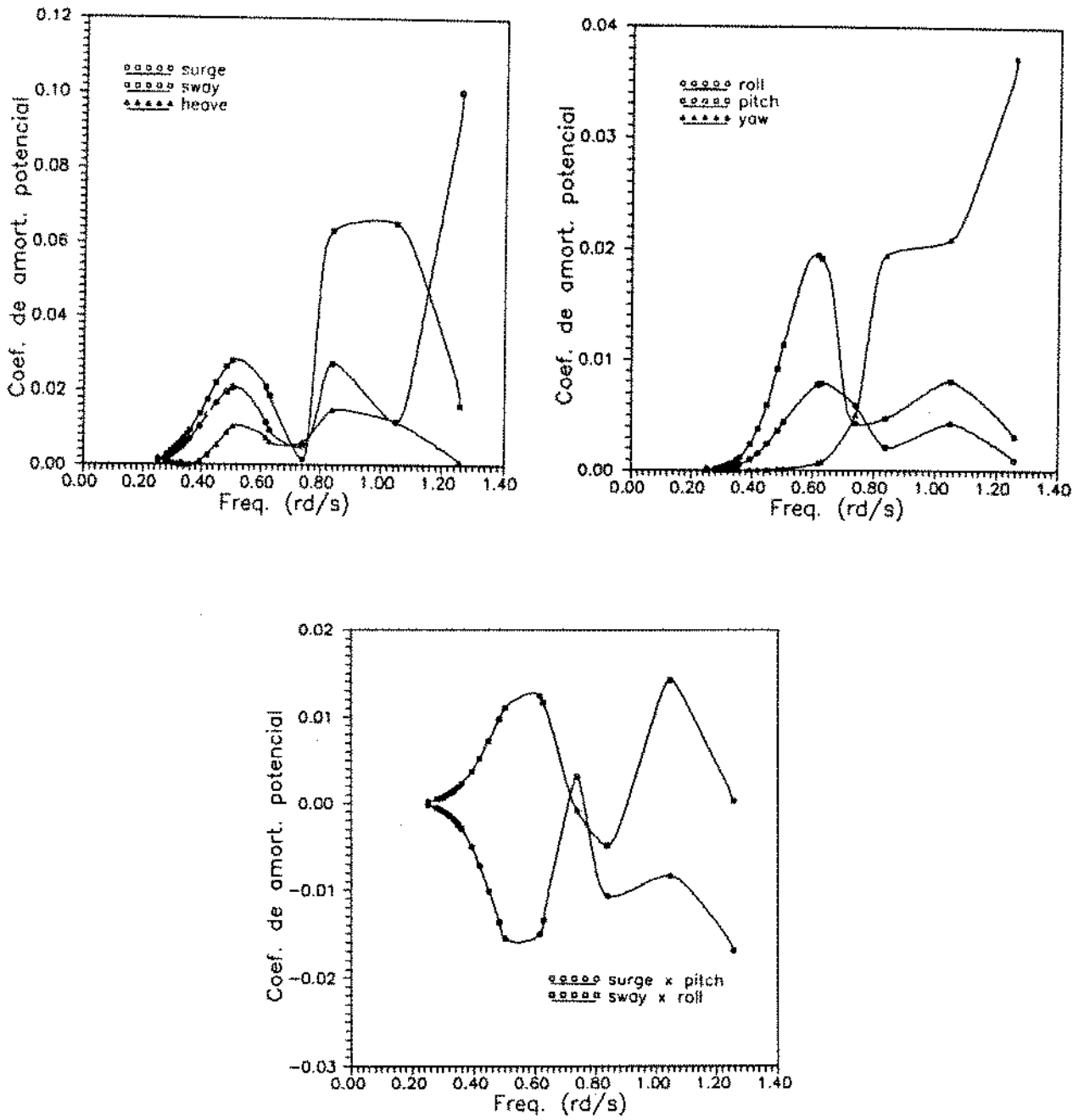


Figura 3.8: Coeficientes de amortecimento potencial da plataforma B

Para o cálculo das funções de memória a integração da equação (3.1) foi feita numericamente utilizando-se a primeira regra de Simpson. Esta integração foi dividida em duas parcelas. Na primeira parcela a integração foi feita desde a frequência zero até a frequência do último valor do amortecimento potencial calculado utilizando-se um intervalo de frequência de 0.025 rd/s. Os valores dos coeficientes de amortecimento potencial necessários para a integração foram obtidos através da interpolação dos valores utilizados para a construção das Figuras 3.5 e 3.6. Para os valores do amortecimento potencial entre a frequência zero e a primeira frequência calculada ajustou-se um polinômio do segundo grau passando pelo zero. Os demais valores do amortecimento potencial que caem dentro da faixa de frequências calculadas foram obtidos utilizando-se um polinômio interpolador de grau dois a cada três frequências .

A segunda parcela consiste na integração dos valores dos coeficientes de amortecimento potencial extrapolados para altas frequências segundo as aproximações assintóticas descritas no item 2.3 e propostas por Oortmerssen [3]. Esta integração , também, foi feita numericamente a partir da última frequência para a qual o amortecimento potencial foi calculado até a frequência de 4.0 rd/s utilizando o mesmo intervalo de frequência da primeira parcela.

Desta forma as funções de memória foram calculadas até 50 s com um intervalo de tempo de 0.5 s para as plataformas "A" e "B". As Figuras 3.9 a 3.16 apresentam as funções de memória para a plataforma "A", enquanto que as Figuras 3.17 a 3.24 para a plataforma "B".

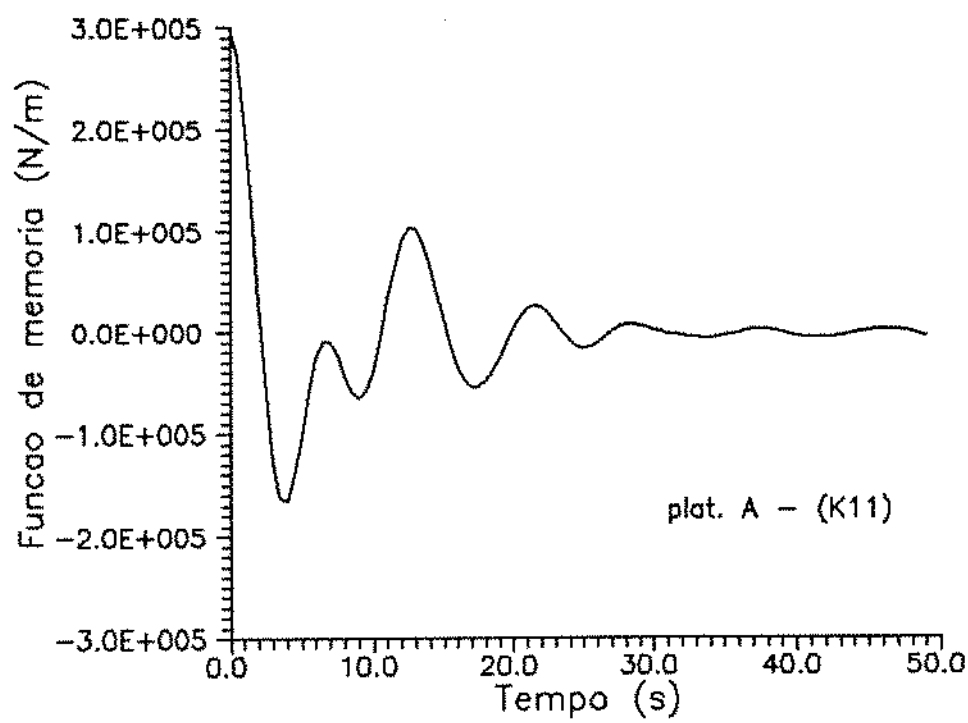


Figura 3.9: Função de memória (K_{11}) para a plataforma "A"

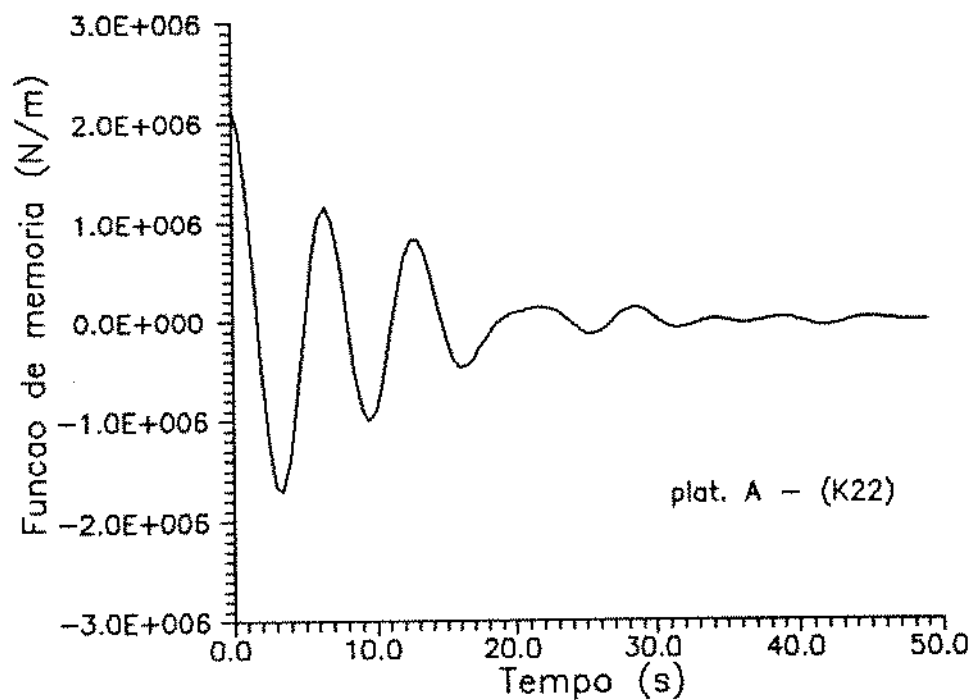


Figura 3.10: Função de memória (K_{22}) para a plataforma "A"

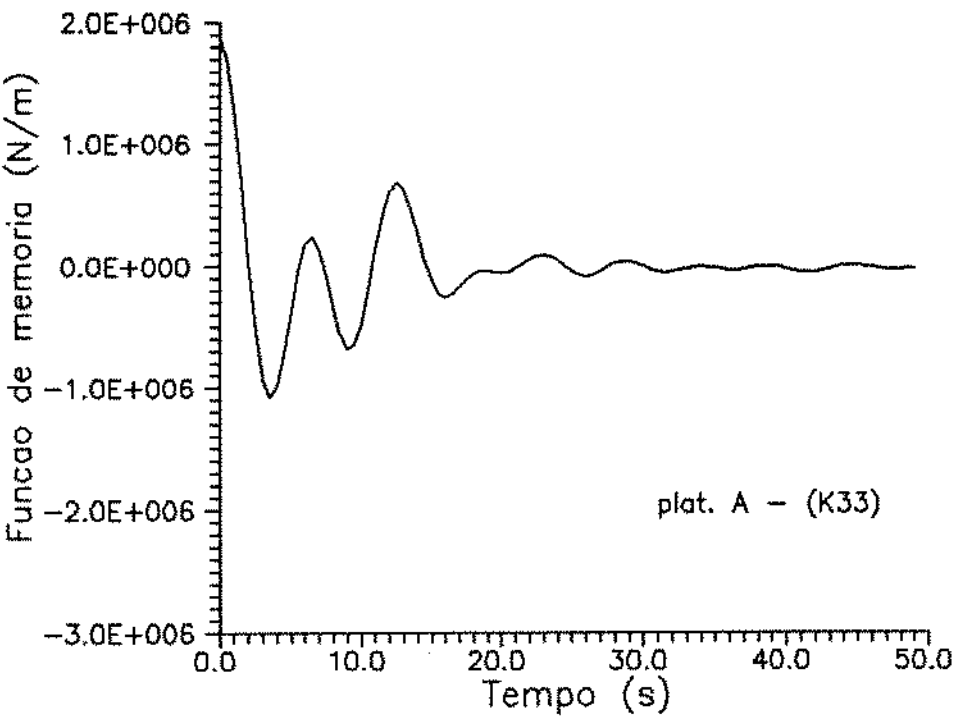


Figura 3.11: Função de memória (K_{33}) para a plataforma "A"

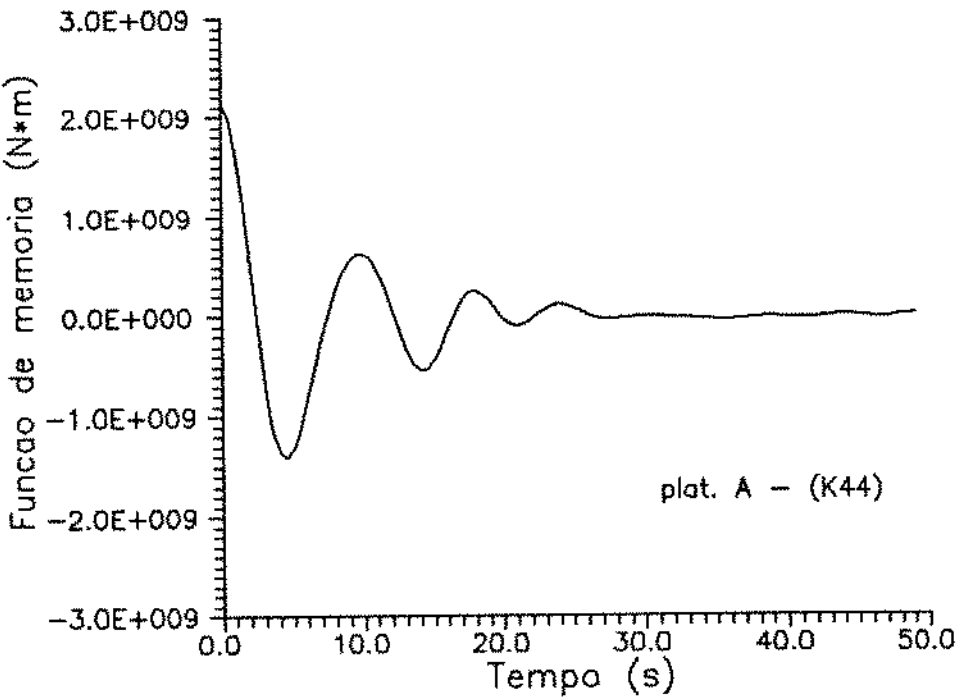


Figura 3.12: Função de memória (K_{44}) para a plataforma "A"

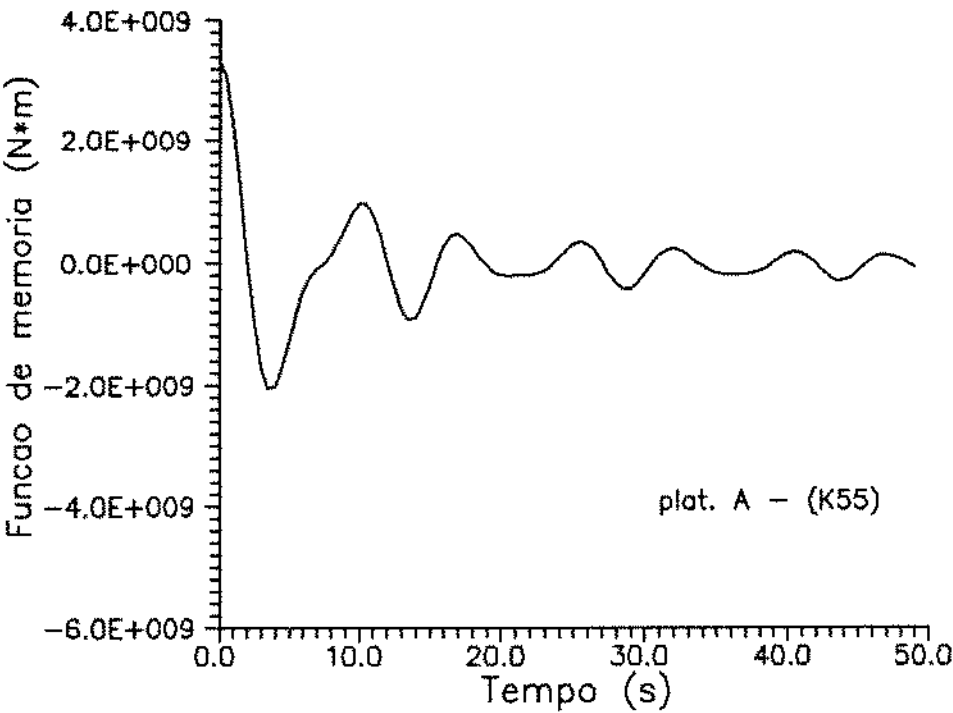


Figura 3.13: Função de memória (K_{55}) para a plataforma "A"

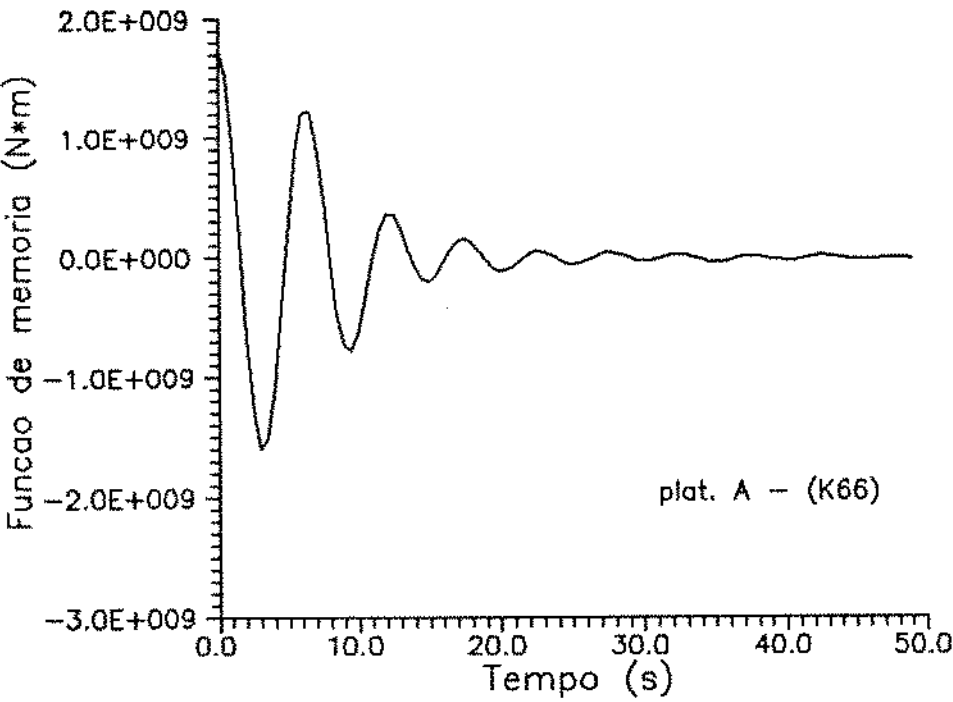


Figura 3.14: Função de memória (K_{66}) para a plataforma "A"

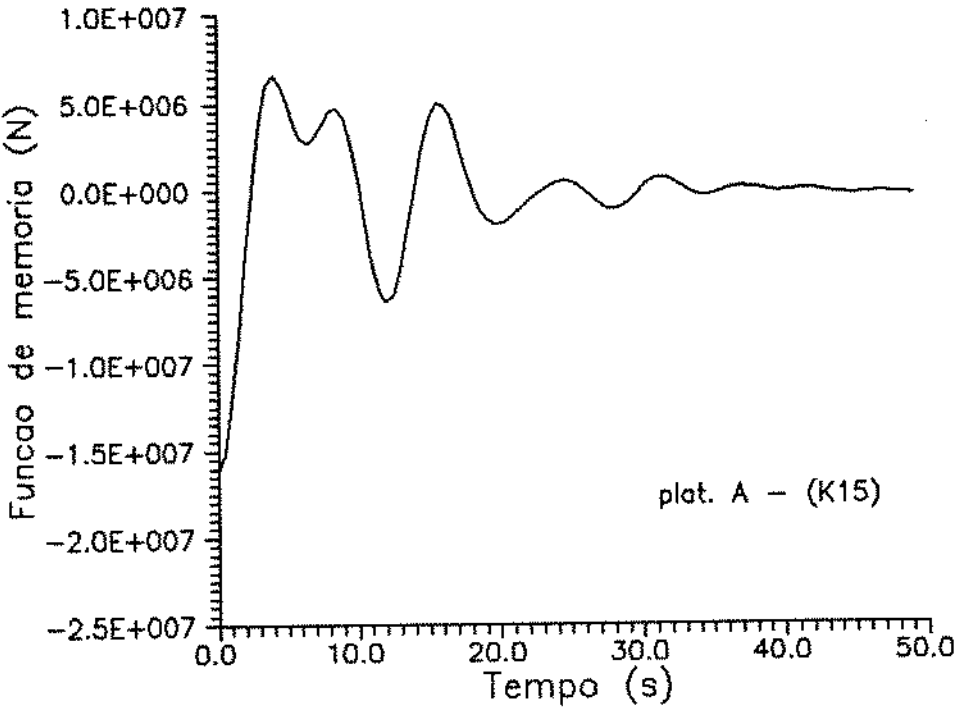


Figura 3.15: Função de memória (K_{15}) para a plataforma "A"

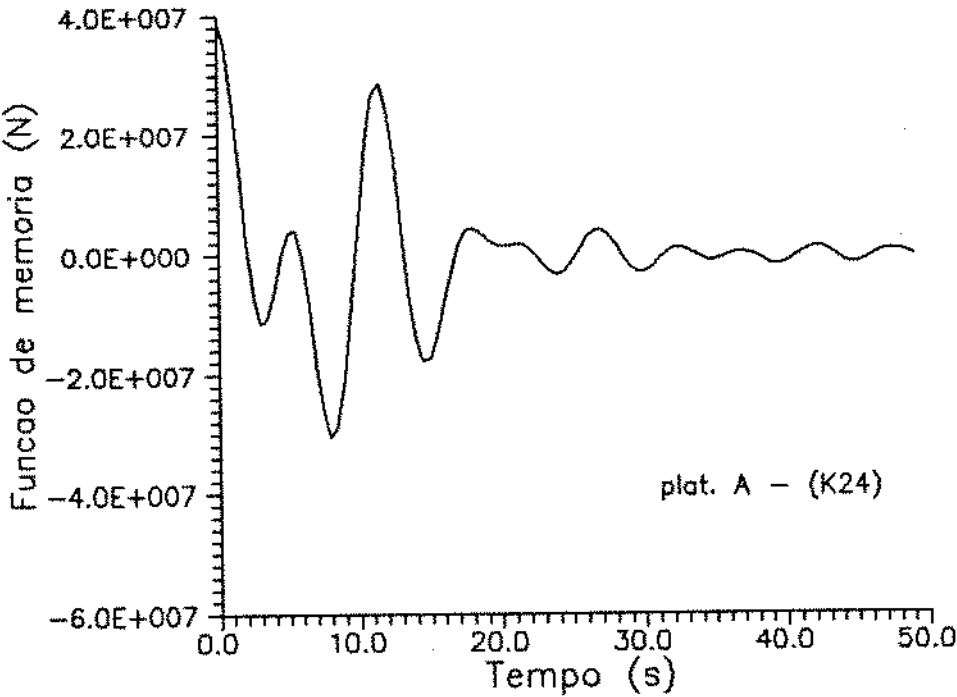


Figura 3.16: Função de memória (K_{24}) para a plataforma "A"

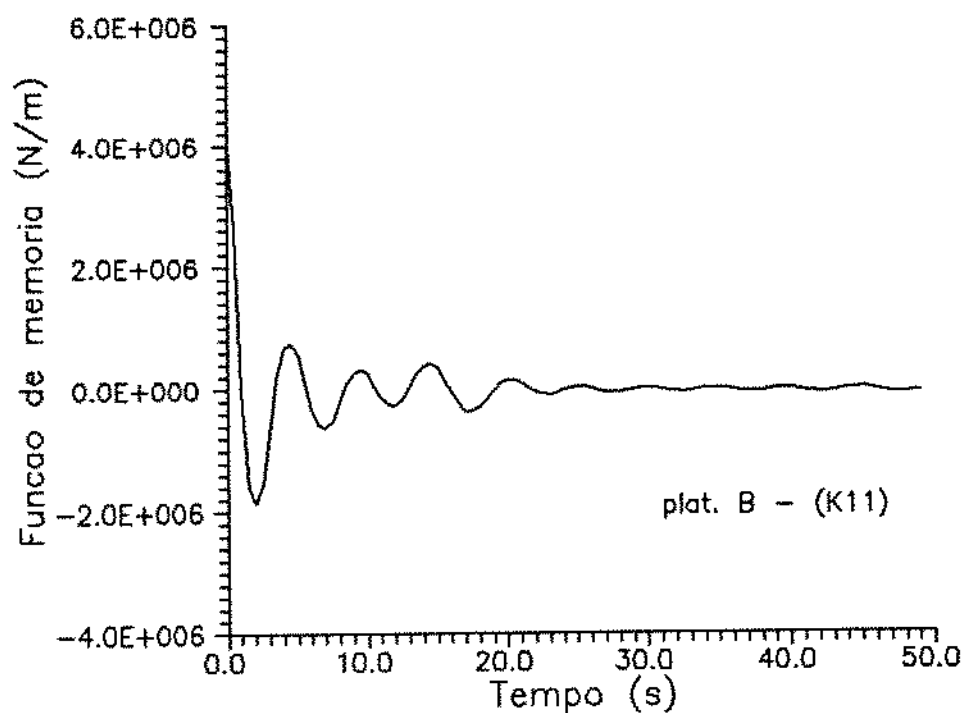


Figura 3.17: Função de memória (K_{11}) para a plataforma "B"

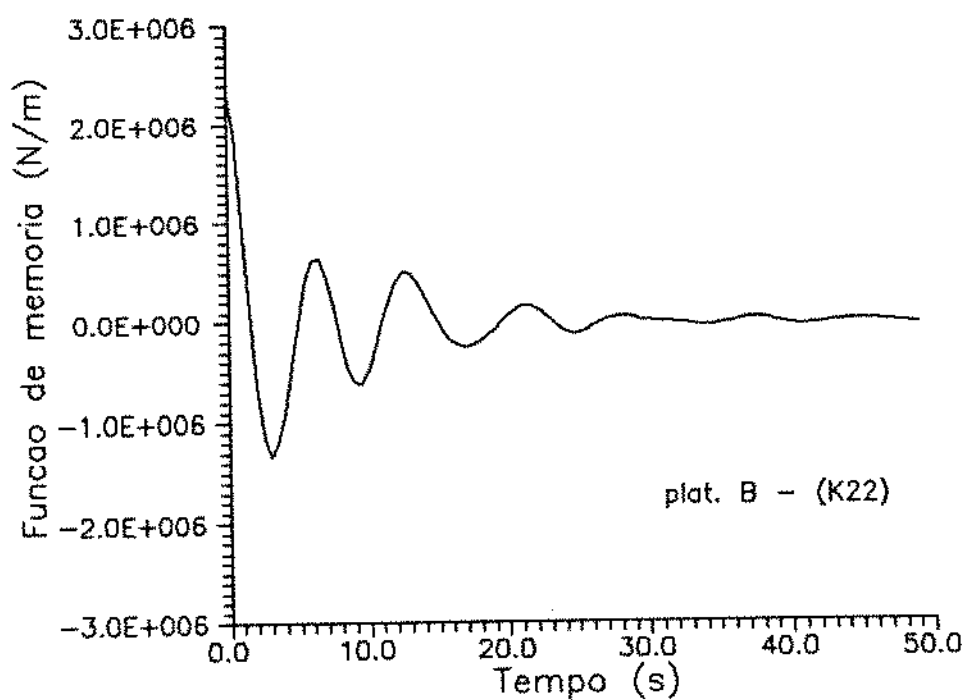


Figura 3.18: Função de memória (K_{22}) para a plataforma "B"

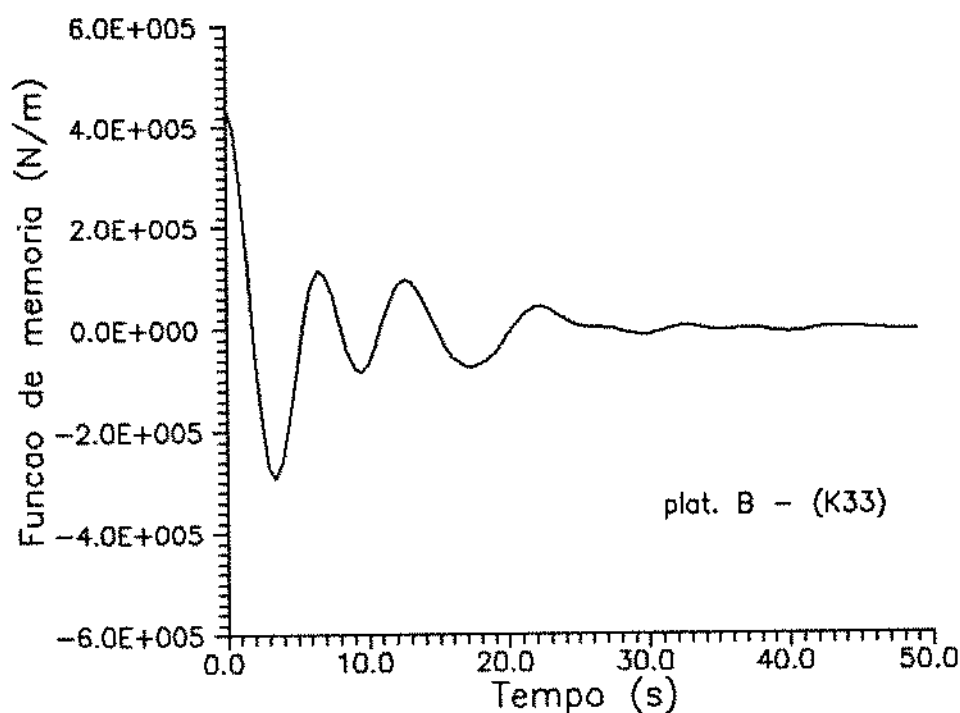


Figura 3.19: Função de memória (K_{33}) para a plataforma "B"

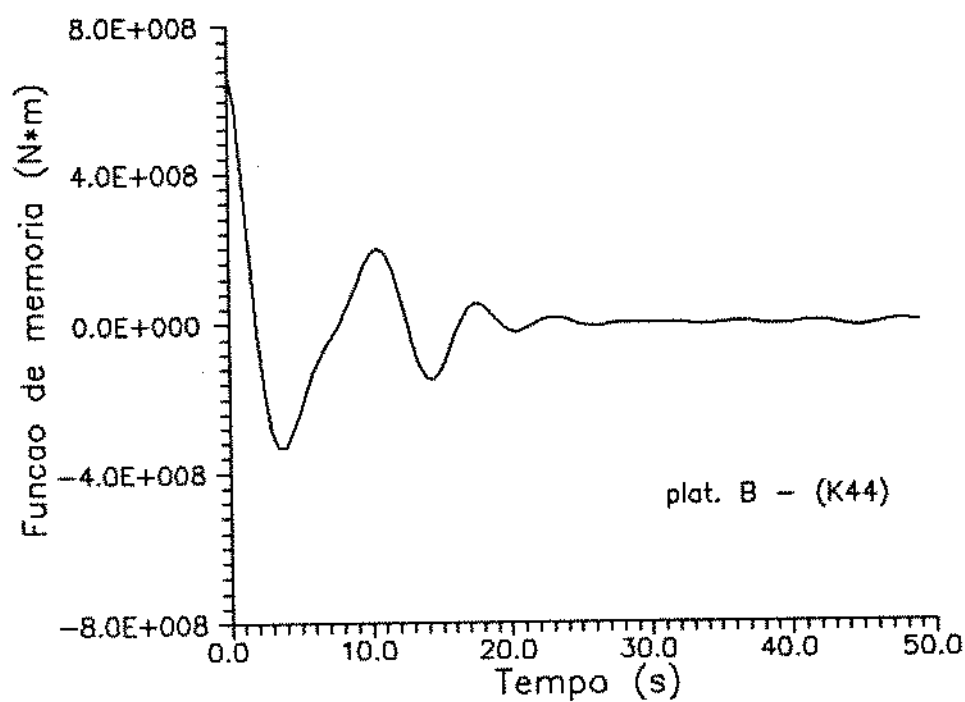


Figura 3.20: Função de memória (K_{44}) para a plataforma "B"

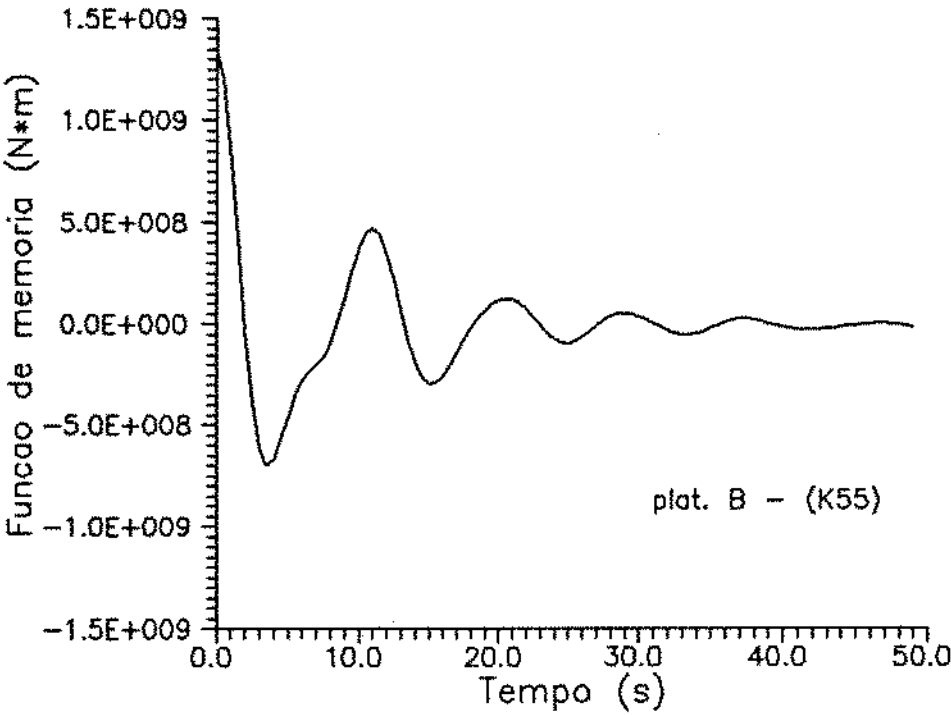


Figura 3.21: Função de memória (K_{55}) para a plataforma "B"

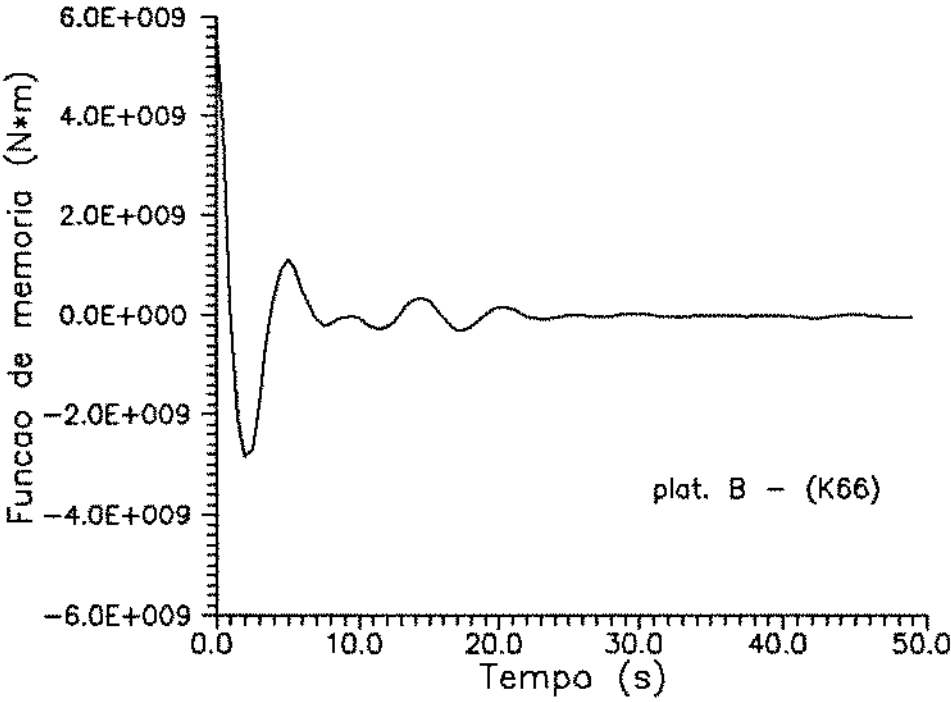


Figura 3.22: Função de memória (K_{66}) para a plataforma "B"

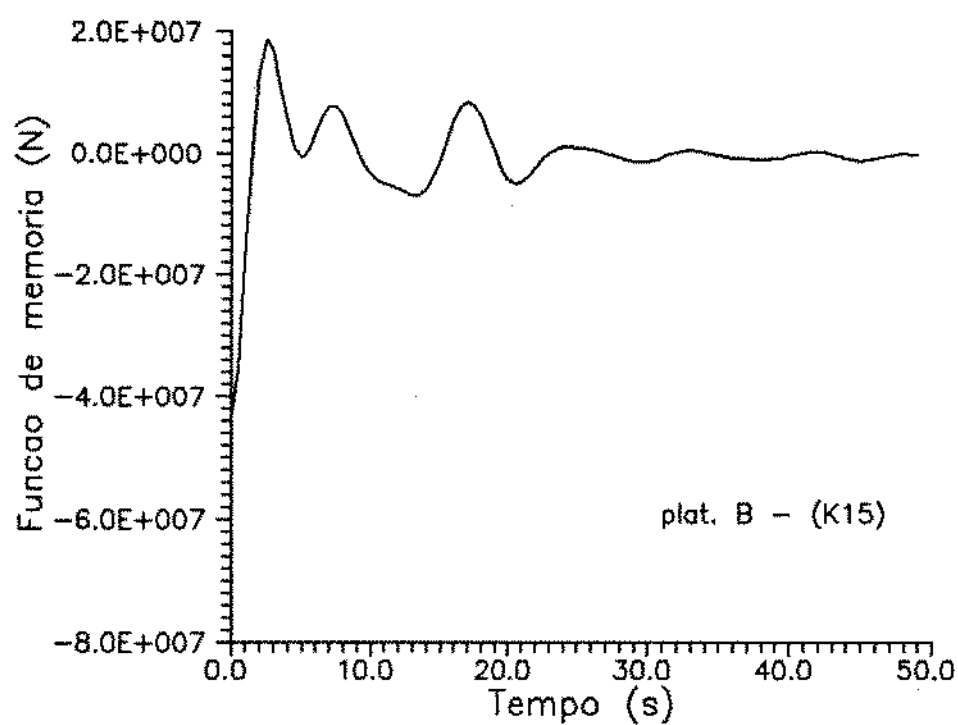


Figura 3.23: Função de memória (K_{15}) para a plataforma "B"

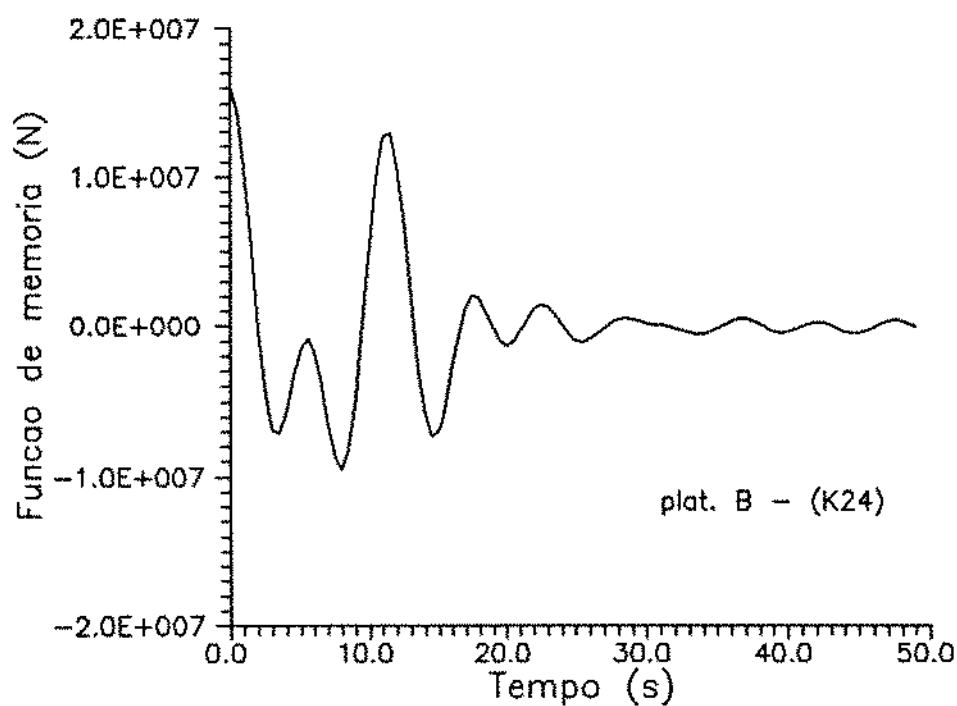


Figura 3.24: Função de memória (K_{24}) para a plataforma "B"

Os coeficientes de massa adicional independente da frequência foram obtidos calculando-se estes coeficientes através da equação (3.2) para as frequências em que a massa adicional foi determinada nas Figuras 3.5 3.6 e tomando-se o valor médio. A integração da equação (3.2) foi feita numericamente utilizando-se a primeira regra de Simpson com os valores da função de memória calculados anteriormente até 50 s. A Tabela 3.6 apresenta os coeficientes médios de massa adicional independente da frequência calculados para as plataformas "A" e "B".

coef.	plataforma	
	A	B
m_{11} (kg)	.889E+07	.188E+08
m_{22} (kg)	.272E+08	.293E+08
m_{33} (kg)	.512E+08	.486E+08
m_{44} (kg.m ²)	.487E+11	.445E+11
m_{55} (kg.m ²)	.462E+11	.700E+11
m_{66} (kg.m ²)	.332E+11	.402E+11
m_{15} (kg.m)	-.172E+09	-.326E+09
m_{24} (kg.m)	.361E+09	.397E+09

Tabela 3.6: Massa adicional independente da frequência

3.3 COEFICIENTES DE AMORTECIMENTO VISCOSO

Os coeficientes de amortecimento viscoso utilizados nas simulações foram avaliados através das regras do DnV [21] e são apresentados na Tabela 3.7 para as plataformas "A" e "B" adimensionalizados conforme os fatores da Tabela 3.5.

plataforma	B_{11}	B_{22}	B_{33}	B_{44}	B_{55}	B_{66}
A	0.142000	0.222000	0.124000	0.004160	0.006120	0.001000
B	0.131990	0.156600	0.272900	-	-	-

Tabela 3.7: Coeficientes de amortecimento viscoso

3.4 DISCRETIZAÇÃO PARA O CÁLCULO DOS ESFORÇOS DE VENTO E CORRENTEZA

Conforme descrito no Capítulo 2 os esforços de vento e correnteza atuantes na plataforma podem ser obtidos através de uma discretização da superfície da estrutura por painéis e atribuindo-se a cada painel um valor para o coeficiente de forma. Os valores utilizados para os coeficientes de forma foram

formas cilíndricas : $C_s=0.5$

formas retangulares : $C_s=1.0$

As coordenadas dos pontos dos painéis no referencial $oxyz$ conforme definido no Apêndice A e a discretização por painéis com os respectivos coeficientes de forma para as plataformas "A" e "B" são apresentados no Apêndice D. A plataforma "A" foi discretizada com 152 pontos e 176 painéis, sendo que não foram considerados os "bracings" e apenas a torre no convés. Já o modelo para a plataforma "B" utilizado possui 156 pontos e 162

painéis considerando-se o convés "liso", ou seja, sem nenhum elemento. Deve-se observar que nestas discretizações as colunas das plataformas foram aproximadas por prismas de base hexagonal, de forma que a área do hexágono tenha a mesma área do círculo da coluna.

O efeito da variação da velocidade do vento com a altura em relação ao nível do mar é considerado no cálculo do esforço de vento associando-se a cada painel os coeficientes de altura fornecidos pelo ABS [20] e apresentados na Tabela 3.8. Deve-se notar que para um dado painel o coeficiente de altura varia com o tempo, pois a posição do painel em relação ao nível do mar varia para cada instante de simulação .

altura do nível da água até o centro da área (m)	coeficiente de altura (Ch)
0 - 15.24	1.00
15.24 - 30.48	1.10
30.48 - 45.72	1.20
45.72 - 60.96	1.30
60.96 - 76.20	1.37
76.20 - 91.44	1.43
91.44 - 106.68	1.48
106.68 - 121.92	1.52
121.92 - 137.16	1.56
137.16 - 152.40	1.60

Tabela 3.8: Coeficientes de altura

3.5 CÁLCULO DOS ESFORÇOS DE ONDA

Conforme descrito no item 2.4 os esforços de onda de primeira e segunda ordem podem ser expressos pelos dois primeiros termos da série de Volterra, sendo necessário conhecer as amplitudes da onda a cada instante e as funções resposta ao impulso linear e quadrática.

As amplitudes de onda em cada instante foram obtidas através do método de amplitude espectral não determinístico descrito no item 2.4. Utilizou-se o espectro de energia de onda do ITTC e foram tomadas 300 componentes de frequência não igualmente espaçadas.

A função resposta ao impulso linear $h_1(\tau)$ é obtida através da função de transferência $H_1(\omega)$. A Figura 3.25 fornece os valores da amplitude e fase da função de transferência para onda com ângulo de incidência de 90 graus para a plataforma "A", enquanto que na Figura 3.26 são apresentados os valores para a plataforma "B". Nas Figuras 3.27 e 3.28 são mostradas a amplitude e a fase das funções de transferência para a plataforma "B" para um ângulo de incidência da onda de 45 graus.

As funções de transferência lineares foram adimensionalizadas pelos seguintes fatores :

$$\rho g \left(\frac{L}{2} \right)^2 \zeta \quad \text{para a força}$$

$$\rho g \left(\frac{L}{2} \right)^3 \zeta \quad \text{para o momento}$$

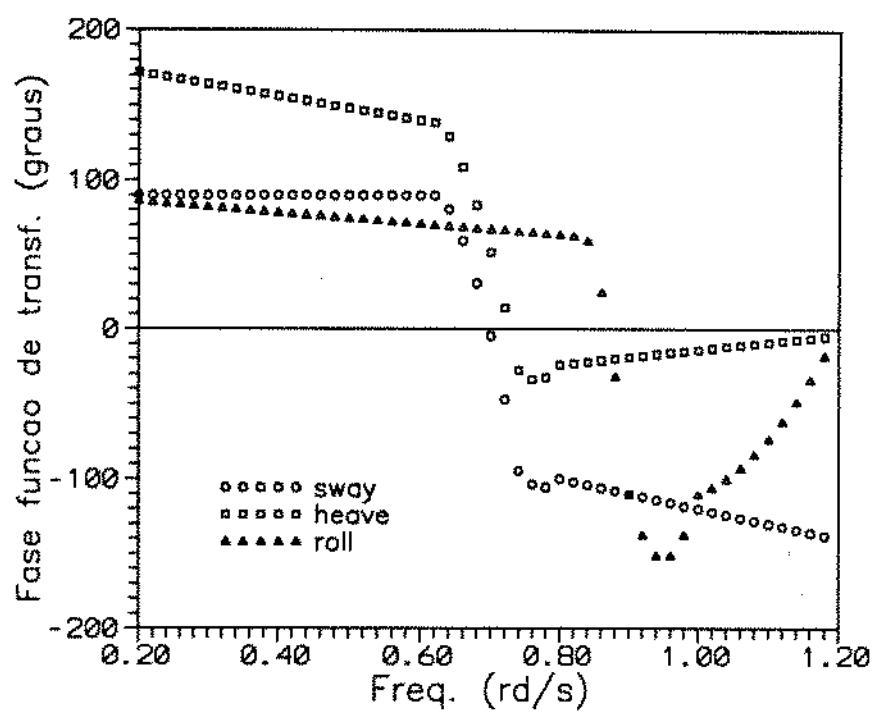
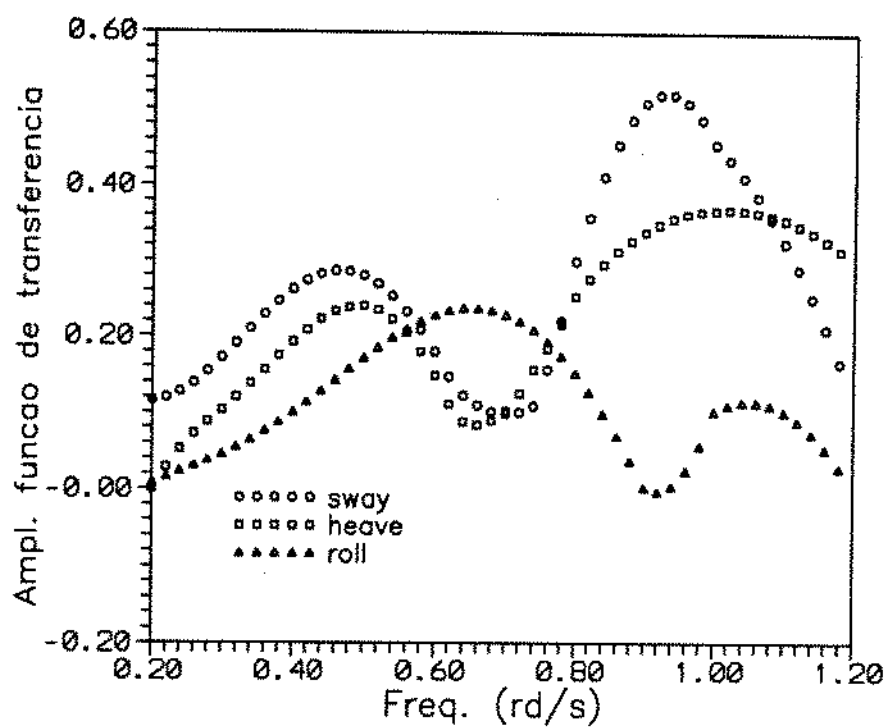


Figura 3.25: Amplitude e fase da função de transferência da plataforma "A" para onda incidindo a 90 graus

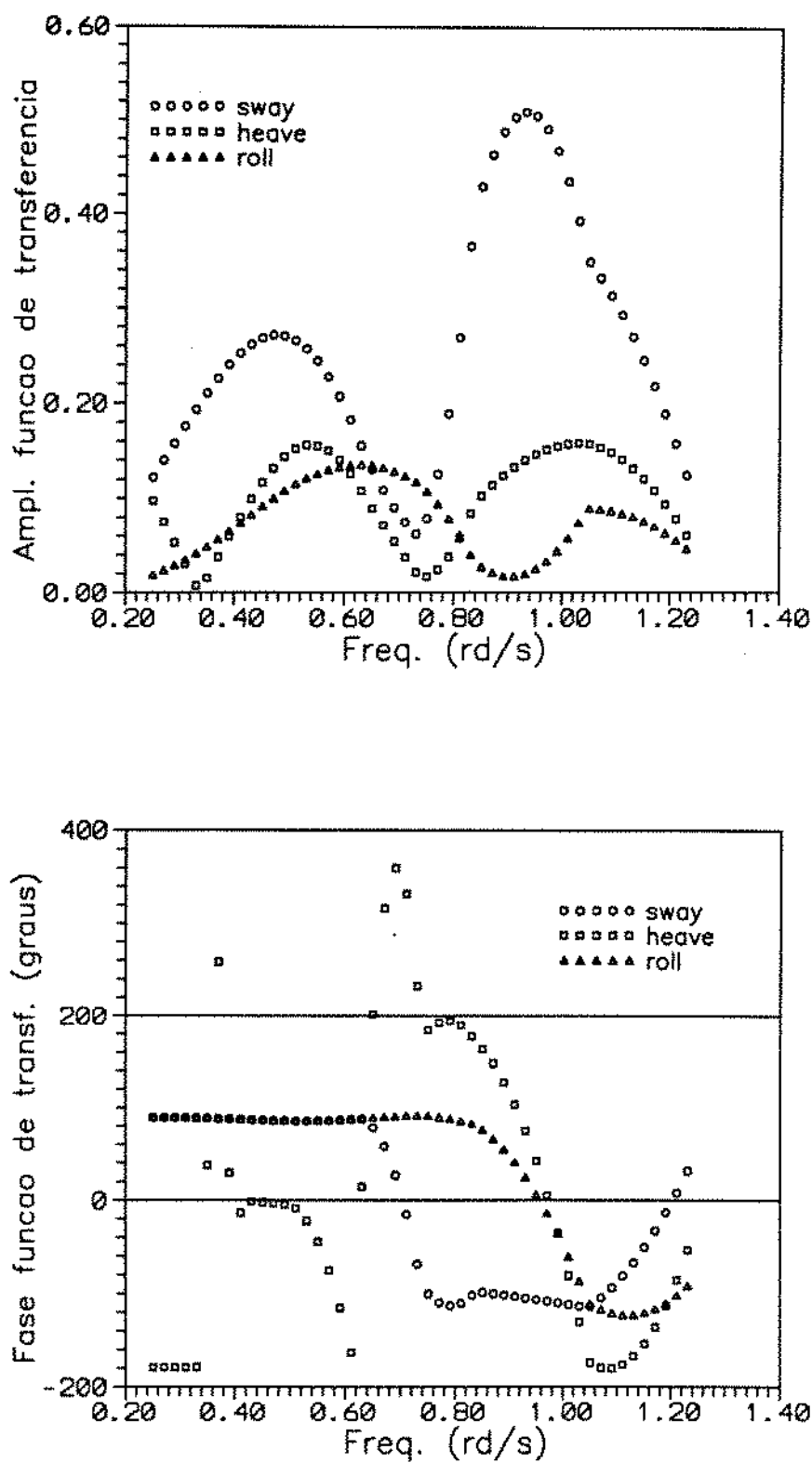


Figura 3.26: Amplitude e fase da função de transferência da plataforma "B" para onda incidindo a 90 graus

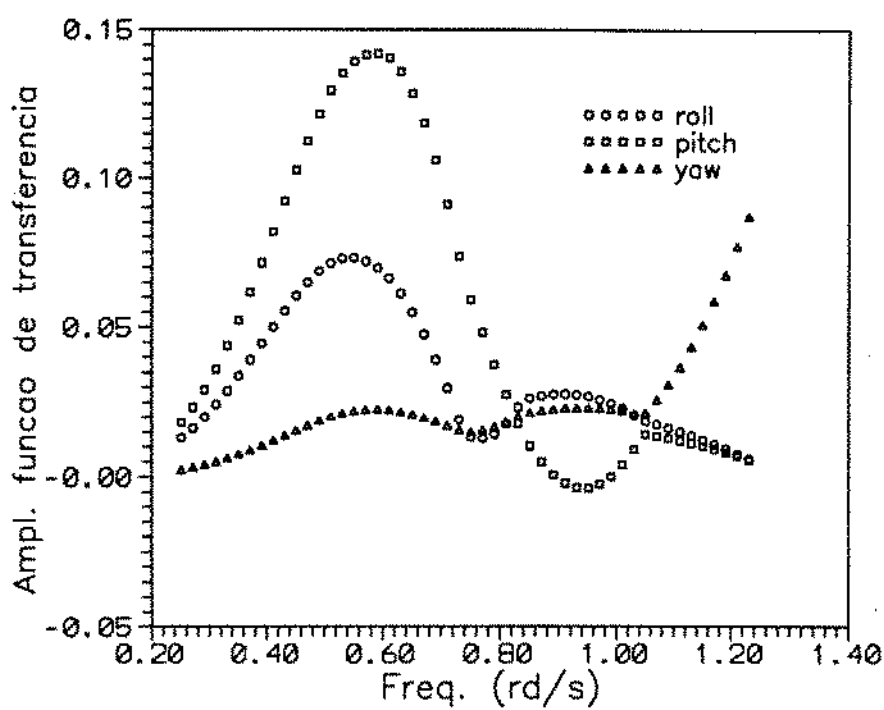
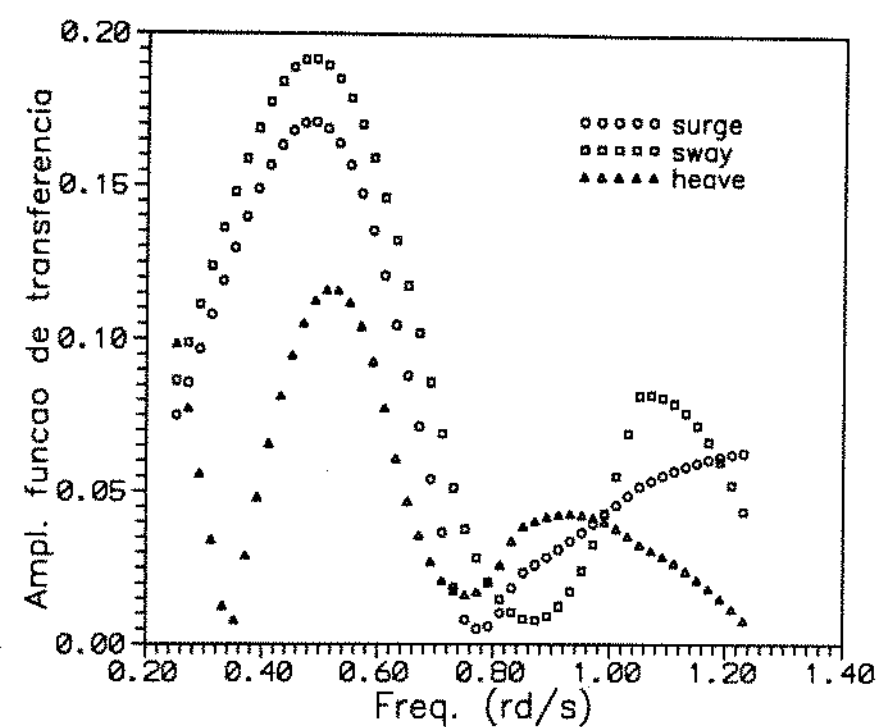


Figura 3.27: Amplitude da função de transferência da plataforma "B" para onda incidindo a 45 graus

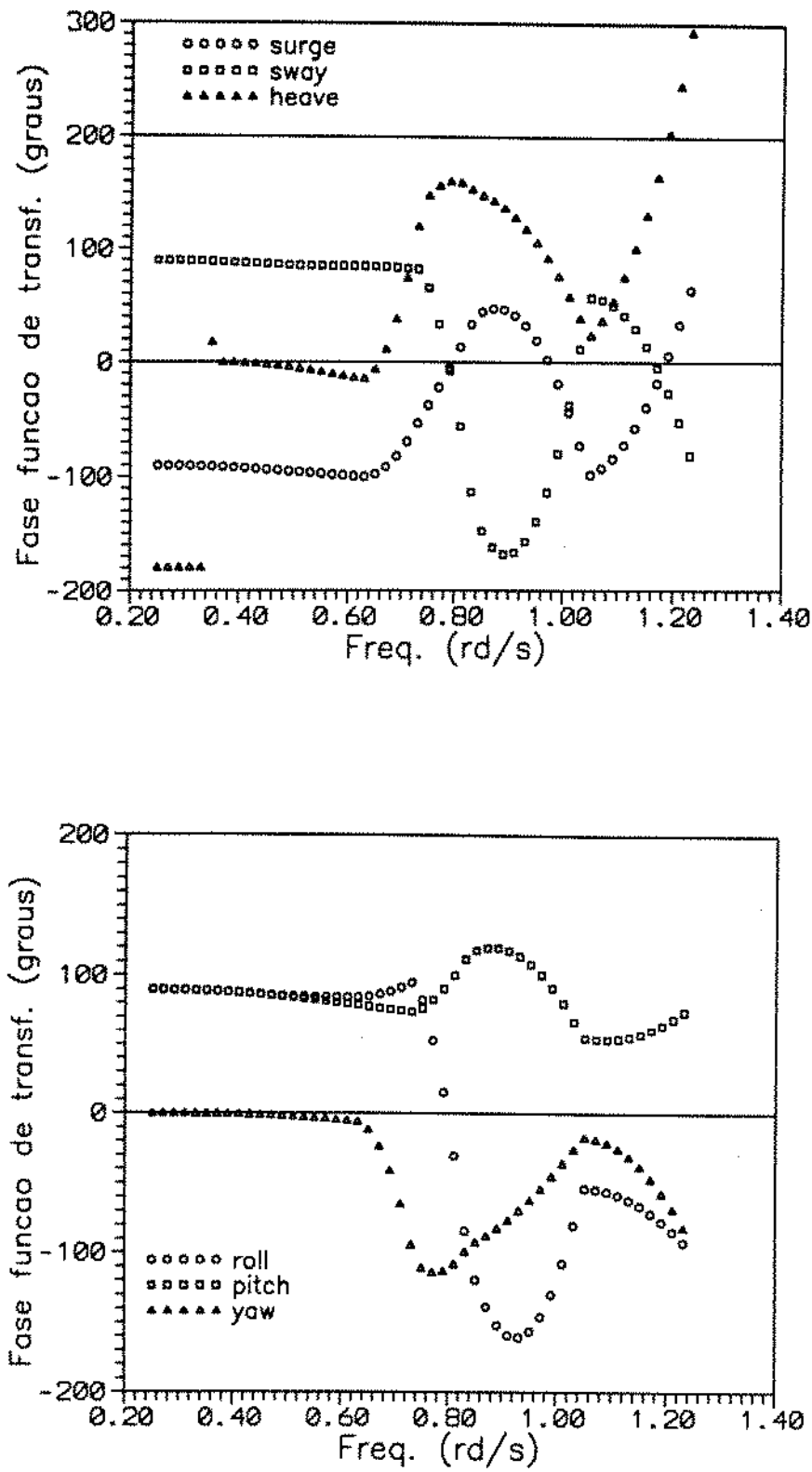


Figura 3.28: Fase da função de transferência da plataforma "B" para onda incidindo a 45 graus

A integração da equação (2.9) para a obtenção da função resposta ao impulso linear foi feita com intervalo de frequência de 0.02 rd/s para as seguintes faixas de frequência : 0.2 rd/s a 1.2 rd/s para a plataforma "A" e 0.25 rd/s a 1.257 rd/s para a plataforma "B". Os valores da amplitude e fase da função de transferência necessários para a integração foram obtidos interpolando-se os valores apresentados anteriormente por um polinômio do segundo grau a cada três frequências .

A função resposta ao impulso linear foi calculada de forma que a seguinte relação seja satisfeita

$$\Delta t = \Delta \tau$$

ou seja, que os valores calculados da função resposta ao impulso tenham o mesmo espaçamento do intervalo de tempo simulado. Assim pode-se obter o número de pontos da função resposta ao impulso a serem avaliados escrevendo a relação anterior da seguinte forma :

$$\frac{T}{N} = \frac{T_r}{N_r} \quad (3.3)$$

onde

T é o tempo total de simulação ;

N é o número total de pontos;

T_r é o intervalo de tempo em que a função resposta ao impulso é avaliada;

N_r número total de pontos calculados da função resposta ao impulso.

Sabendo-se as seguintes relações

$$T = N \Delta t$$

$$T_r = \frac{2\pi}{\Delta \omega}$$

η	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.50	0.0010 0.0	0.0020 0.1350	0.0300 0.1925	0.0024 0.1326	0.0025 0.1175						
0.55	0.0150 0.1600	0.0160 0.0	0.0163 0.1675	0.0750 0.2025	0.0325 0.1550	0.0200 0.1387					
0.60	0.0300 0.1800	0.0375 0.1938	0.0450 0.0	0.0713 0.1950	0.1150 0.1950	0.0525 0.1750	0.0500 0.1500				
0.65	0.0650 0.1975	0.0750 0.2025	0.0838 0.2125	0.0910 0.0	0.0875 0.2075	0.1438 0.1025	0.0850 0.1800	0.0750 0.1450			
0.70	0.0875 0.1700	0.0975 0.1800	0.0900 0.1950	0.1125 0.2063	0.1310 0.0	0.1275 0.2070	0.1325 0.1925	0.0930 0.1550	0.0650 0.1050		
0.75		0.1125 0.1350	0.1325 0.1600	0.1438 0.1313	0.1450 0.1950	0.1350 0.0	0.1100 0.2050	0.0850 0.2050	0.0550 0.1150	0.0300 0.0563	
0.80			0.1300 0.1100	0.1388 0.1525	0.1350 0.1900	0.1125 0.2025	0.1020 0.0	0.0800 0.1875	0.0300 0.2350	0.0300 0.0800	0.0100 0.0313
0.85				0.1200 0.1200	0.1050 0.1750	0.0850 0.2050	0.0663 0.2050	0.0510 0.0	0.0550 0.1700	0.0025 0.2475	0.0313 0.0875
0.90					0.0650 0.1750	0.0438 0.2175	0.0275 0.2350	0.0438 0.2188	0.0240 0.0	0.0413 0.1600	0.0463 0.2225
0.95						0.0025 0.2250	-0.0050 0.2438	0.0025 0.2475	0.0313 0.2250	0.0720 0.0	0.1125 0.1700
1.00							-0.0200 0.2313	0.0038 0.2363	0.0450 0.2225	0.1050 0.2050	0.1560 0.0

Tabela 3.9: Função de transferência quadrática na direção do movimento de sway para a plataforma "A".

3.6 CARACTERÍSTICAS DO RISER

Em algumas simulações dos movimentos da plataforma "B" foi introduzido o efeito de um conjunto de 16 risers de produção iguais aos da Figura 3.29 cuja as características são apresentadas a seguir na Tabela 3.10.

comprimento	1000 m
diâm. externo	244.5 mm
diâm. interno	232.5 mm
peso linear no ar	69.9 Kg/m
fluido de completação	1198 Kg/m ³
tração no topo	1333 KN
tubo de produção de óleo	
diâm. externo	114.3 mm
peso linear no ar	18.9 Kg/m
massa espec. do óleo	930 Kg/m ³
tubo de produção de gás	
diâm. externo	60.3 mm
peso linear no ar	6.9 Kg/m

Tabela 3.10: Características do riser

Conforme descrito anteriormente efeito de um conjunto de risers pode ser considerado quase-estaticamente e para tanto é necessário saber qual é o esforço do conjunto de risers para um dado deslocamento (Offset) em relação à cabeça do poço. Para isto o conjunto de 16 risers foi transformado em um "riser equivalente" com área igual à soma das áreas dos 16 risers e inércia igual à soma das inércias própria e de transporte para o conjunto de risers. Assim utilizando-se os perfis de correnteza apresentados na Tabela 3.11 obteve-se o esforço horizontal do conjunto de risers para um dado offset, conforme

mostra a Figura 3.30, empregando-se o método dos elementos finitos.

profundidade (m)	correnteza (m/s)	
	anual	centenária
0.0	0.559	1.167
5.0	0.559	1.167
20.0	0.441	0.988
40.0	0.389	0.937
60.0	0.383	1.141
80.0	0.548	1.366
100.0	0.565	1.352
150.0	0.575	1.448
200.0	0.251	0.897
250.0	0.297	0.805
300.0	0.316	0.796
400.0	0.369	0.618
500.0	0.419	0.728
600.0	0.369	0.758
fundo	0.369	0.758

Tabela 3.11: Perfis de correnteza

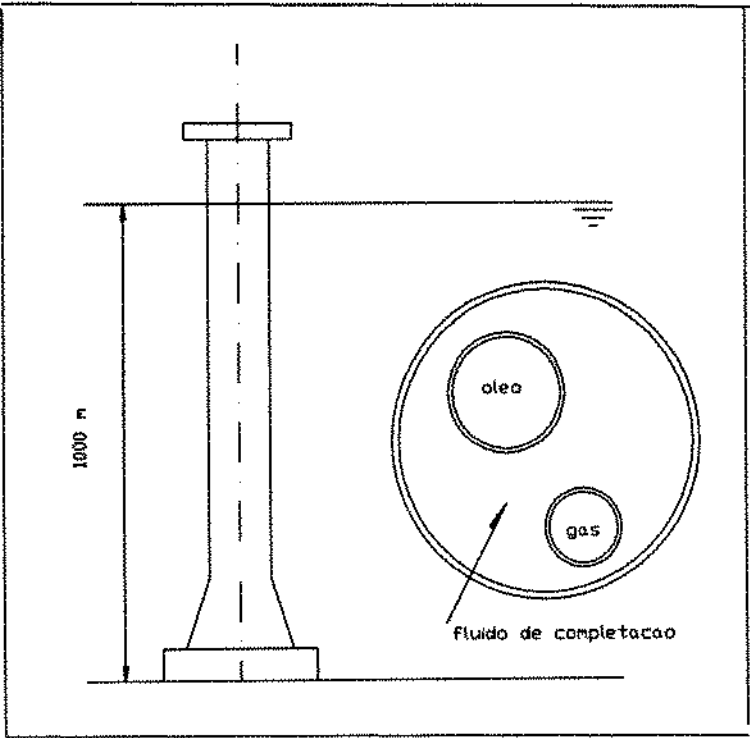


Figura 3.29: Esquema do riser de produção

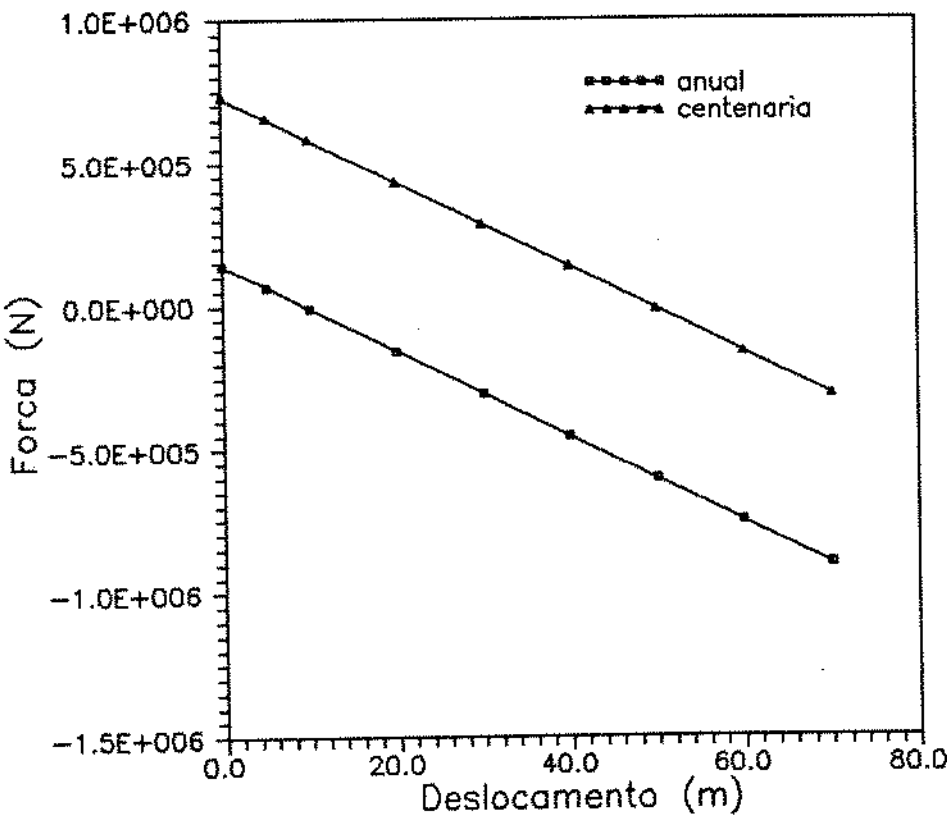


Figura 3.30: Esforço horizontal agindo na plataforma devido a um conjunto de 16 risers em função do offset da plataforma

3.7 RESULTADOS

Inicialmente foram feitas simulações para as plataformas "A" e "B" considerando os efeitos de vento, correnteza e onda separadamente. As seguintes condições foram utilizadas :

- velocidade do vento 20.2 m/s a 90 graus
- velocidade da correnteza 0.86 m/s a 90 graus
- onda incidindo a 90 graus com $H_{1/3} = 5.1$ m e $T=8.5$ s

A análise dos resultados foi feita de duas maneiras : através de uma análise estatística ou através de uma análise espectral dos históricos dos movimentos simulados. As simulações dos movimentos para realização destas análises foram feitas a cada 0.5 s para um período de 5400 s, sendo que os primeiros 1800 s foram desprezados para se evitar efeitos transientes. Para a análise espectral foram tomados blocos de 1024 pontos e utilizou-se a janela de Hamming.

A Figura 3.31 apresenta o espectro do ITTC de energia de onda a partir do qual foram obtidas as amplitudes da onda ao longo do tempo conforme mostra a Figura 3.32. Na Figura 3.33 são mostrados os movimentos de sway e roll para a plataforma "A" resultantes da ação desta onda. A Figura 3.34 apresenta os mesmos movimentos para a plataforma "B".

O efeito da correnteza nos movimentos de sway e roll para a plataforma "A" é apresentado na Figura 3.35, enquanto que a Figura 3.36 apresenta para a plataforma "B".

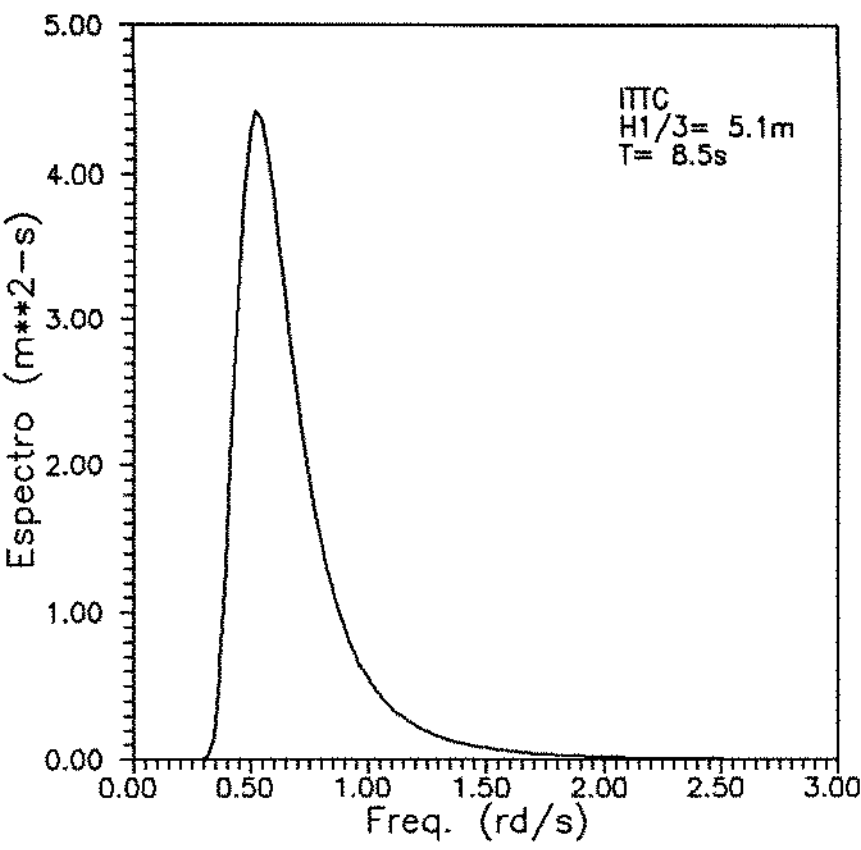


Figura 3.31: Espectro da onda

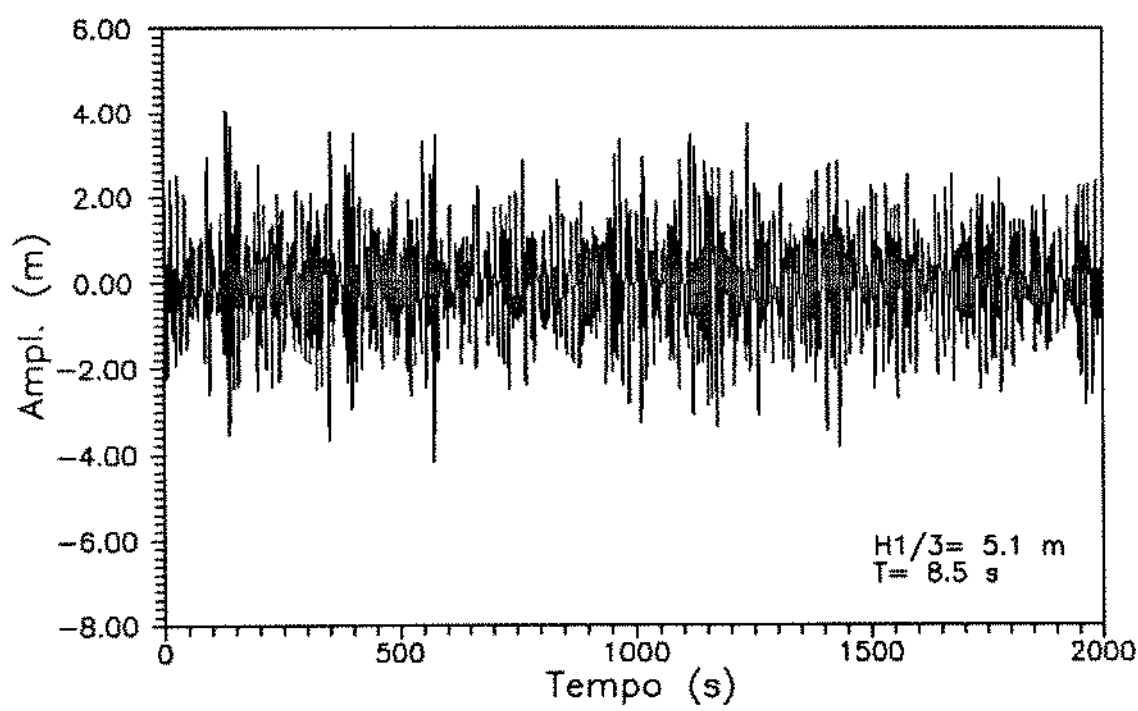


Figura 3.32: Amplitudes da onda

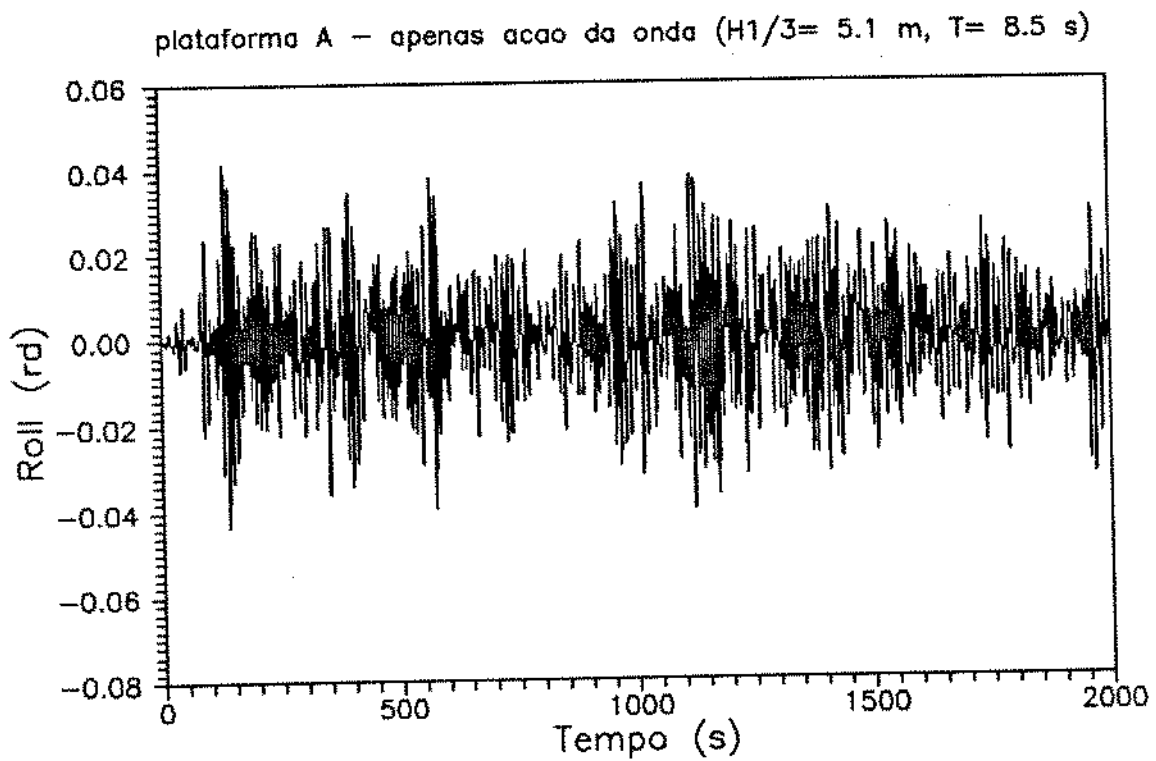
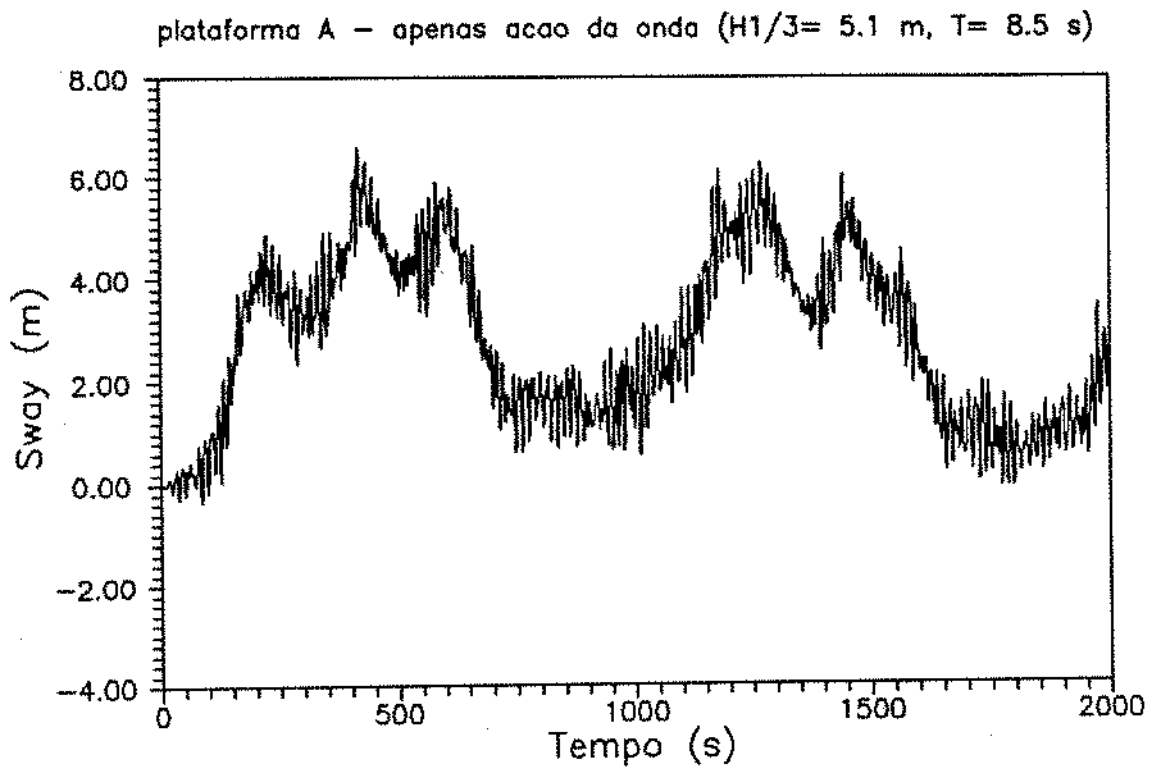


Figura 3.33: Movimento de sway e roll devido apenas ação da onda - plat. "A"

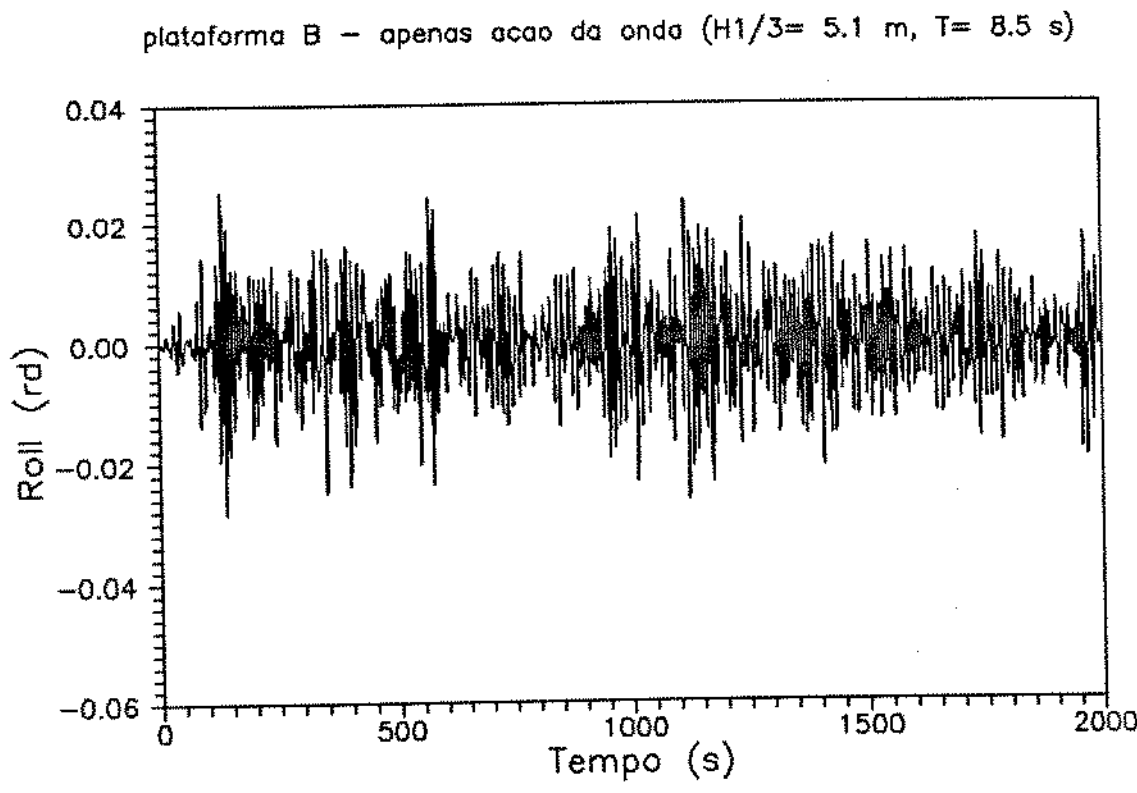
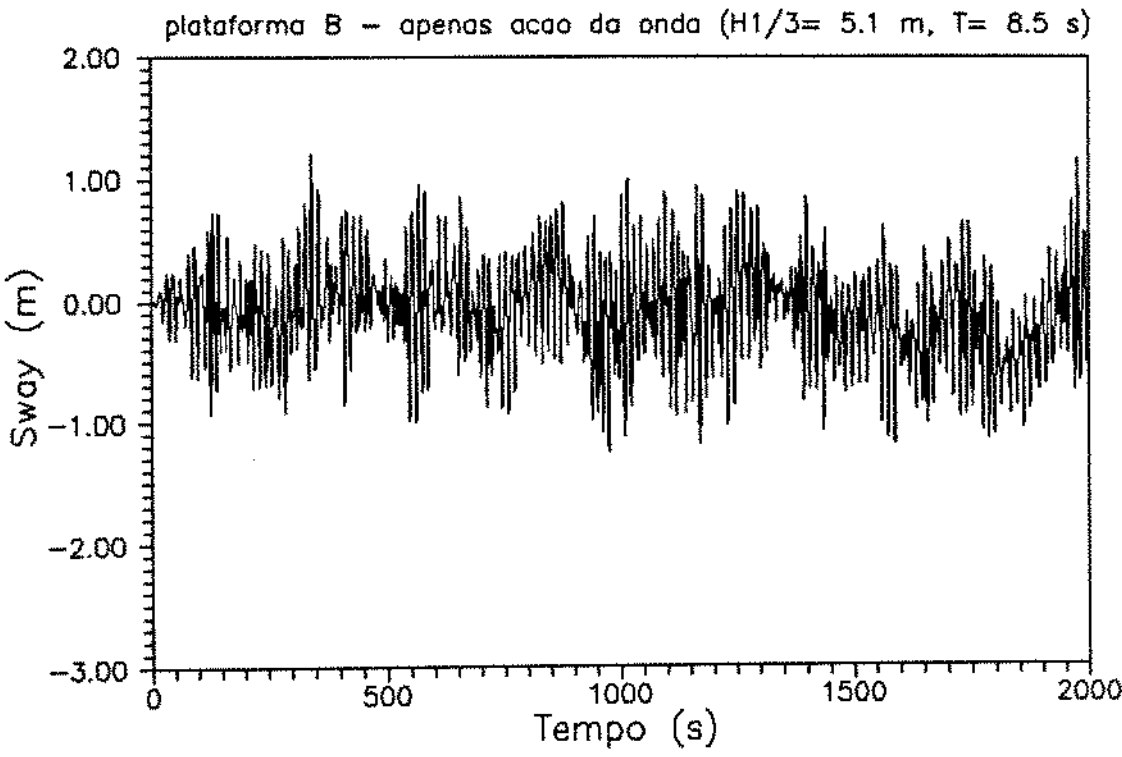


Figura 3.34: Movimento de sway e roll devido apenas ação da onda - plat. "B"

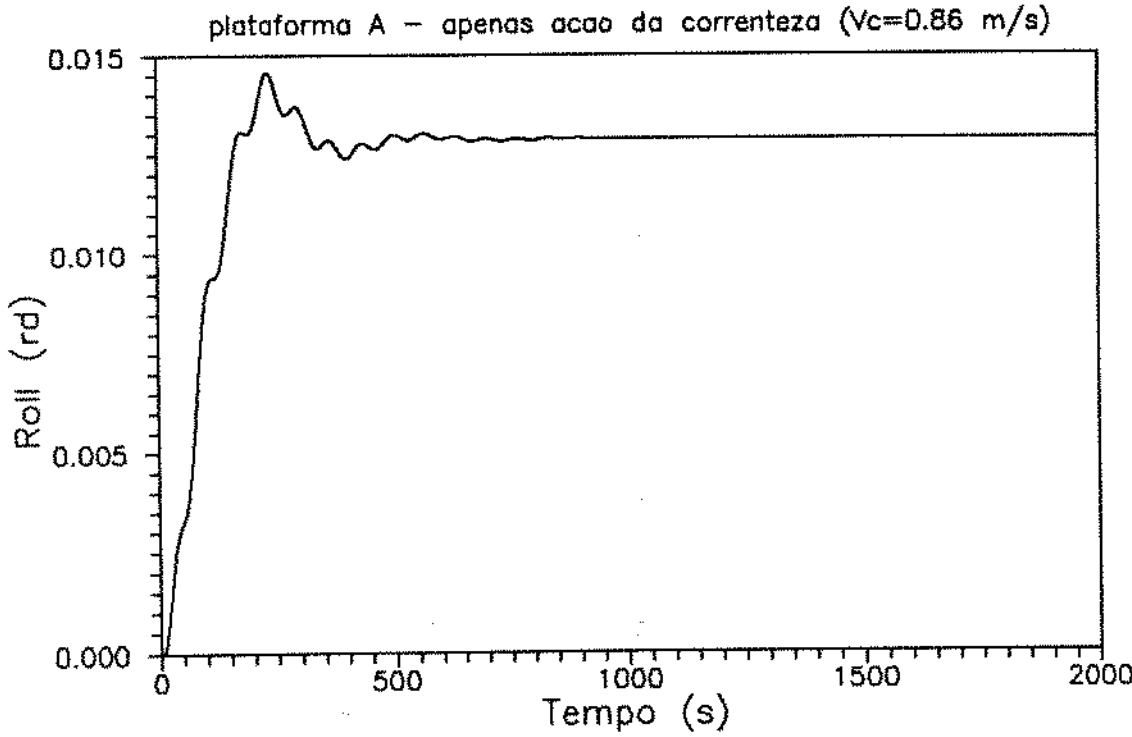
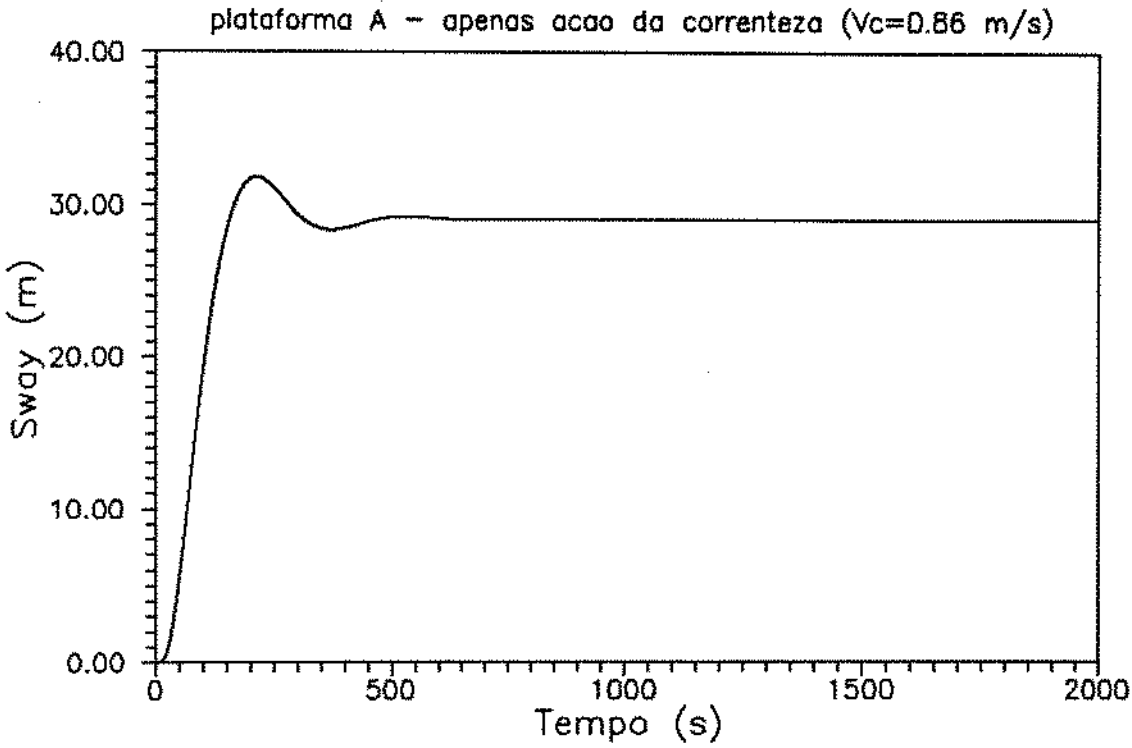


Figura 3.35: Movimento de sway e roll devido apenas ação da correnteza - plat. "A"

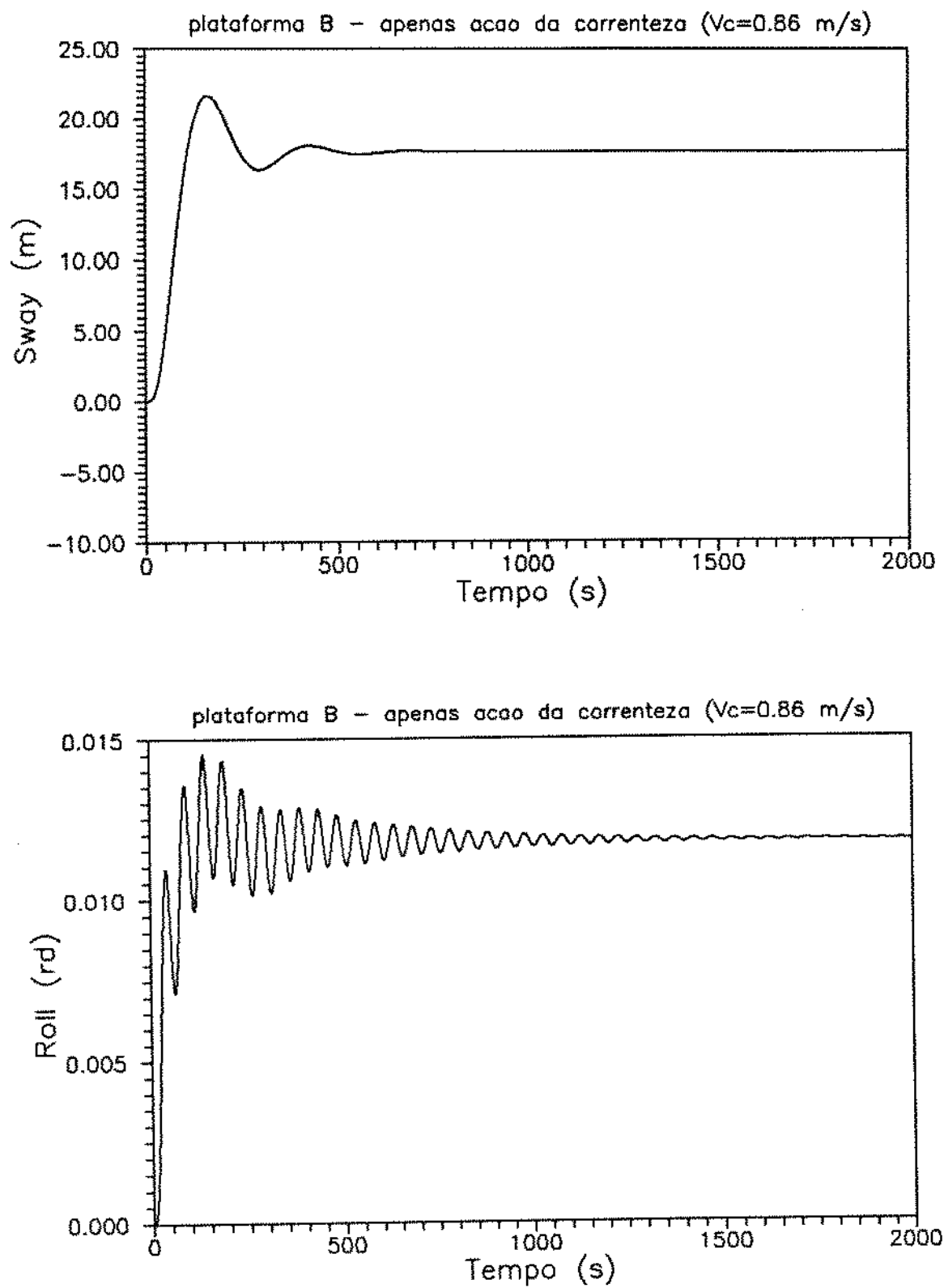


Figura 3.36: Movimento de sway e roll devido apenas ação da correnteza - plat. "B"

A Figura 3.38 apresenta a variação ao longo do tempo da parte flutuante da velocidade do vento obtida a partir do espectro da Figura 3.37 e a influência da ação do vento nos movimentos das plataformas "A" e "B" pode ser vista nas Figuras 3.39 e 3.40 respectivamente.

Nas Figuras 3.41 e 3.42 são mostrados os movimentos de sway e roll para as plataformas "A" e "B" considerando os três efeitos atuando simultâneamente.

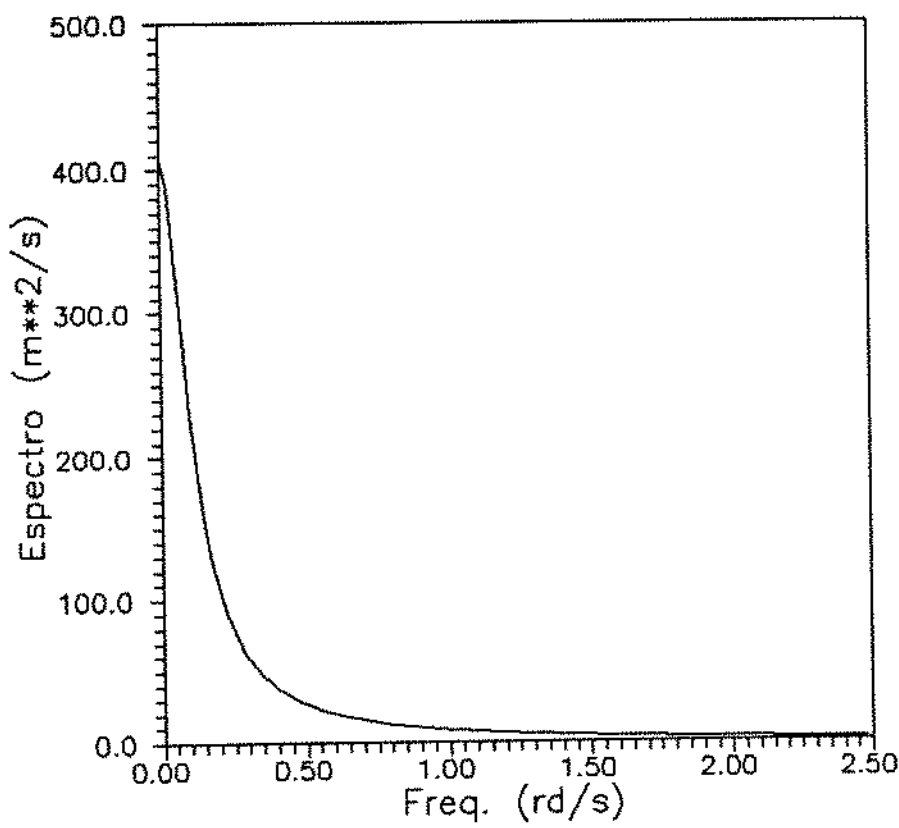


Figura 3.37: Espectro da parte flutuante da velocidade do vento

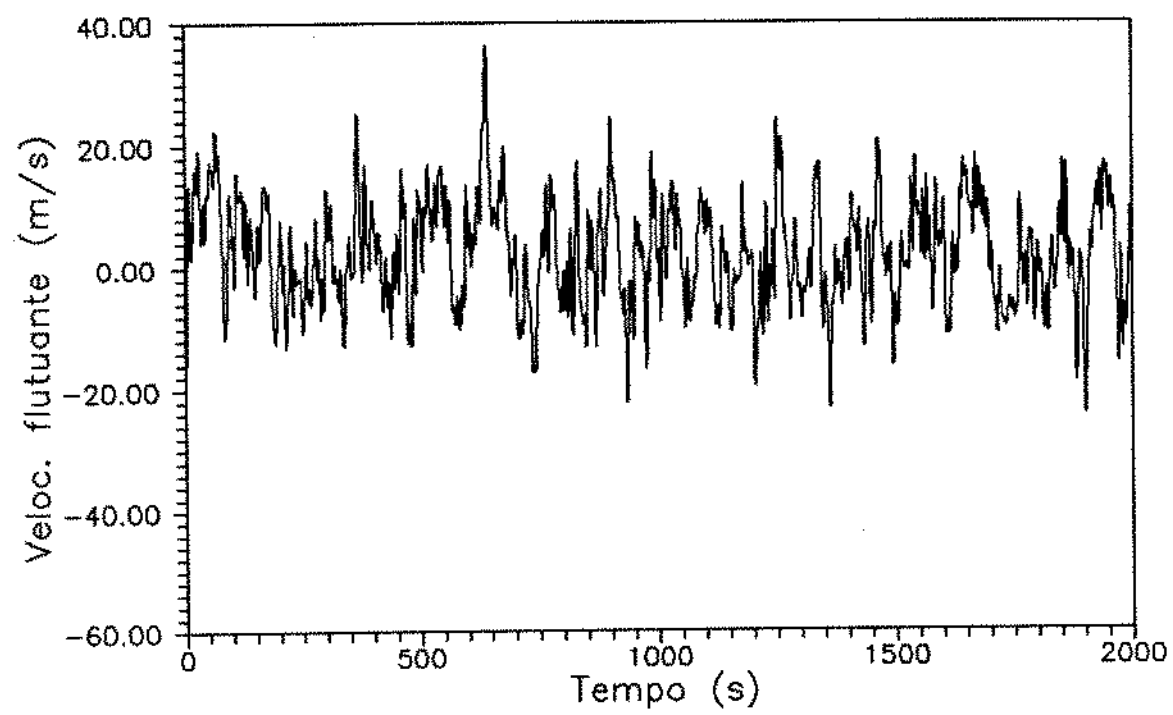


Figura 3.38: Parte flutuante da velocidade do vento

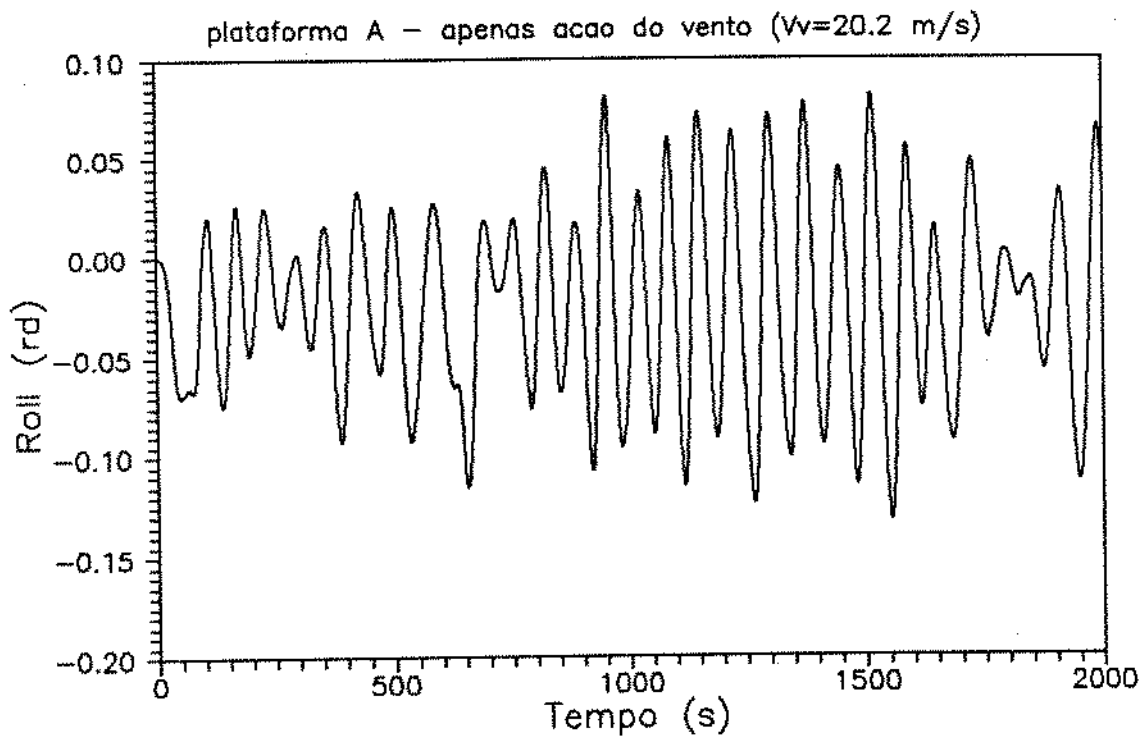
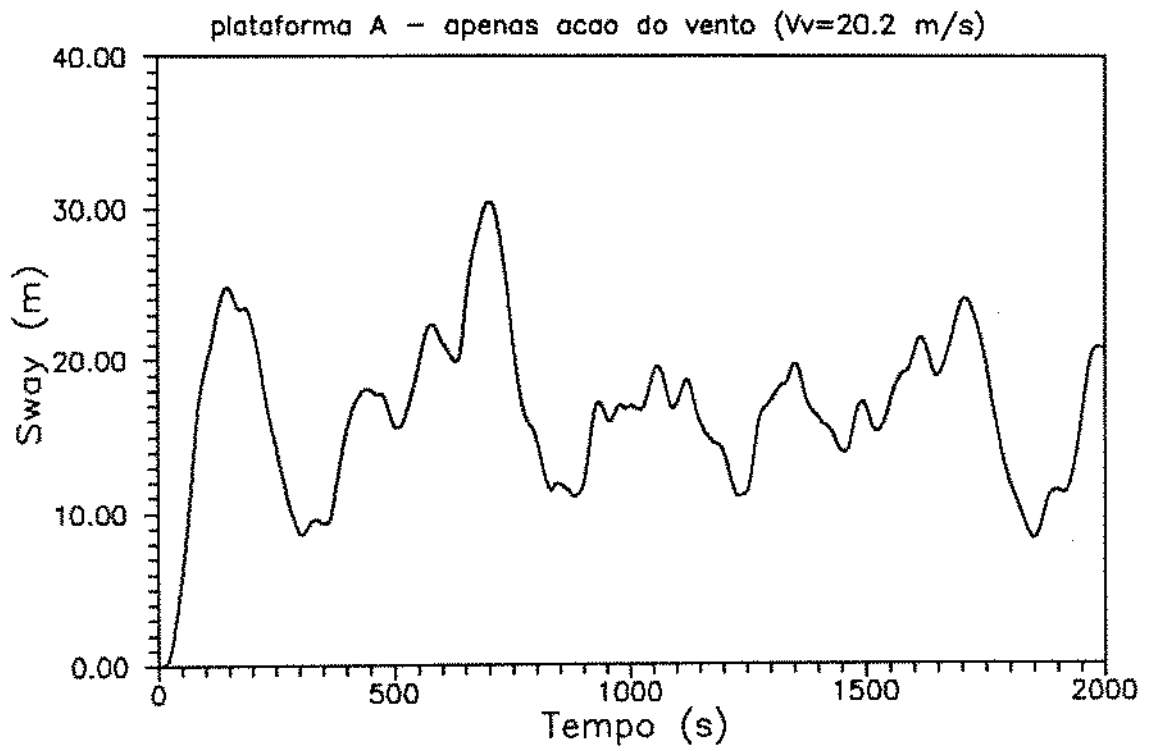


Figura 3.39: Movimento de sway e roll devido apenas ação do vento - plat. "A"

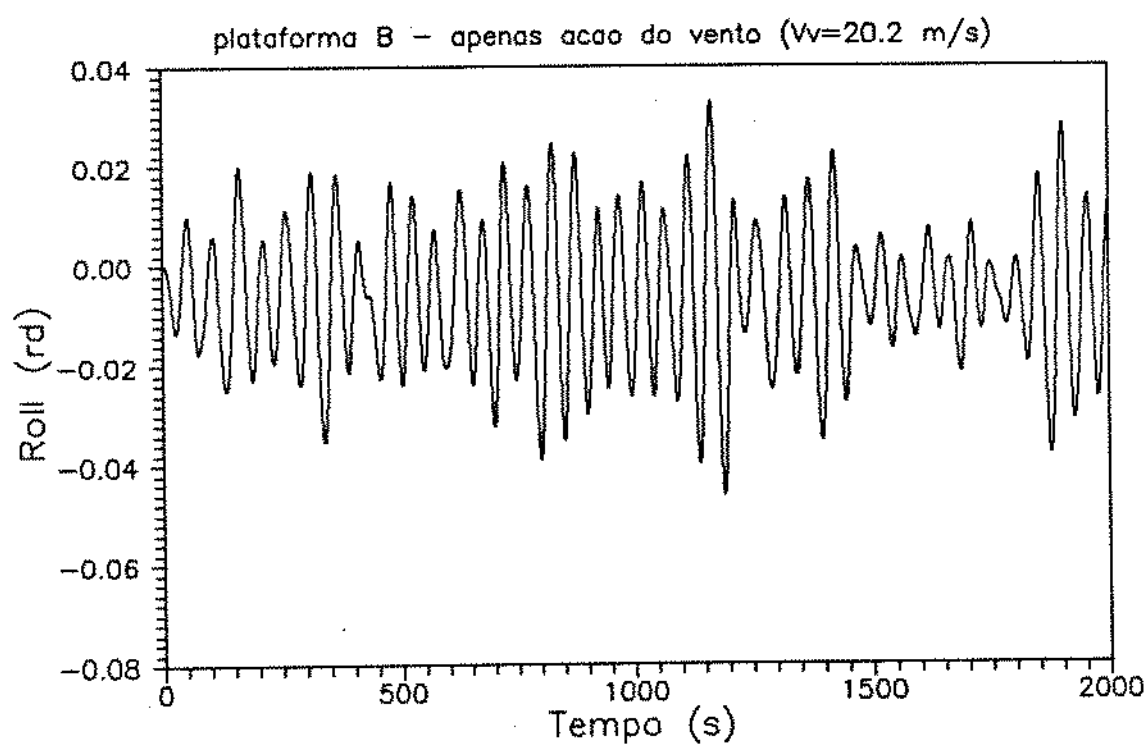
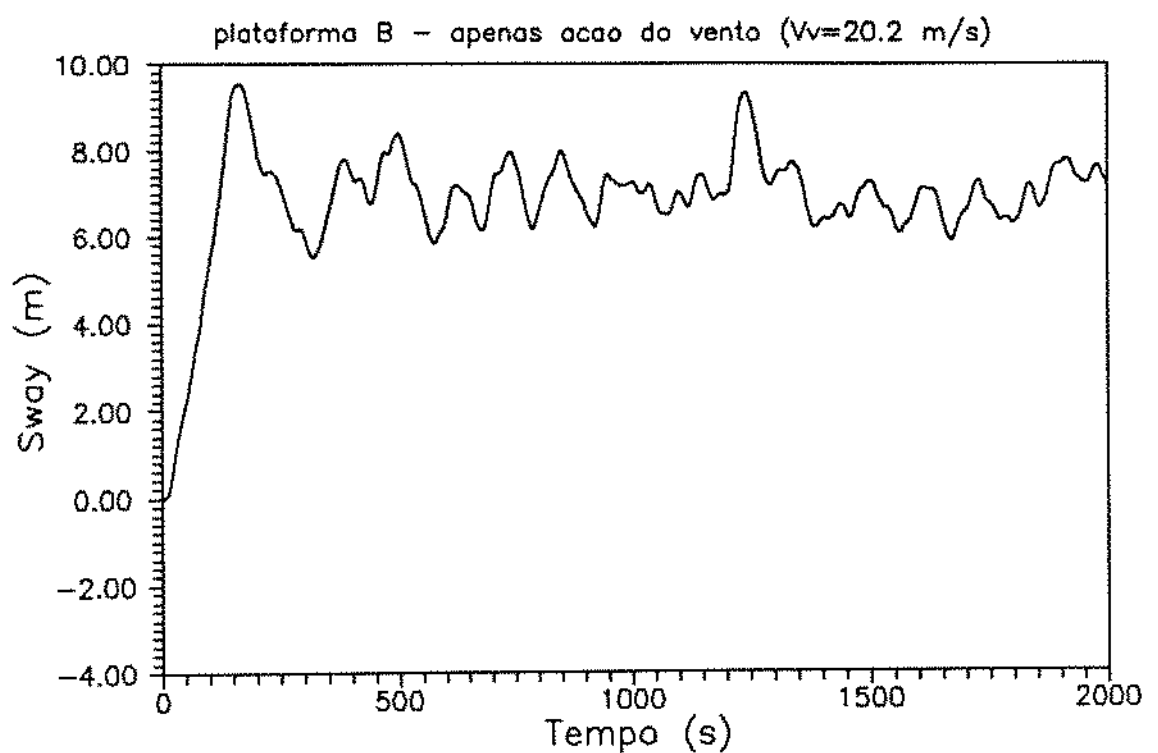


Figura 3.40: Movimento de sway e roll devido apenas ação do vento - plat. "B"

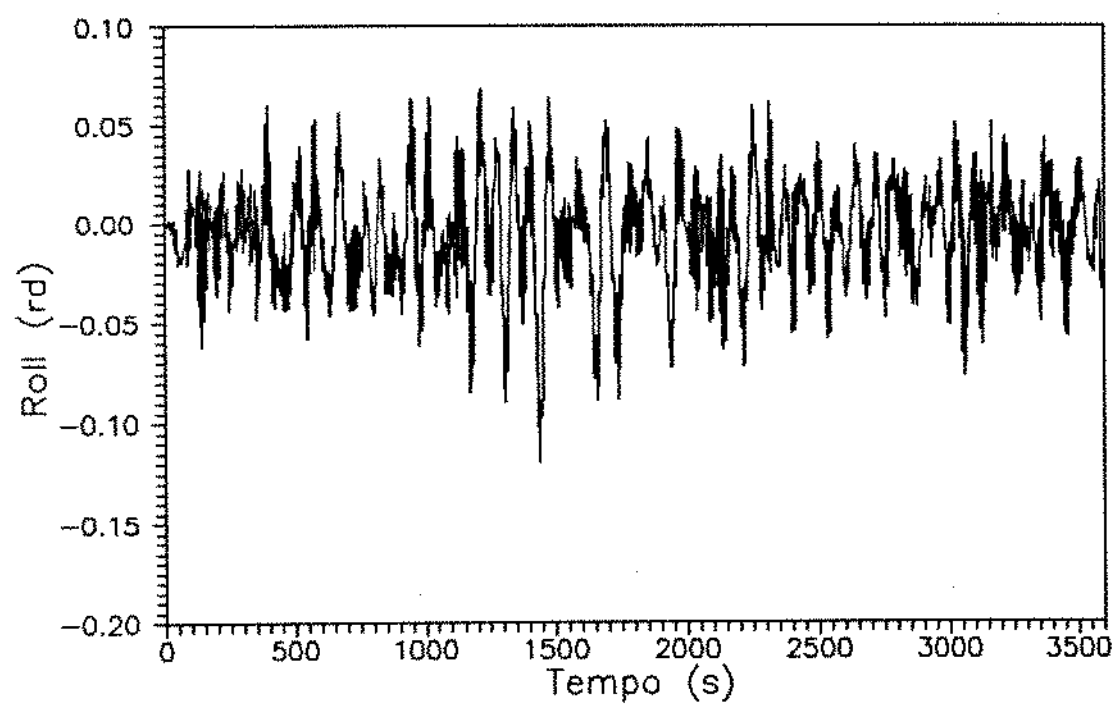
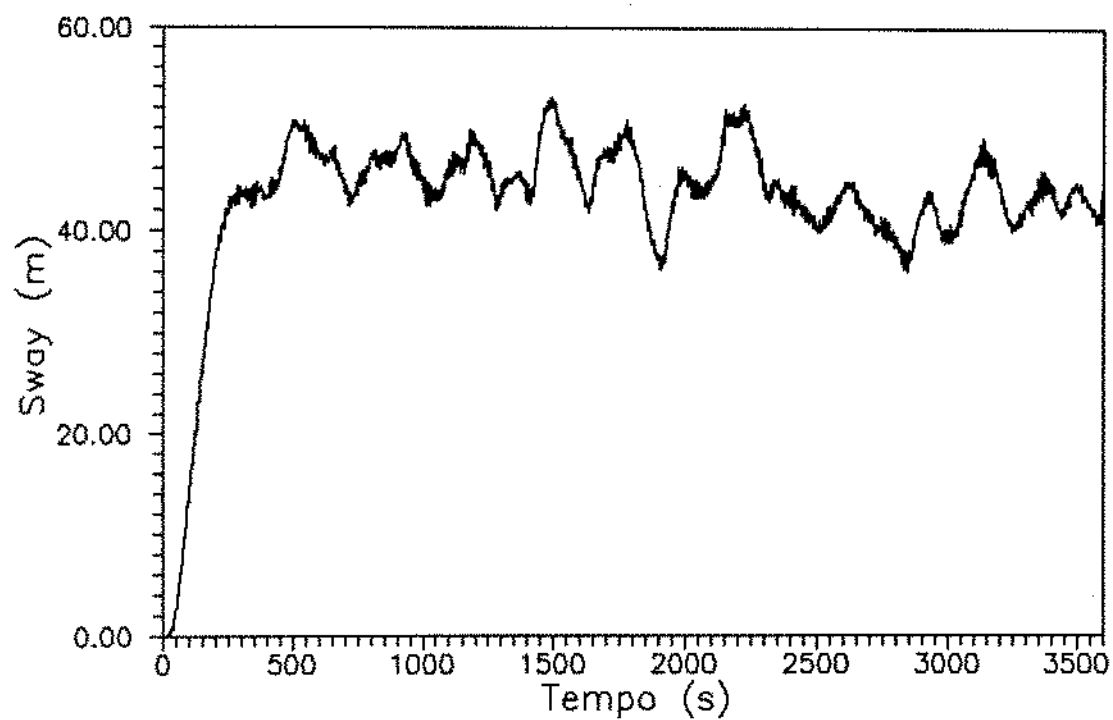


Figura 3.41: Movimento de sway e roll considerando todos os efeitos ambientais - plat.

"A"

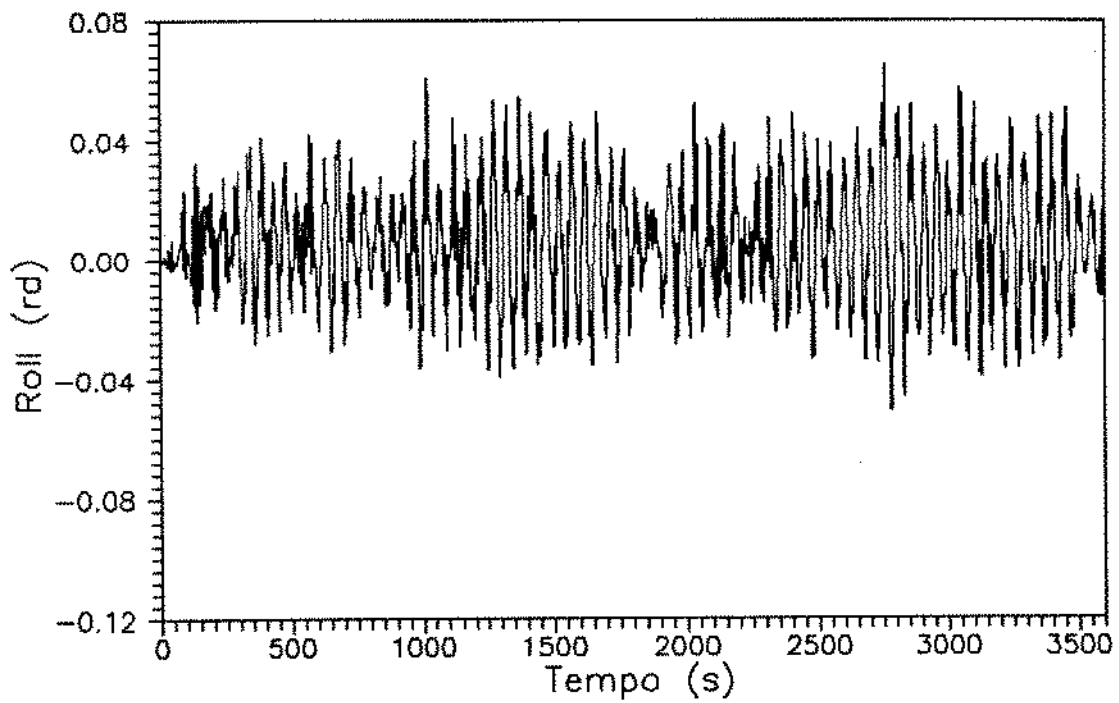
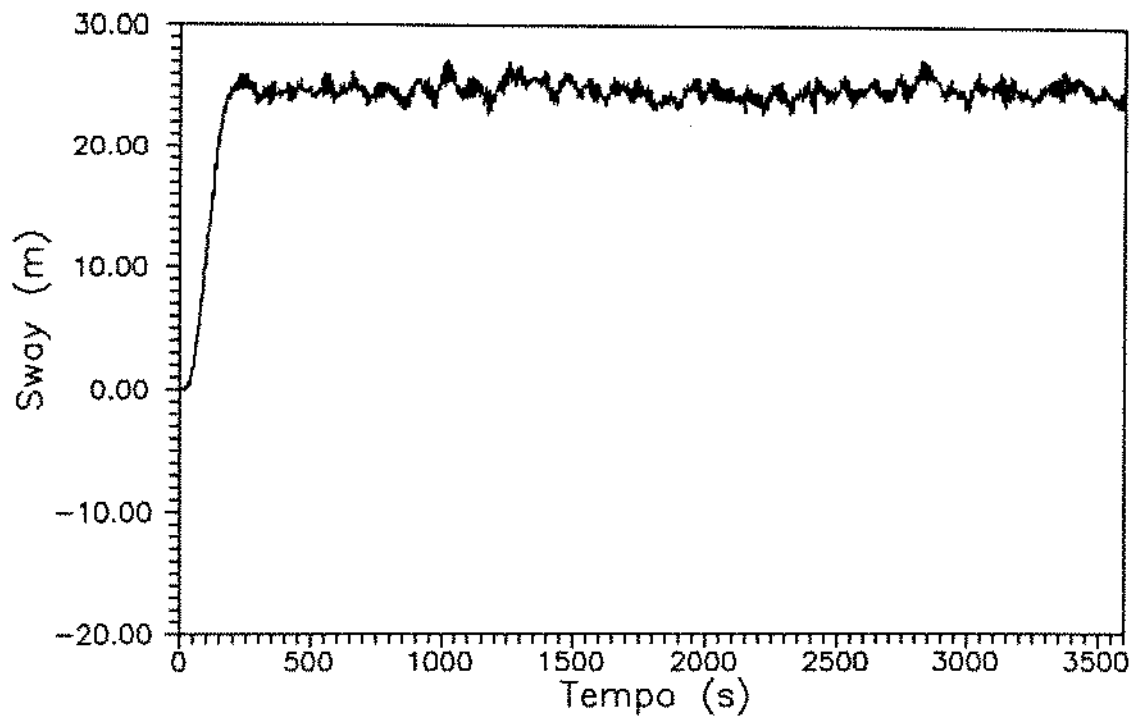


Figura 3.42: Movimento de sway e roll considerando todos os efeitos ambientais - plat. "B"

As Tabelas 3.12 e 3.13 resumem os resultados obtidos através da análise estatística dos históricos dos movimentos de sway e roll quando são considerados os efeitos ambientais separadamente e simultaneamente. Nas Figuras 3.43 e 3.44 são mostrados os histogramas para os movimentos de sway e roll das plataformas "A" e "B" quando os três efeitos ambientais estão presentes. Nestas figuras além dos histogramas é apresentada, para efeito de comparação, uma distribuição normal com média μ e desvio padrão σ . A variável normalizada Z_n é definida da seguinte forma :

$$Z_n = \frac{Z - \mu}{\sigma}$$

onde é a variável em estudo que pode ser o movimento de sway ou roll. As Figuras 3.45 e 3.46 apresentam os resultados da análise espectral com os três efeitos ambientais agindo na plataforma. São mostrados os seguintes parâmetros :

$$m_0 = \int_0^\infty S(\omega) d\omega$$

$$E = \sqrt{\frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4}}$$

$$T01 = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_1}}$$

$$T02 = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

onde m_n são os momentos espectrais definidos pela seguinte expressão

$$m_n = \int_0^\infty \omega^n S(\omega) d\omega$$

sway				
parâmetro	vento	correnteza	onda	vento+cor.+onda
medio (m)	13.197	29.032	3.118	44.089
max. (m)	15.922	29.032	7.746	48.689
min. (m)	10.624	29.032	-0.285	40.078
ampl. média (m)	2.065	-	1.566	1.923
alt. signif. (m)	6.232	-	5.310	6.626
período (s)	117.4	-	37.2	46.5
roll				
parâmetro	vento	correnteza	onda	vento+cor.+onda
medio (rd)	-0.0177	0.0128	0.0	-0.0041
max. (rd)	0.0750	0.0128	0.0434	0.0778
min. (rd)	-0.1173	0.0128	-0.0488	-0.0949
ampl. média (rd)	0.0899	-	0.0337	0.0596
alt. signif. (rd)	0.2646	-	0.1068	0.1970
período (s)	69.2	-	11.1	24.4

Tabela 3.12: Resultados dos movimentos de sway e roll para plataforma "A"

sway				
parâmetro	vento	correnteza	onda	vento+cor.+onda
medio (m)	7.138	17.639	-0.072	24.738
max. (m)	9.658	17.639	1.595	27.538
min. (m)	5.346	17.639	-1.570	22.651
ampl. média (m)	1.406	-	1.056	1.277
alt. signif. (m)	4.468	-	3.212	3.786
período (s)	134.8	-	13.5	19.4
roll				
parâmetro	vento	correnteza	onda	vento+cor.+onda
medio (rd)	-0.0061	0.0118	0.0	0.0059
max. (rd)	0.0543	0.0118	0.0303	0.0653
min. (rd)	-0.0649	0.0118	-0.0302	-0.0507
ampl. média (rd)	0.0471	-	0.0209	0.0431
alt. signif. (rd)	0.145	-	0.0662	0.1436
período (s)	49.5	-	11.3	25.9

Tabela 3.13: Resultados dos movimentos de sway e roll para plataforma "B"

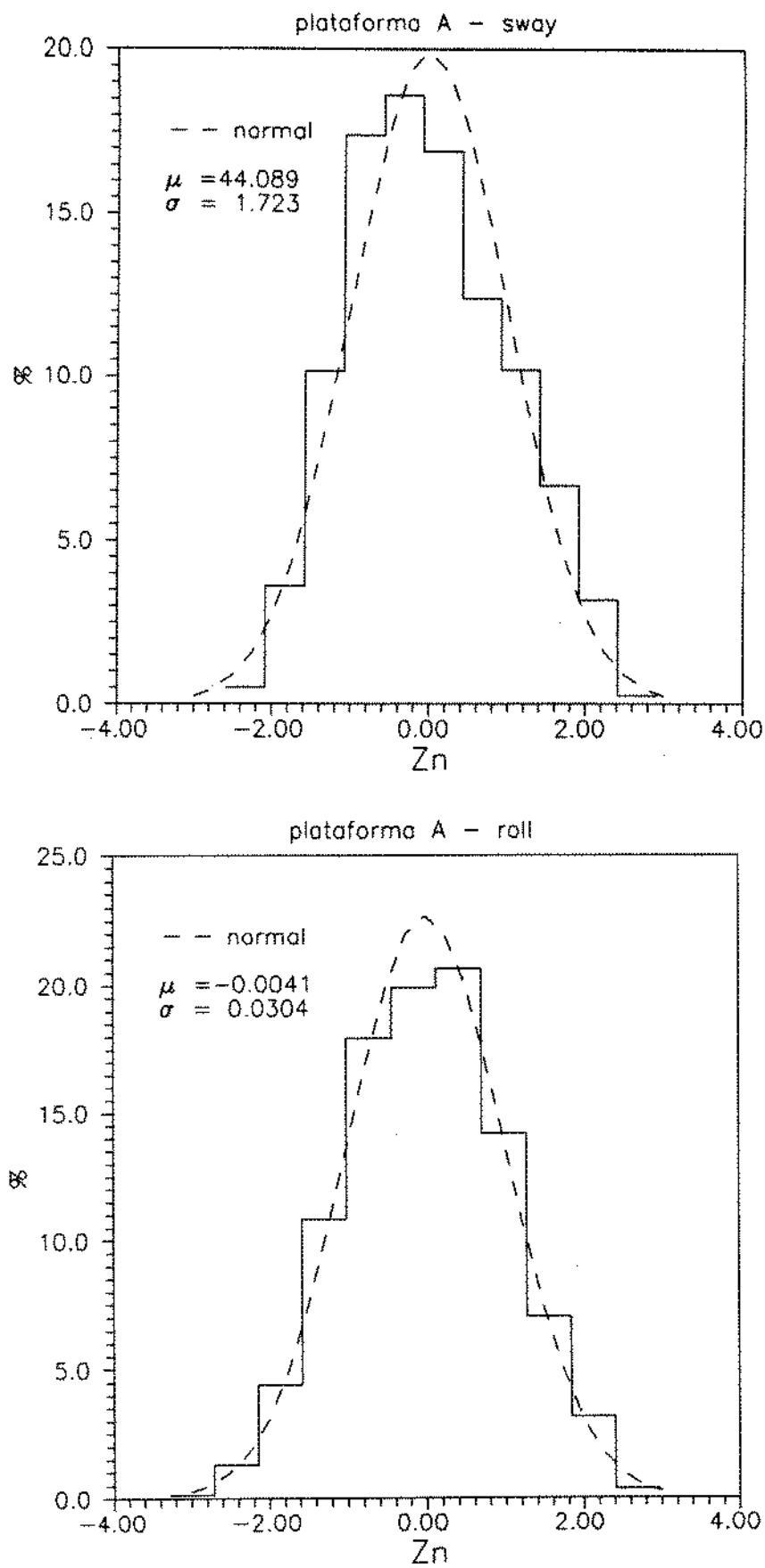


Figura 3.43: Histograma dos movimentos de sway e roll para a plataforma "A"

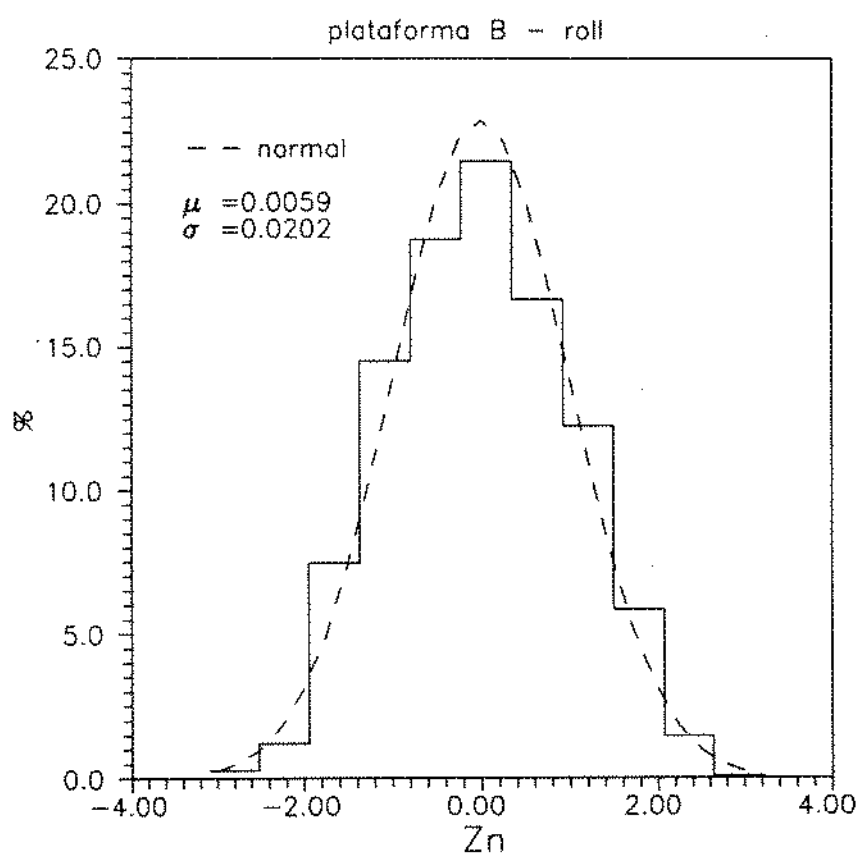
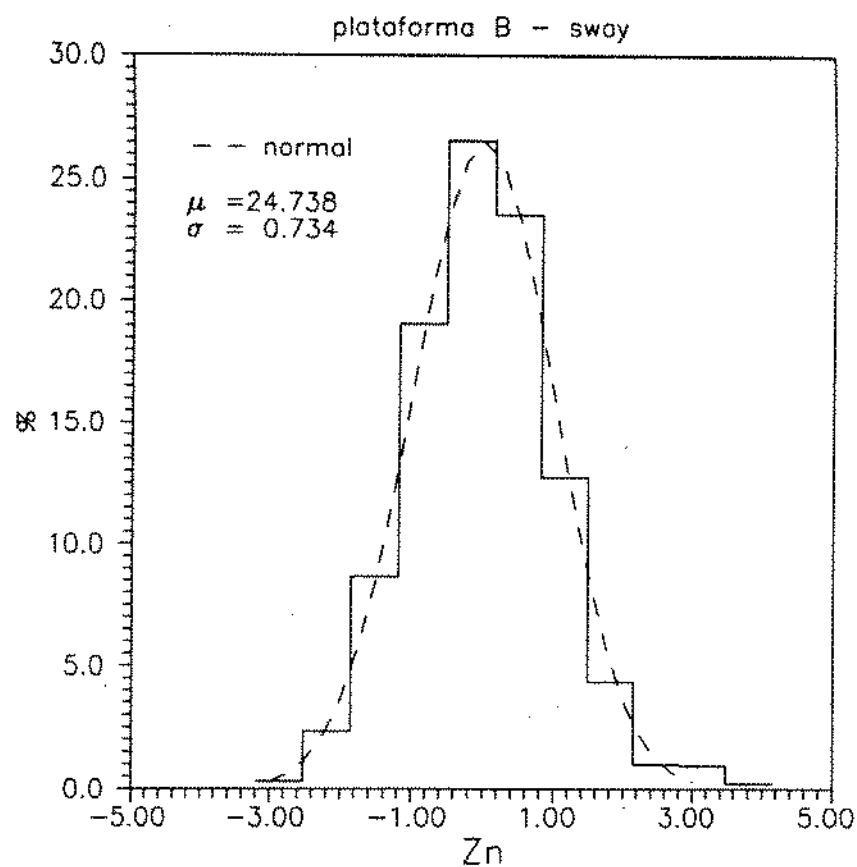


Figura 3.44: Histograma dos movimentos de sway e roll para a plataforma "B"

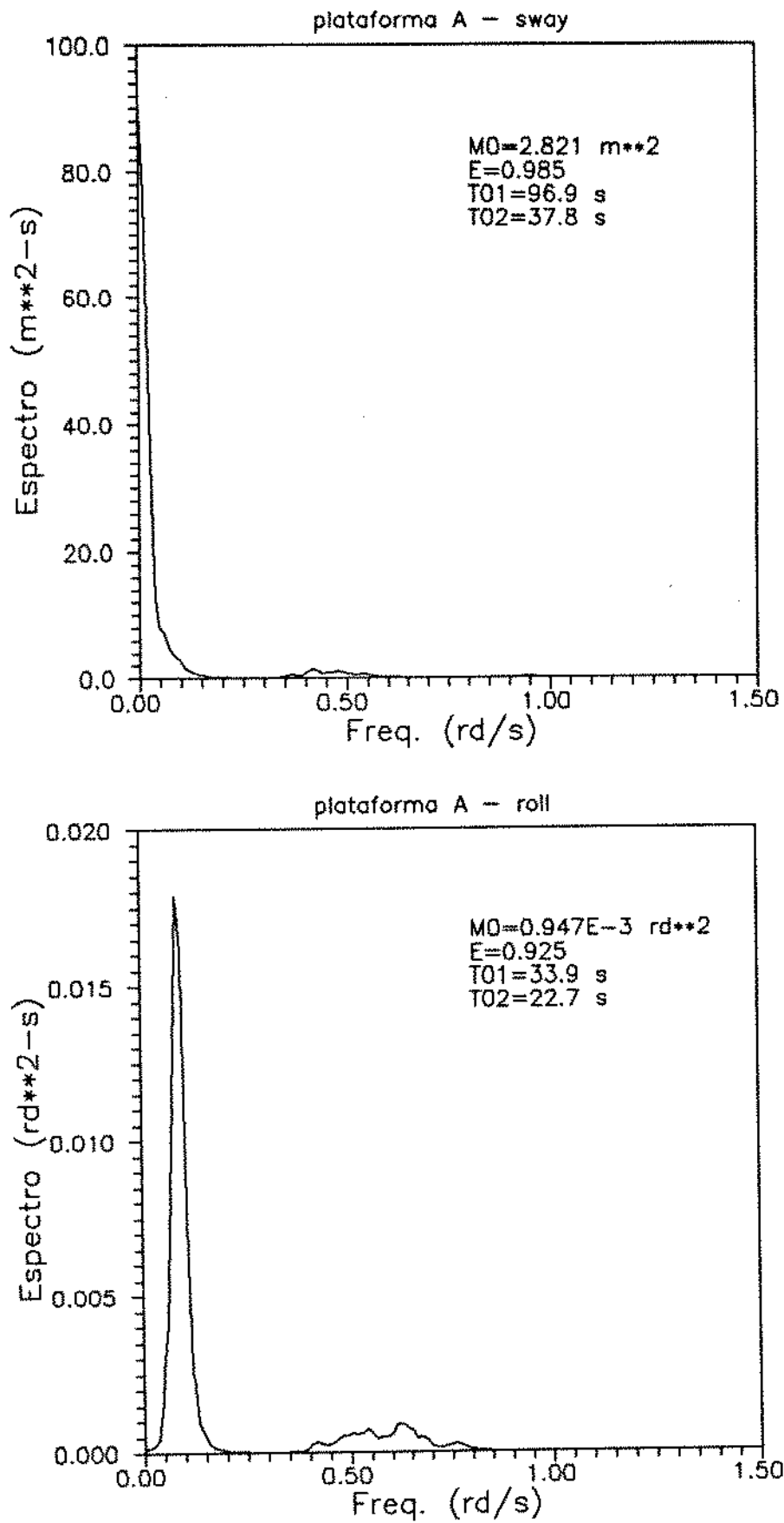


Figura 3.45: Análise espectral dos movimentos de sway e roll para a plataforma "A"

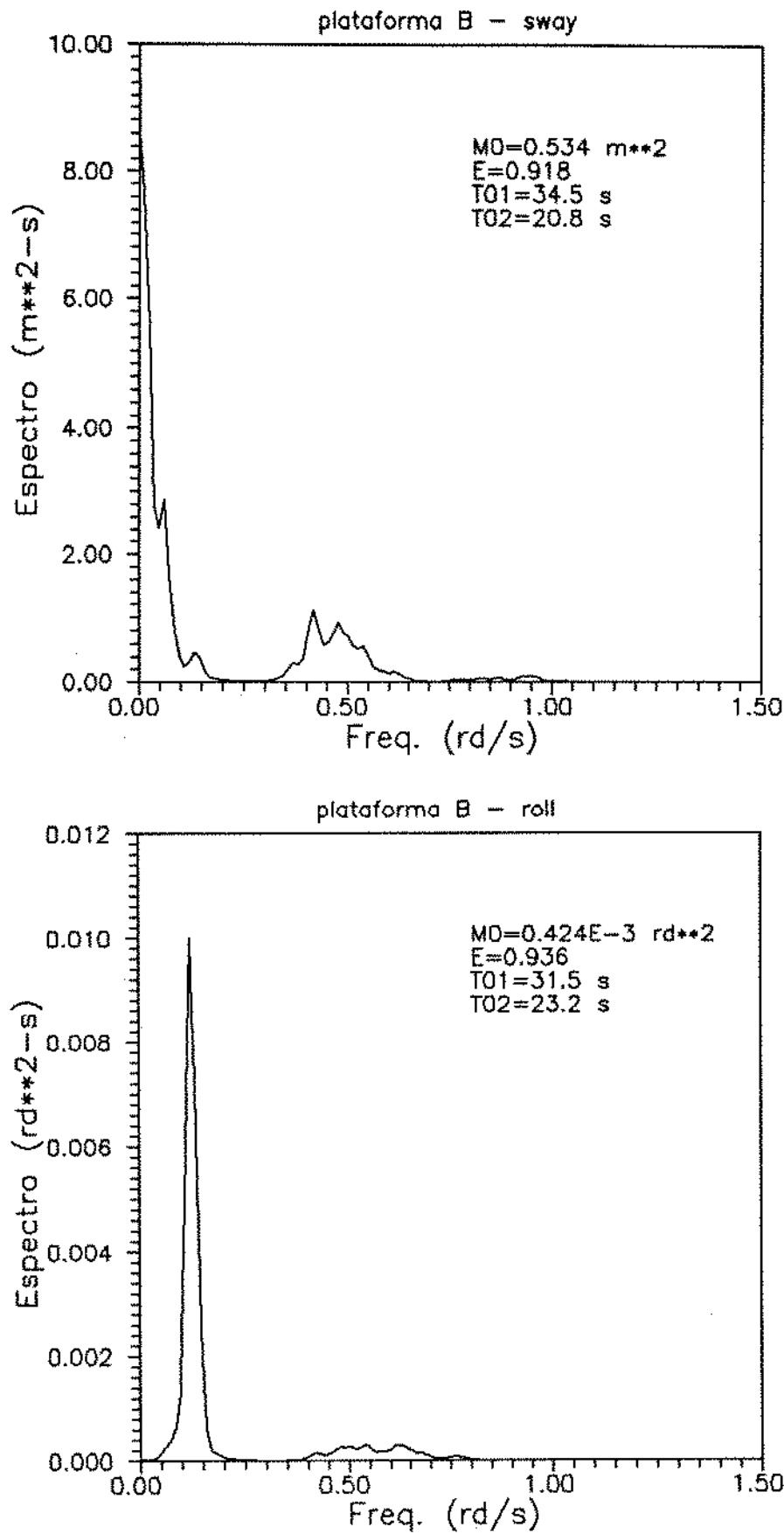


Figura 3.46: Análise espectral dos movimentos de sway e roll para a plataforma "B"

Para a plataforma "B" foram feitas simulações dos movimentos com e sem um conjunto de 16 risers para as seguintes condições ambientais :

- velocidade do vento 30.2 m/s a 225 graus
- velocidade da correnteza 1.76 m/s a 225 graus
- onda incidindo a 225 graus com $H_{1/3} = 7.6$ m e $T=10.1$ s

A curva de esforços horizontais do conjunto de risers da Figura 3.30 utilizada foi a referente ao perfil centenário de correnteza. Os movimentos de surge e sway são mostrados na Figura 3.47 e a Tabela 3.14 apresenta os resultados da análise estatística dos movimentos com e sem o conjunto de risers. O deslocamento planar da plataforma "B" sem o conjunto de risers é apresentado na Figura 3.48. Deve-se observar que nas simulações da plataforma "B" não estão sendo incluídos os efeitos de segunda ordem.

parâmetro	sway		surge	
	com riser	sem riser	com riser	sem riser
medio (m)	-53.824	-57.453	-53.785	-57.399
max. (m)	-50.675	-54.256	-50.231	-53.788
min. (m)	-58.227	-62.326	-57.820	-61.692
ampl. média (m)	2.164	2.203	2.073	2.091
alt. signif. (m)	6.470	6.708	6.406	6.426
período (s)	28.9	29.9	26.3	26.7

Tabela 3.14: Resultados dos movimentos com ou sem o conjunto de risers

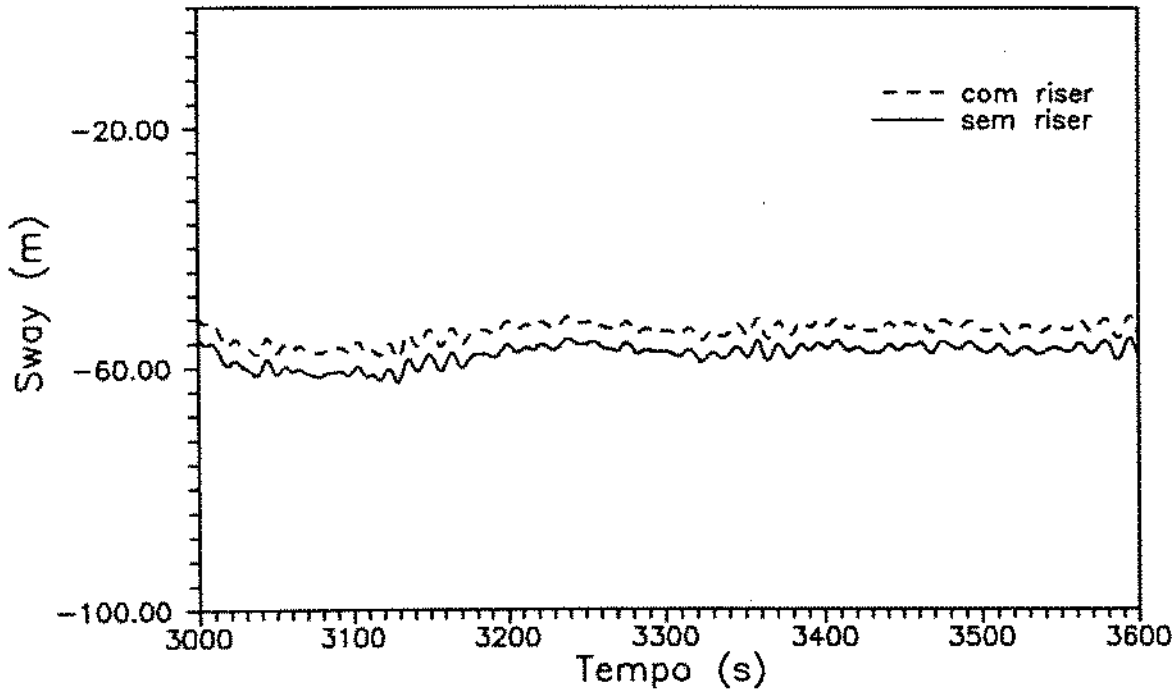
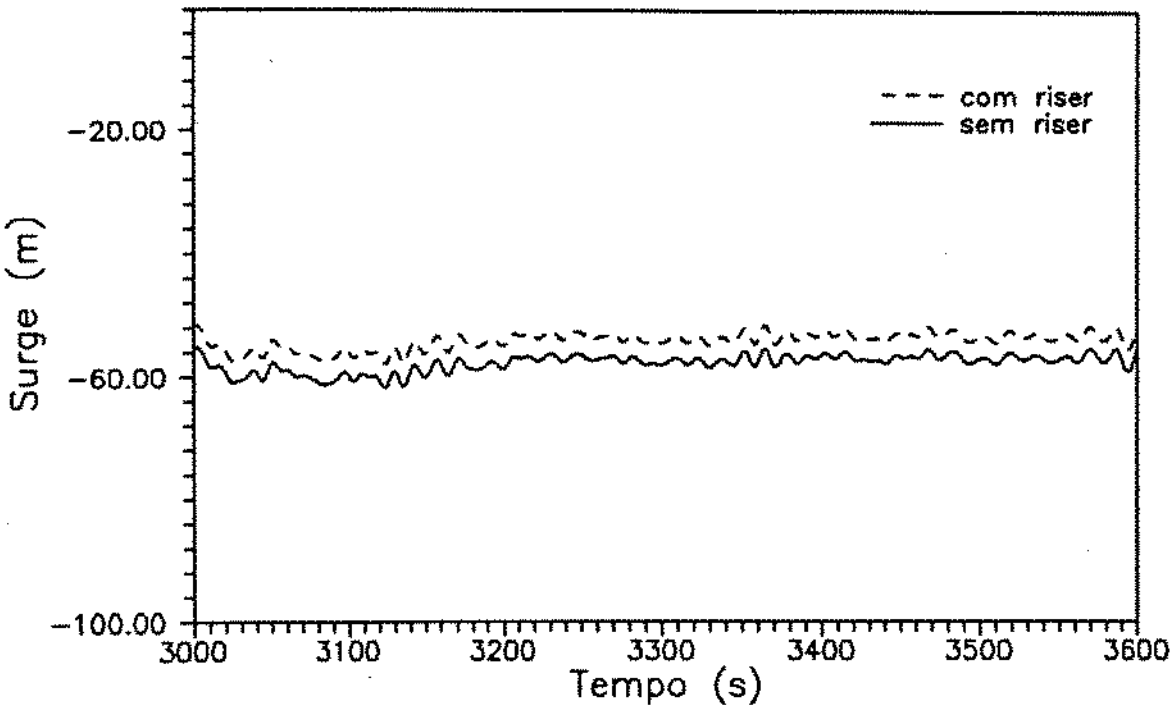


Figura 3.47: Movimentos de surge e sway para plataforma "B" com e sem o conjunto de risers

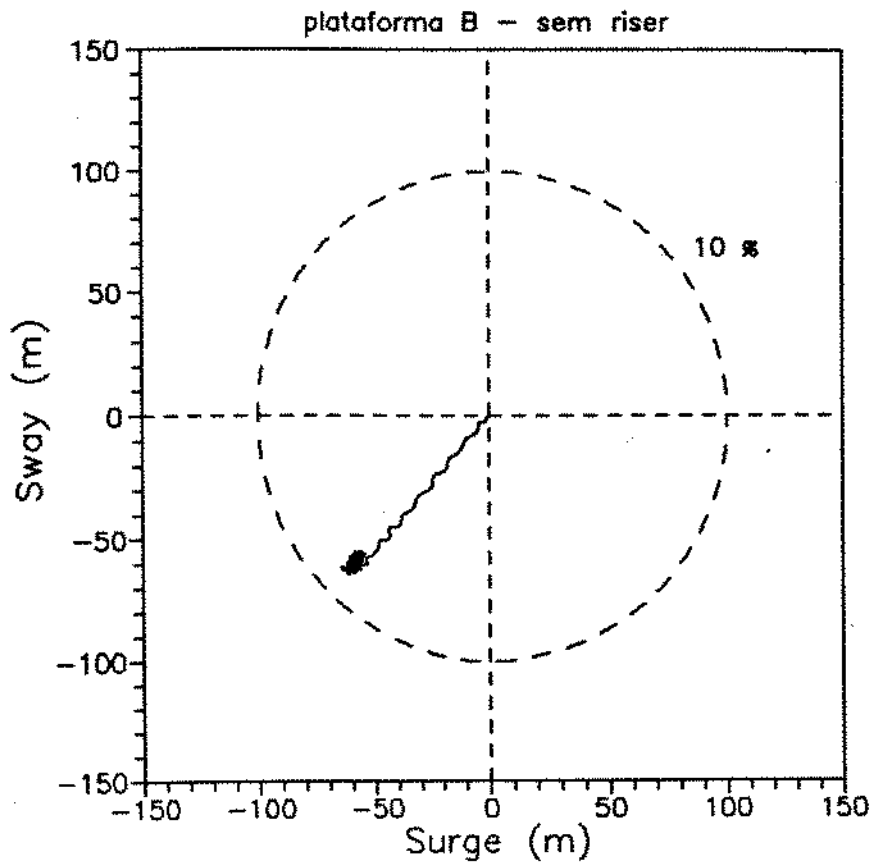


Figura 3.48: Deslocamento planar da plataforma "B" e o limite de 10 % da lâmina d'agua

4 ANÁLISE DO SISTEMA DE ANCORAGEM ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO DOS MOVIMEN- TOS NO DOMÍNIO DO TEMPO

4.1 CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS DE ANCORAGEM

O sistema de ancoragem de uma plataforma semi-submersível é, geralmente, projetado de forma a satisfazer os seguintes critérios, conforme a norma API - RP - 2P (1981):

- critério operacional - a plataforma está a uma distância suficientemente próxima da cabeça do poço de forma a permitir a realização das operações de perfuração . Esta distância varia entre 5% e 6% da lâmina d'água e a tensão máxima da linha mais solicitada deve ser $1/3$ da tensão de ruptura.
- critério não-operacional - a plataforma está a uma distância da cabeça do poço de forma que as operações de perfuração tenham sido interrompidas, mas com o riser ainda conectado ao BOP. Nesta condição a deriva da plataforma deve ser de até 10% da lâmina d'água e a tensão máxima da linha mais solicitada deve ser metade da tensão de ruptura.
- critério máximo - para esta condição o riser deve ser desconectado e a deriva da plataforma pode ser qualquer. A tensão máxima deve ser a metade da tensão de ruptura e existe a possibilidade do manuseio das linhas de ancoragem.

Desta forma dadas as condições ambientais as quais a semi-submersível está

sujeita deve-se determinar as características das linhas de ancoragem de modo a satisfazer tais critérios.

Sendo a configuração das linhas de ancoragem da plataforma "A" apresentada na Figura 3.3 para 1000 m de lâmina d'água e para os dados ambientais da Tabela 4.2 escolheu-se linhas com as características da Tabela 4.1.

cabo de aço	
diâmetro	96 mm
peso linear na água	322.6 N/m
tensão de ruptura	5736.5 KN
tensão inicial	1225.7 KN

Tabela 4.1: Características das linhas

A Figura 4.1 apresenta a curva esforço por deslocamento para uma linha do sistema de ancoragem.

condição	vento		correnteza		onda	
	veloc. (m/s)	dir. (graus)	veloc. (m/s)	dir. (graus)	$H_{1/3}$ (m)	T (s)
anual	20.2	90	0.86	90	5.1	8.5
centenária	31.3	90	1.56	90	7.6	10.1

Tabela 4.2: Condições ambientais

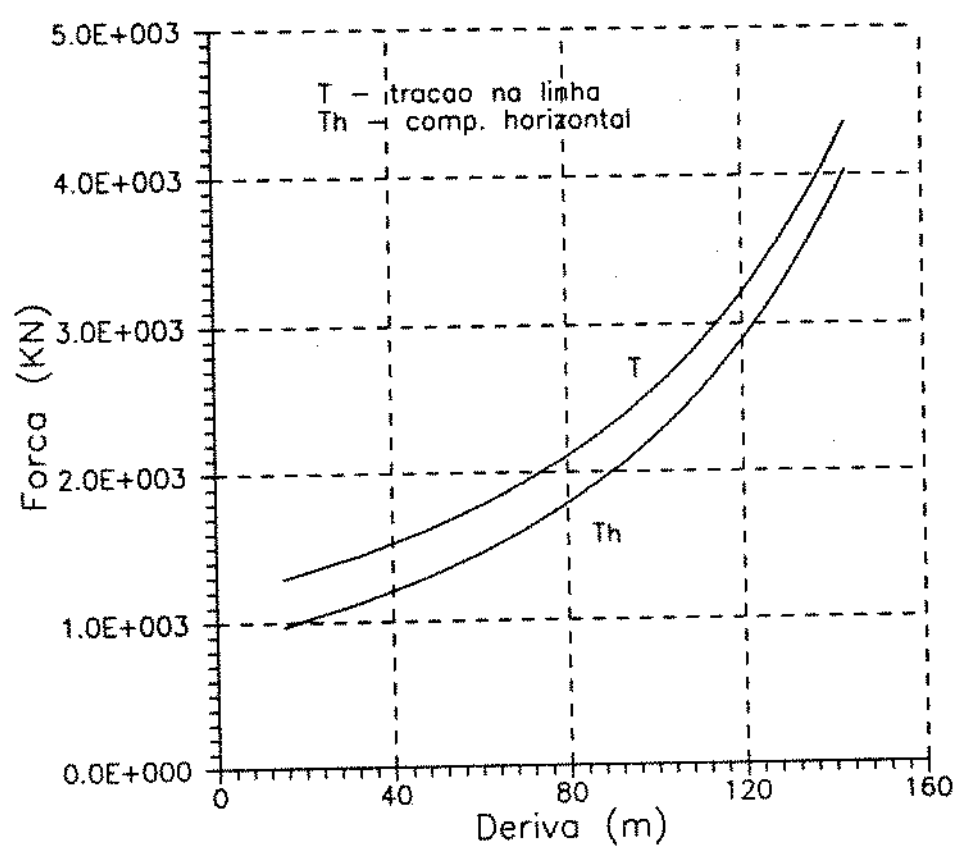


Figura 4.1: Curva dos esforços em uma linha de ancoragem em função do deslocamento da plataforma

4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA CONDIÇÃO CENTENÁRIA

A Figura 4.2 mostra os movimentos da plataforma "A" para a condição centenária e a Tabela 4.3 resume os resultados obtidos a partir da análise estatística dos históricos dos movimentos. No capítulo anterior a Figura 3.41 e a Tabela 3.12 apresentaram os resultados dos movimentos de sway e roll para a condição anual.

sway		roll	
medio (m)	110.247	medio (rd)	-0.0003
max. (m)	118.910	max. (rd)	0.1732
min. (m)	101.490	min. (rd)	-0.1819
ampl. média (m)	3.839	ampl. média (rd)	0.1283
alt. signif. (m)	13.188	alt. signif. (rd)	0.4714
período (s)	49.7	período (s)	34.3

Tabela 4.3: Resultados dos movimentos de sway e roll para condição centenária

Além dos movimentos de sway e roll para a plataforma "A" foi analisado, também, o comportamento dos esforços ao longo do tempo para a linha 2 do sistema de ancoragem. Esta linha foi escolhida por ser juntamente com a linha 3 uma das mais solicitadas para os esforços ambientais incidindo a 90 graus. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.4 e as Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os espectros da força na linha 2 para as condições anual e centenária.

parâmetro	anual	centenária
medio (KN)	1587	2578
max. (KN)	1641	2786
min. (KN)	1548	2391
ampl. média (KN)	19.4	96.5
alt. signif. (KN)	63.6	155.4
período (s)	39.4	46.1

Tabela 4.4: Esforços na linha 2

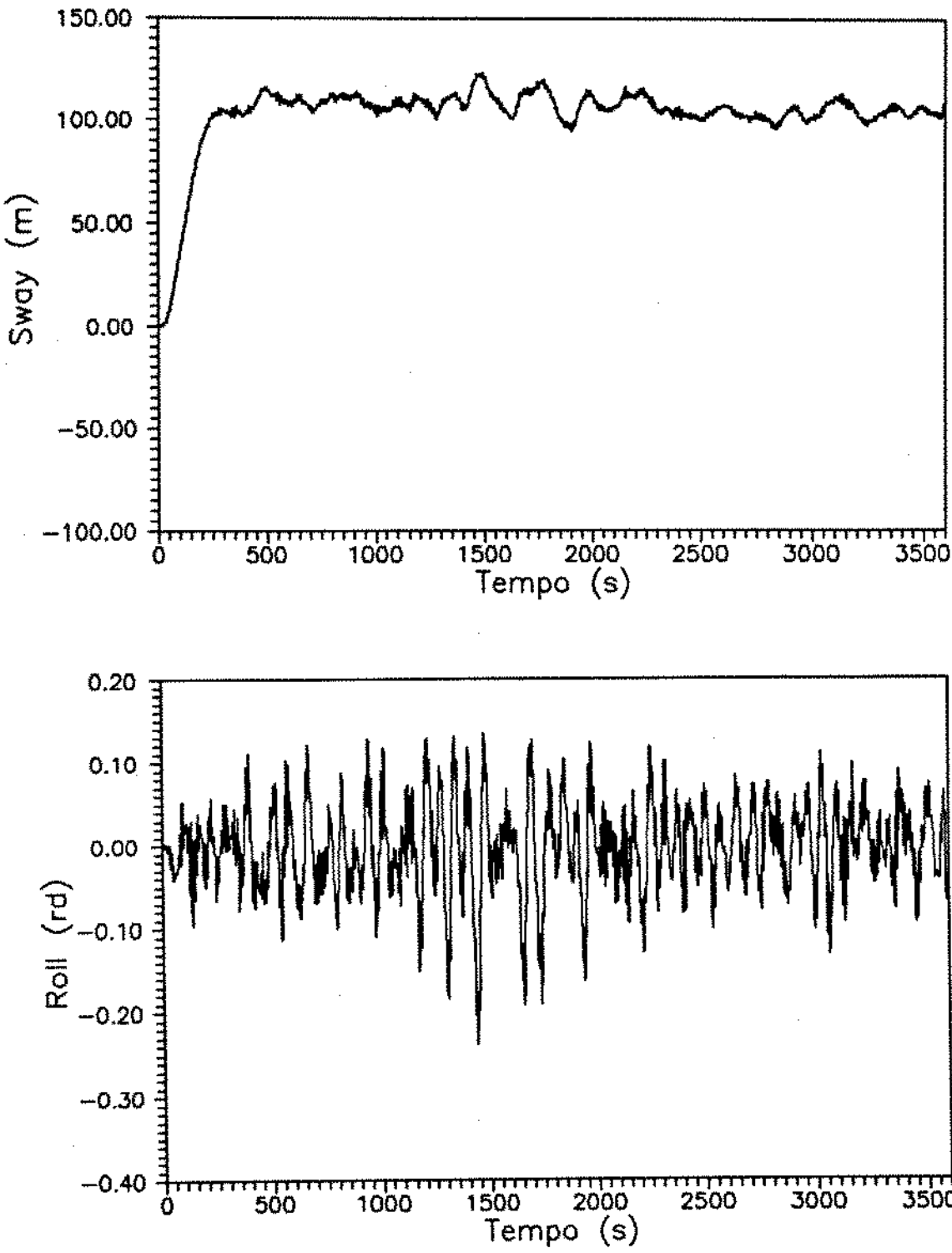


Figura 4.2: Movimentos de sway e roll na condição centenária para plataforma "A"

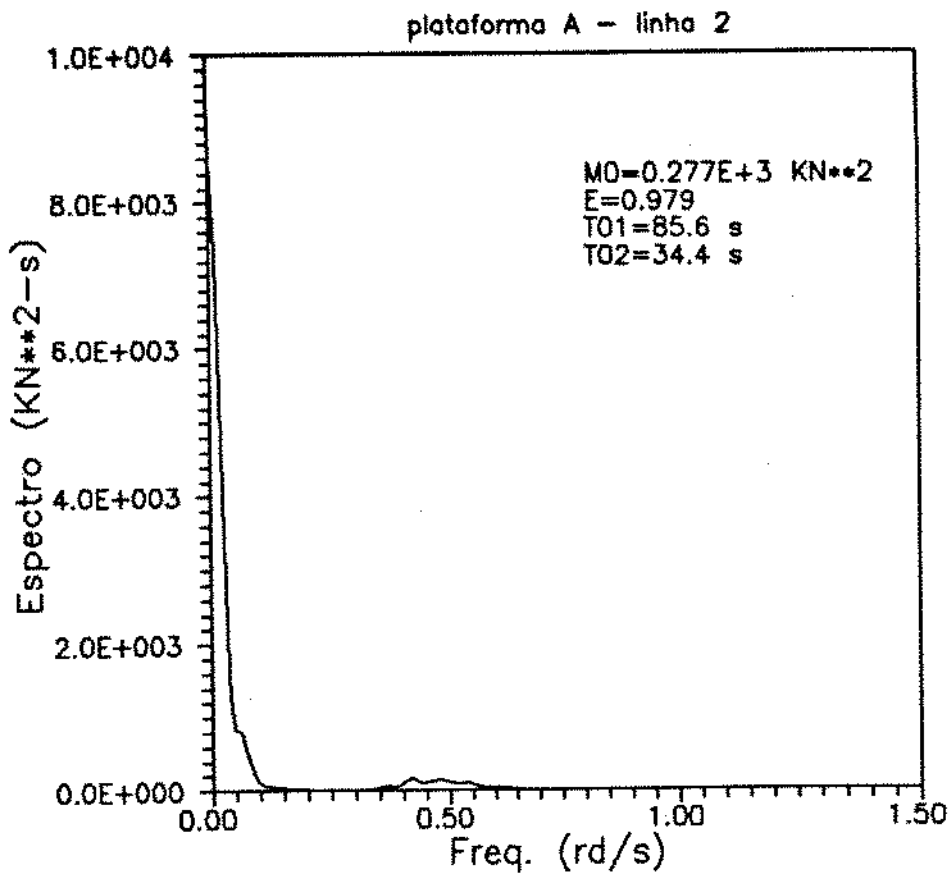


Figura 4.3: Espectro da força na linha 2 para a condição anual

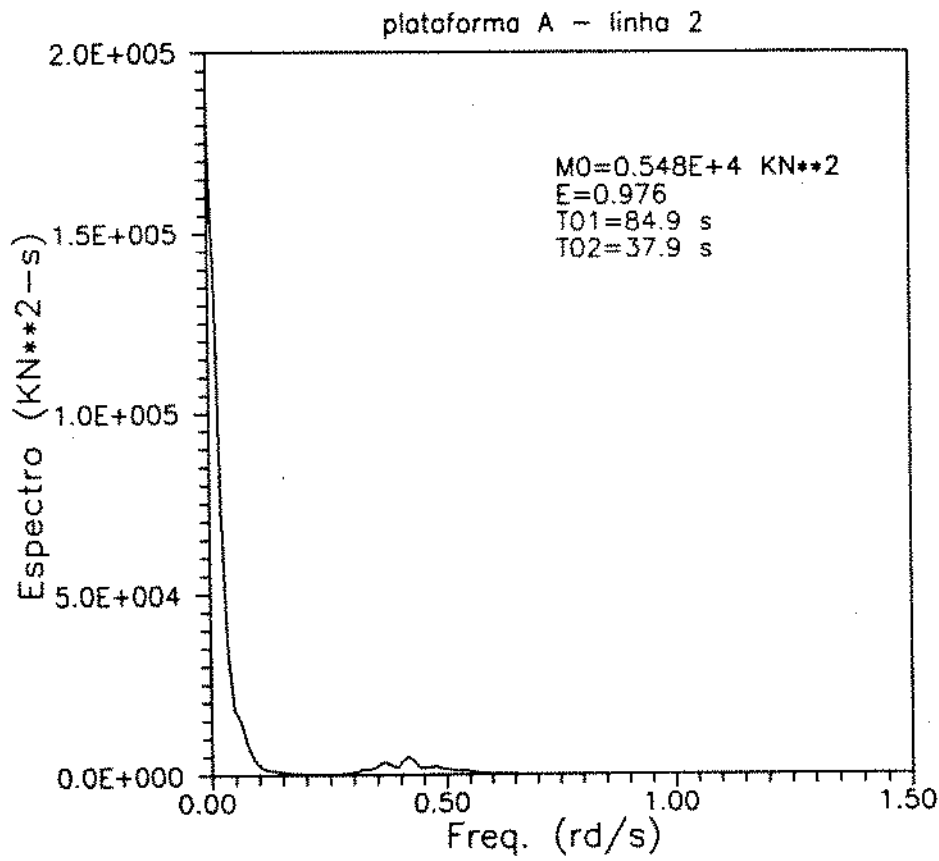


Figura 4.4: Espectro da força na linha 2 para a condição centenária

4.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO QUANDO OCORRE A RUPTURA DE UMA LINHA DE ANCORAGEM

A Figura 4.5 apresenta os movimentos de surge e sway da plataforma "A" sujeita a condição centenária quando no instante 2400 s ocorre a ruptura da linha 2 do sistema de ancoragem. A Figura 4.7 mostra o deslocamento planar da plataforma e a Figura 4.6 apresenta o movimento de yaw da mesma. Na Tabela 4.5 são mostrados os resultados obtidos da análise estatística dos movimentos de surge e sway realizada entre o intervalo de tempo 2400 s a 5400 s.

parâmetro	surge	sway
medio (m)	-33.871	155.723
max. (m)	0.0	165.370
min. (m)	-40.170	102.820
ampl. média (m)	2.89 9	4.264
alt. signif. (m)	10.872	15.644
período (s)	275.8	53.9

Tabela 4.5: Resultados dos movimentos após avaria da linha 2

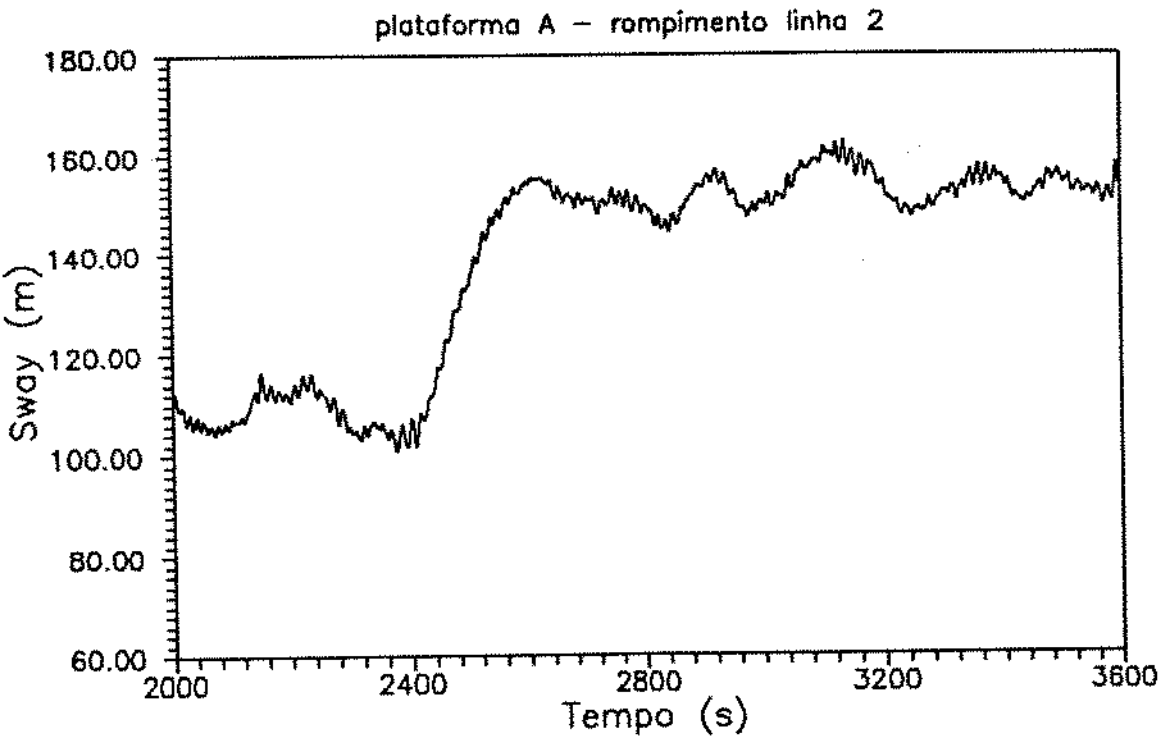
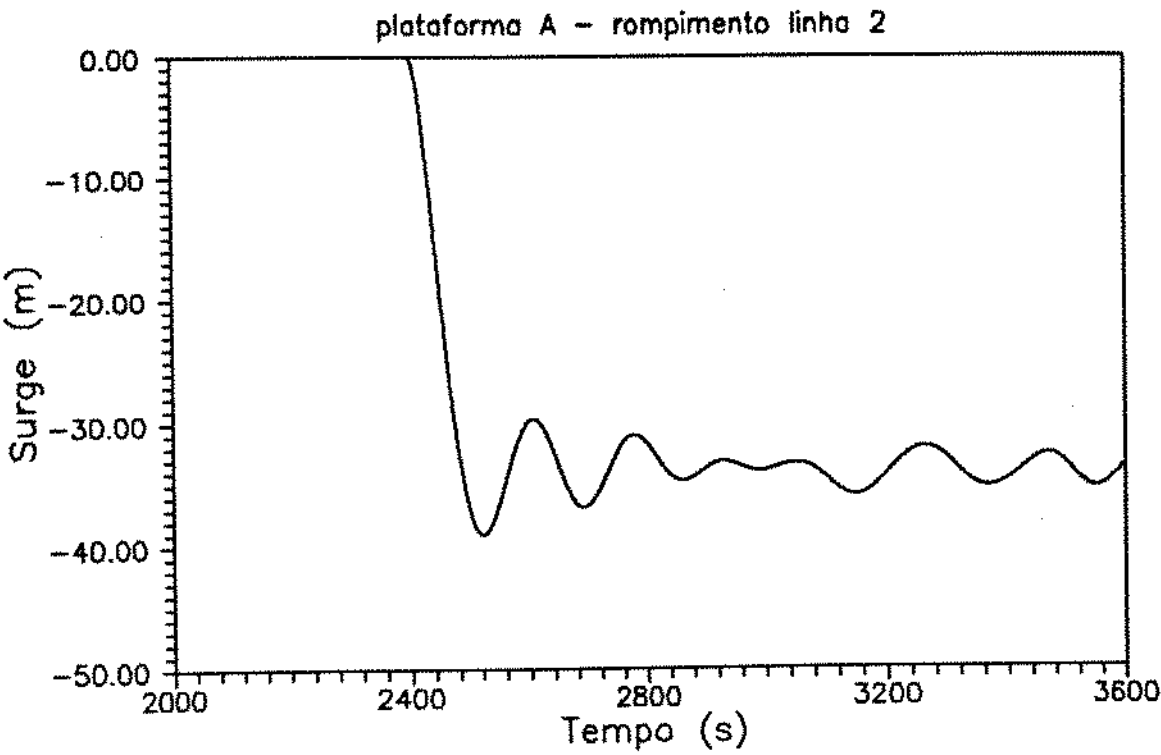


Figura 4.5: Movimentos da plataforma "A" quando ocorre a ruptura da linha2

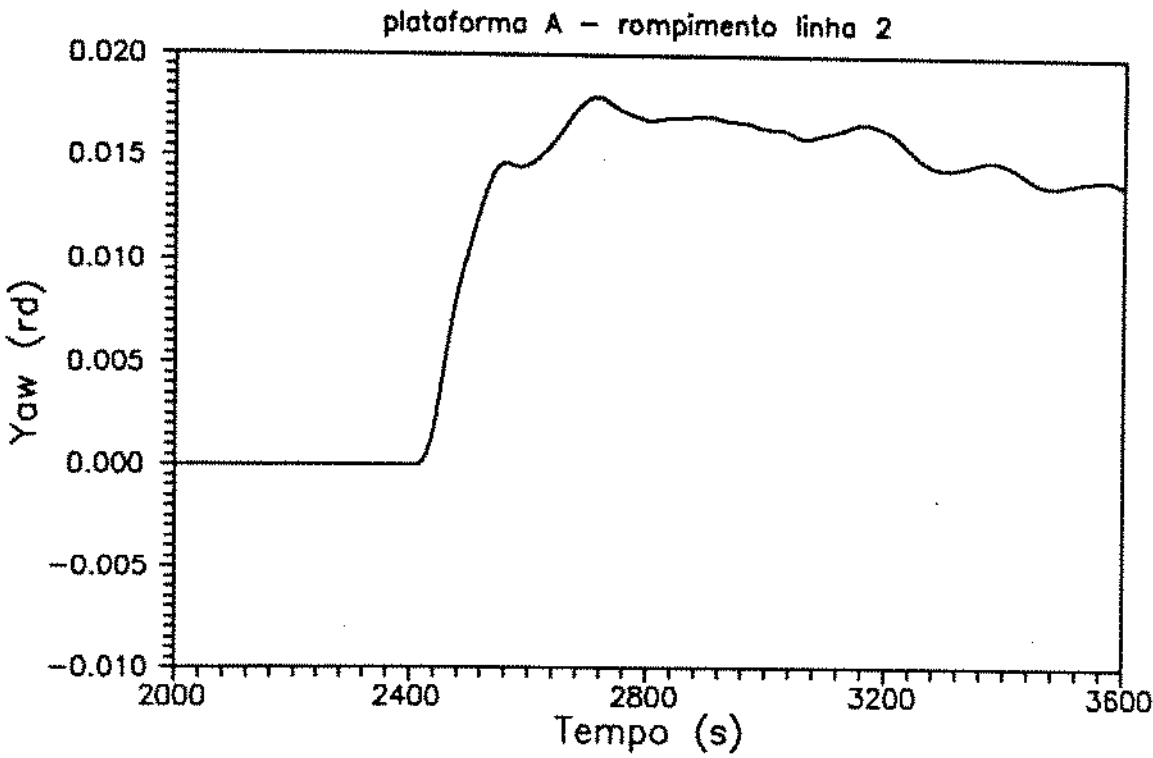


Figura 4.6: Movimento de yaw da plataforma "A" quando ocorre a ruptura da linha2

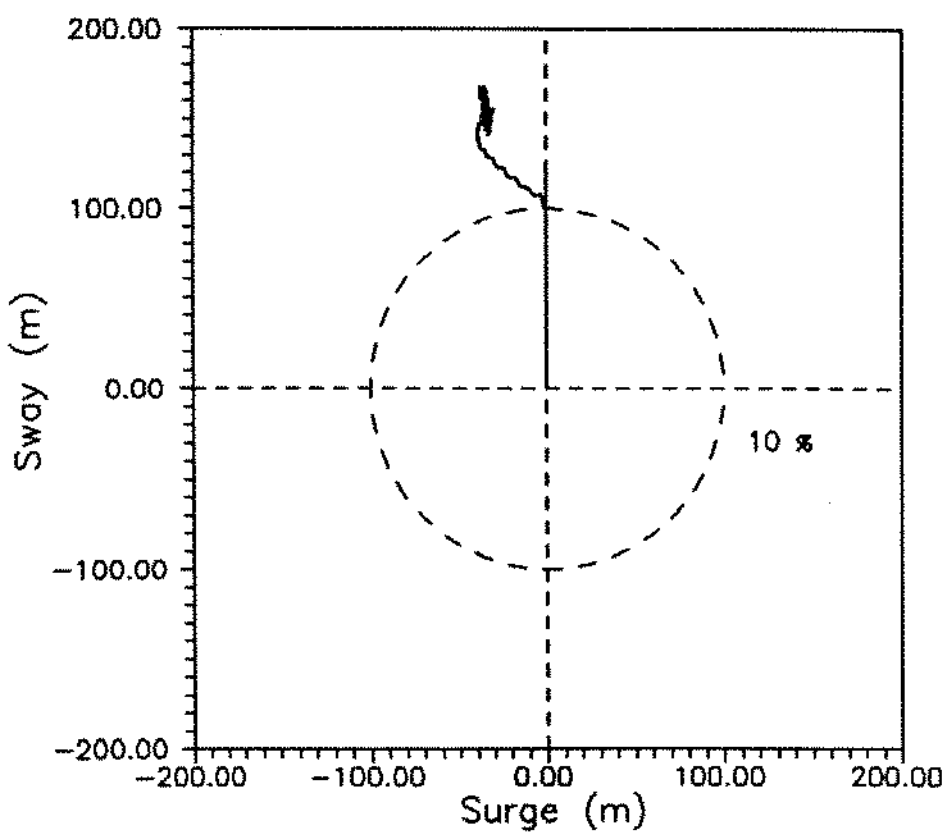


Figura 4.7: Deslocamento planar quando ocorre ruptura da linha 2

4.4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO QUANDO OCORRE ALTERAÇÃO NAS CONDIÇÕES DE VENTO

Na Figura 4.8 são apresentados os movimentos de surge e sway da plataforma "A" quando ocorre uma mudança repentina na direção e intensidade do vento. Inicialmente a plataforma estava sujeita a condição anual com vento incidindo a 90 graus e com velocidade de 20.2 m/s quando no instante 2400 s o vento passa a incidir a 45 graus e com velocidade de 37 m/s. A Tabela 4.6 mostra os resultados da análise estatística dos movimentos para 3000 s após a alteração das condições de vento. A Figura 4.10 apresenta o deslocamento planar e a Figura 4.9 é mostrado o movimento de yaw para esta condição

parâmetro	surge	sway
medio (m)	25.945	55.935
max. (m)	43.482	65.308
min. (m)	0.0	40.799
ampl. média (m)	8.394	4.887
alt. signif. (m)	32.028	23.334
período (s)	249.3	207.3

Tabela 4.6: Resultados dos movimentos após mudança nas condições de vento.

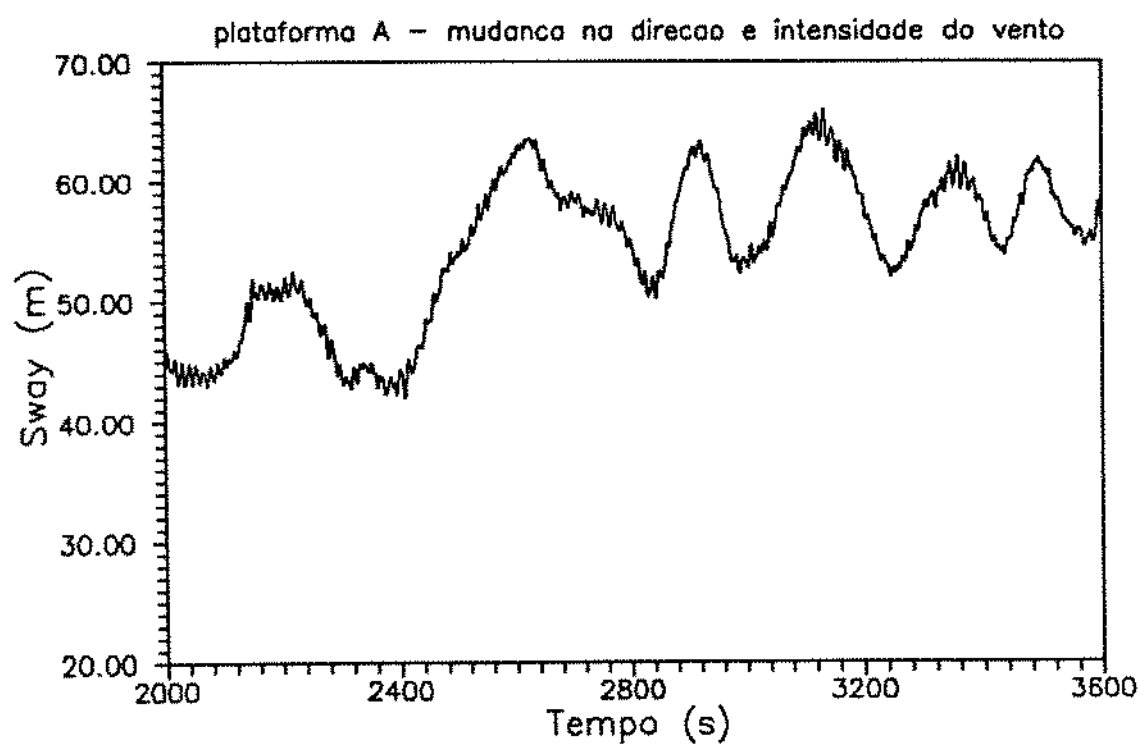
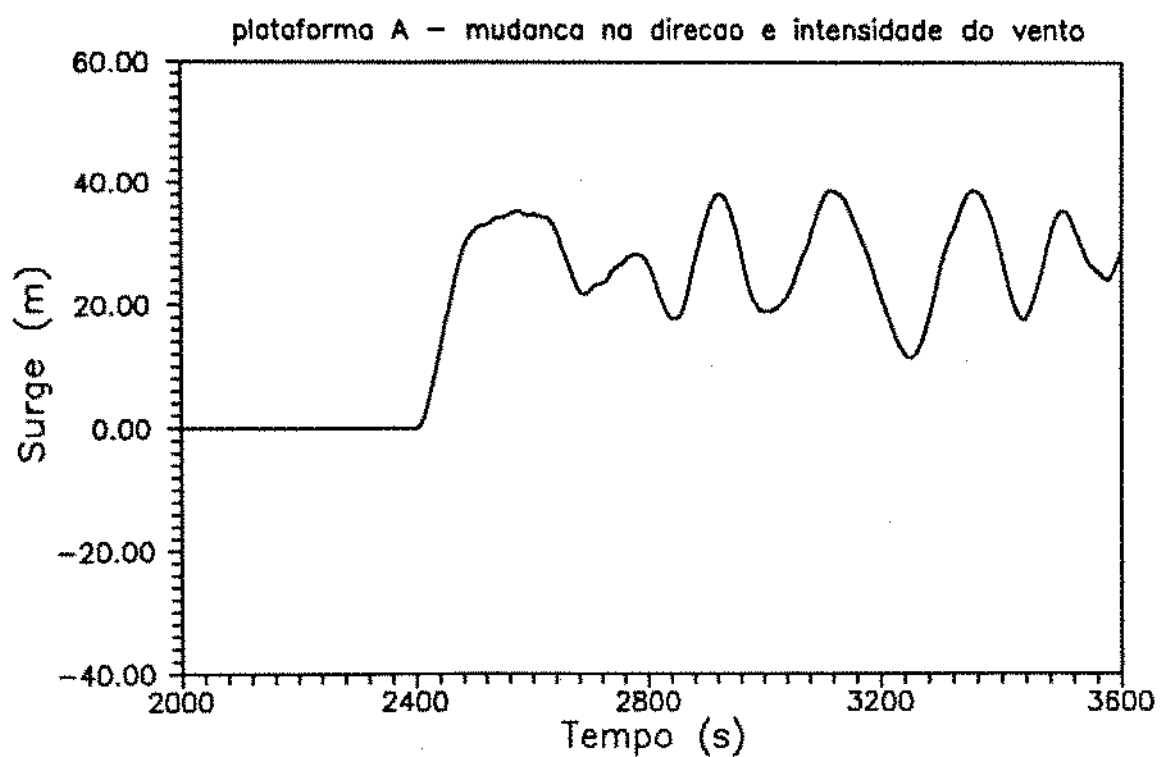


Figura 4.8: Movimentos de surge e sway da plataforma "A" quando ocorre mudança na direção e intensidade do vento

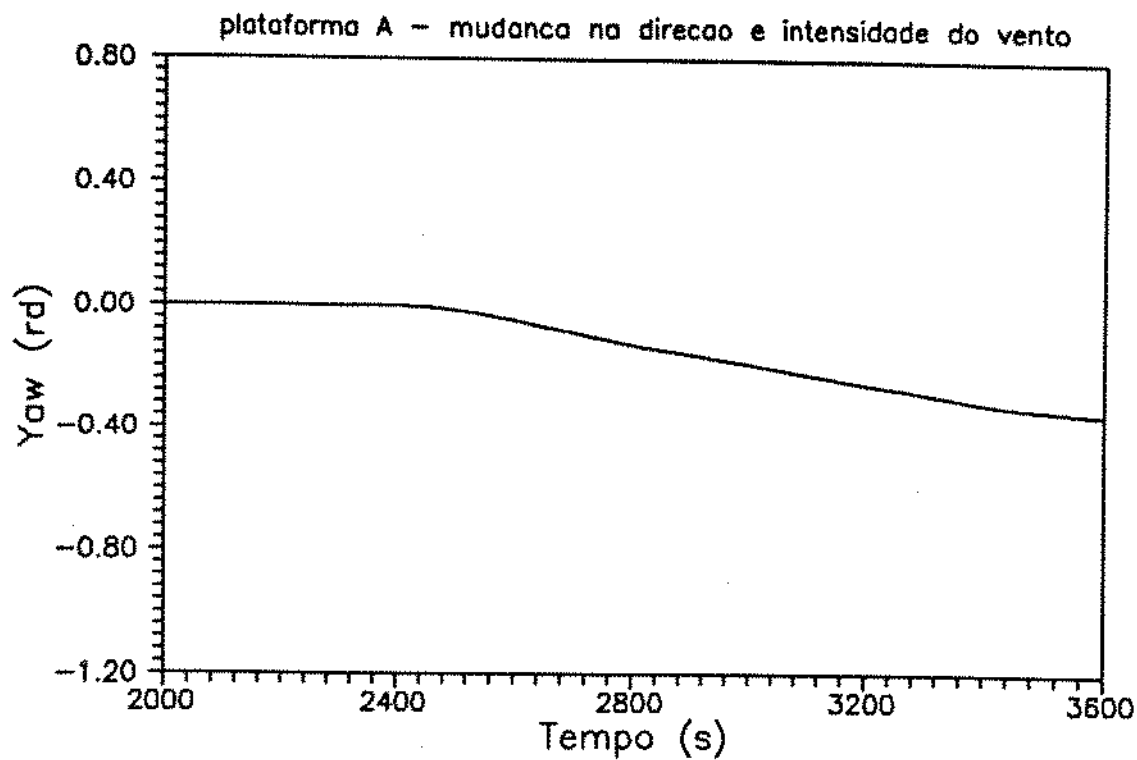


Figura 4.9: Movimento de yaw da plataforma "A" quando ocorre mudança na direção e intensidade do vento

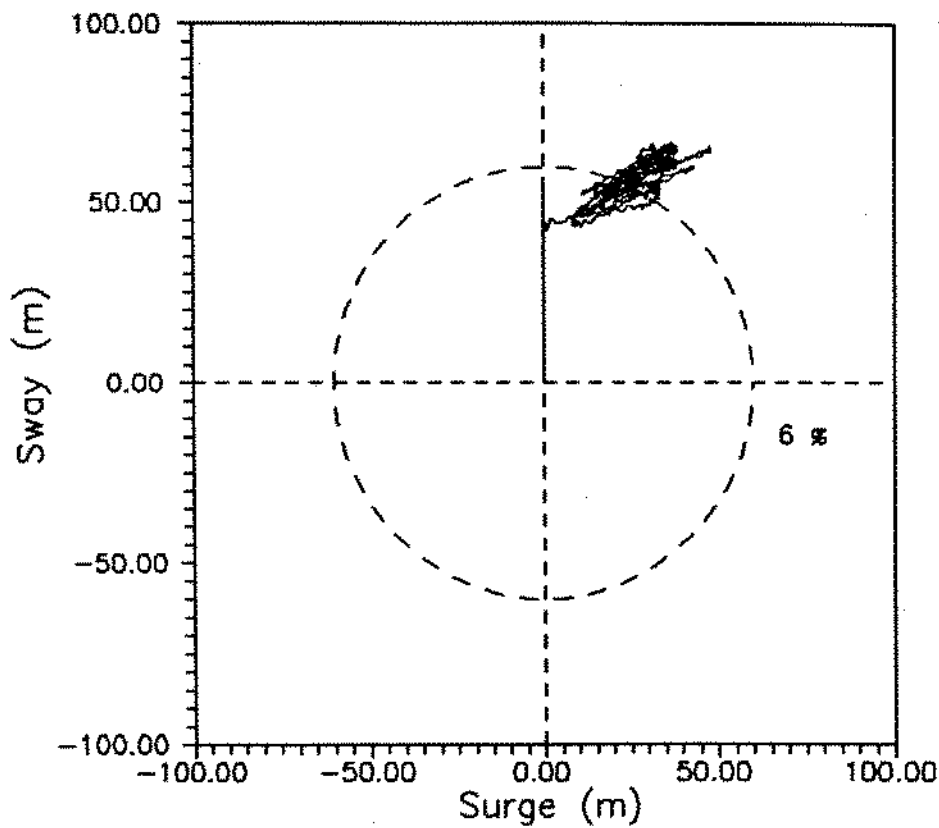


Figura 4.10: Deslocamento planar quando ocorre alteração nas condições de vento

4.5 VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS ESFORÇOS AMBIENTAIS NO SISTEMA DE ANCORAGEM

Os principais parâmetros utilizados na análise do sistema de ancoragem de uma semi-submersível são o esforço na linha mais solicitada e o deslocamento da plataforma em relação à cabeça do poço. Afim de estudar o comportamento de tais parâmetros, simulações dos movimentos para uma plataforma semi-submersível sujeita a várias condições de vento irregular, onda irregular e correnteza constante foram feitas. Os resultados assim obtidos foram analisados estatisticamente de forma a se obter alguns parâmetros estatísticos para a tração na linha e para o deslocamento da semi-submersível relacionados com a velocidade do vento, a velocidade da correnteza, a altura significativa e período médio da onda.

Para realização de tal análise considerou-se a seguinte condição ambiental :

- velocidade do vento 20.2 m/s incidindo a 90 graus;
- velocidade da correnteza 0.86 m/s incidindo a 90 graus;
- onda incidindo a 90 graus com $H_{1/3} = 5.1$ m e $T=8.5$ s.

A partir desta condição variou-se um parâmetro mantendo-se os outros dois constantes de forma a se considerar o efeito de cada esforço ambiental separadamente.

As simulações foram realizadas para a plataforma "A" e a análise dos esforços nas linhas foi feita para a linha 2 e para o movimento de sway que é o movimento de interesse para a determinação do deslocamento da semi-submersível em relação à cabeça do poço para o ângulo de incidência dos esforços ambientais considerado.

Para o movimento de sway e para a tração na linha 2 foram feitas simulações com duração de 5400 s a cada 0.5 s, sendo que os 1800 s iniciais foram desprezados para

se evitar efeitos transitórios. Os históricos dos movimentos de sway e a tração na linha 2 assim obtidos foram analisados estatisticamente para a obtenção do valor médio, valor máximo, valor mínimo, altura significativa e período médio.

Observa-se na Figura 4.11 que o valor do movimento de sway médio, máximo e mínimo em função da velocidade do vento possuem um comportamento aproximadamente quadrático. A Figura 4.12 mostra como variam a altura significativa e o período médio do movimento de sway com a velocidade do vento.

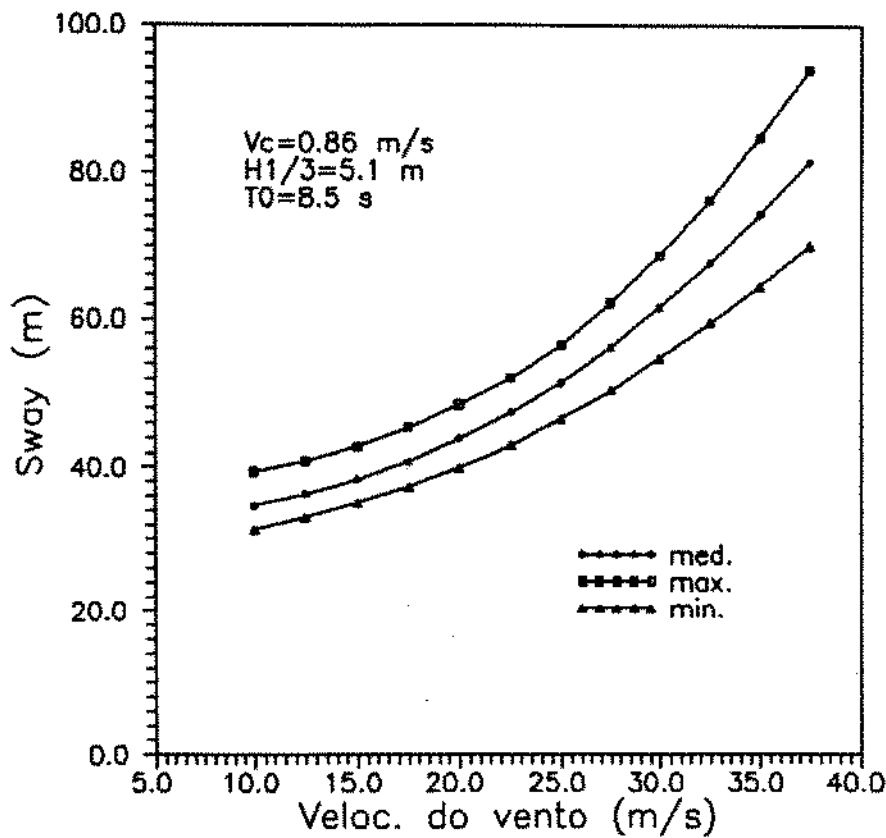


Figura 4.11: Movimento de sway em função da velocidade do vento

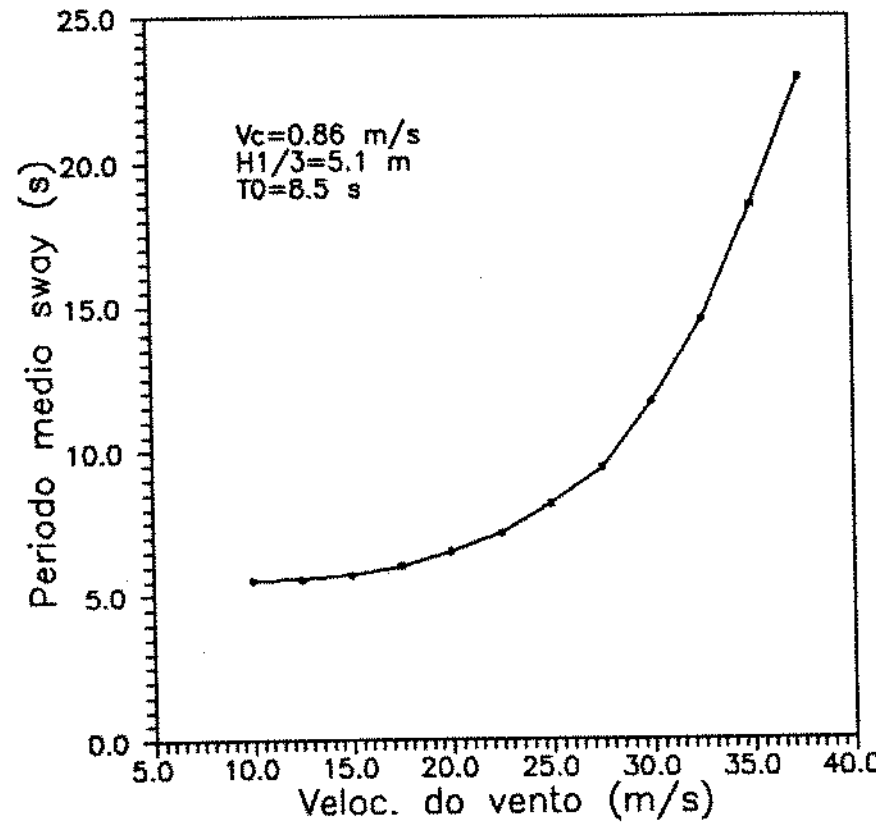
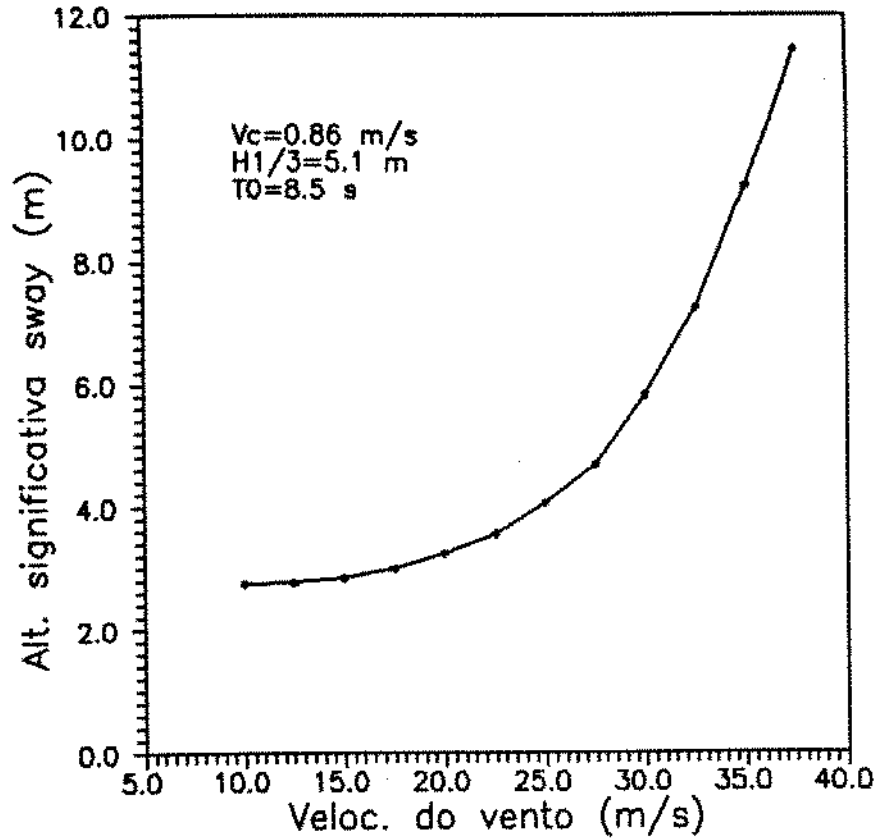


Figura 4.12: Altura significativa e período médio de sway em função da velocidade do vento

Os esforços médio, máximo e mínimo na linha 2 em função da velocidade do vento apresentam a mesma variação quadrática do movimento de sway conforme mostra a Figura 4.13. Na Figura 4.14 é apresentada a variação da altura significativa e do período médio em função da velocidade do vento.

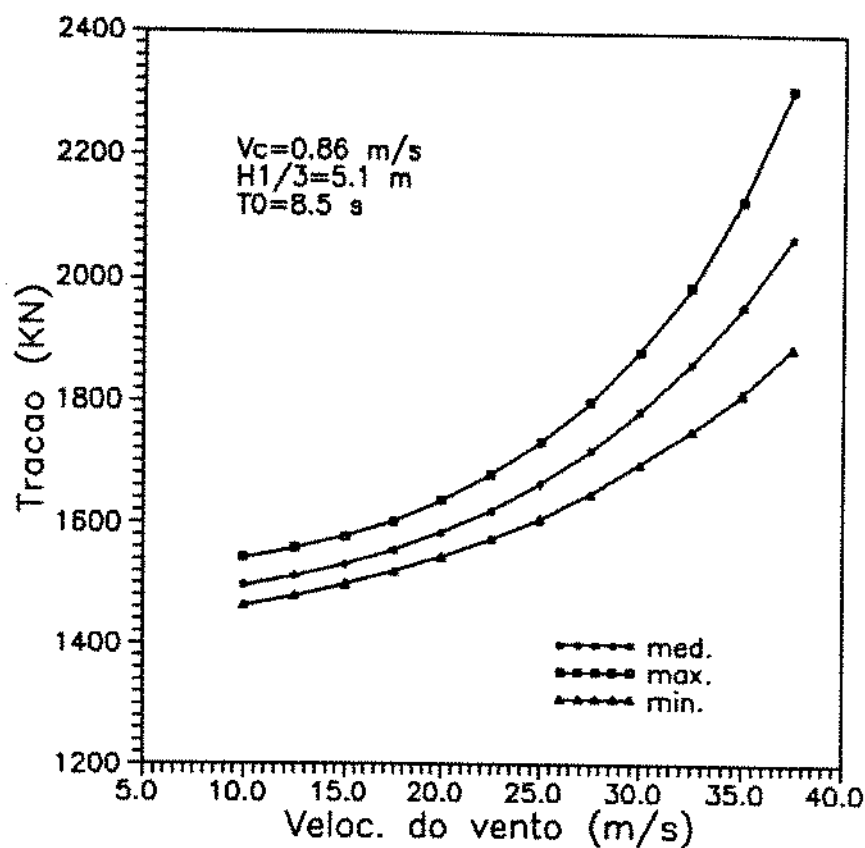


Figura 4.13: Tração na linha 2 em função da velocidade do vento

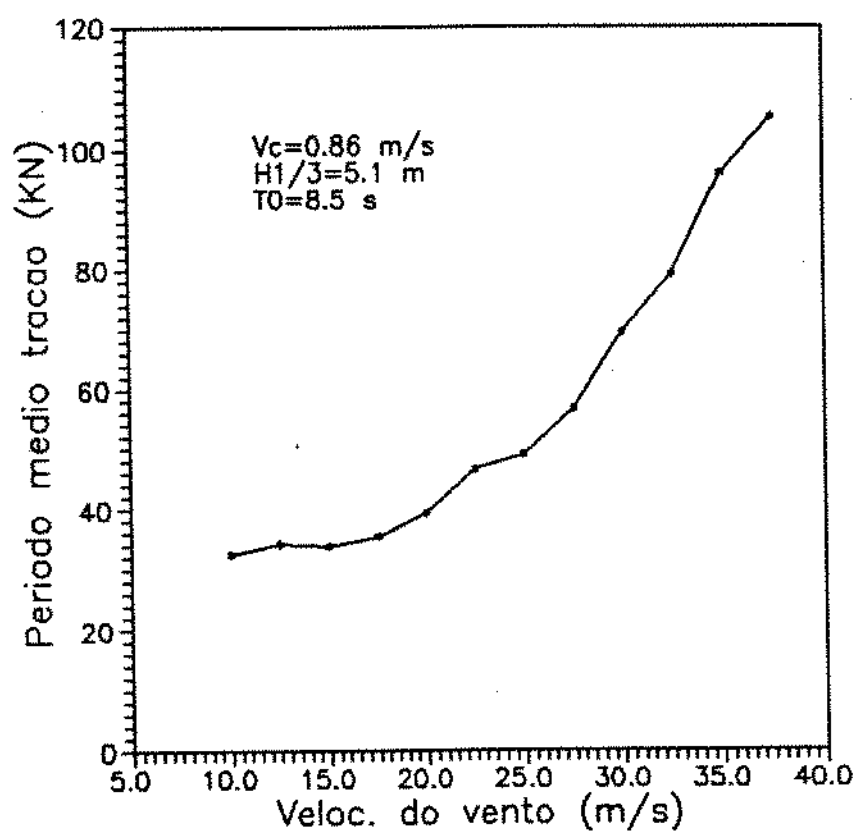
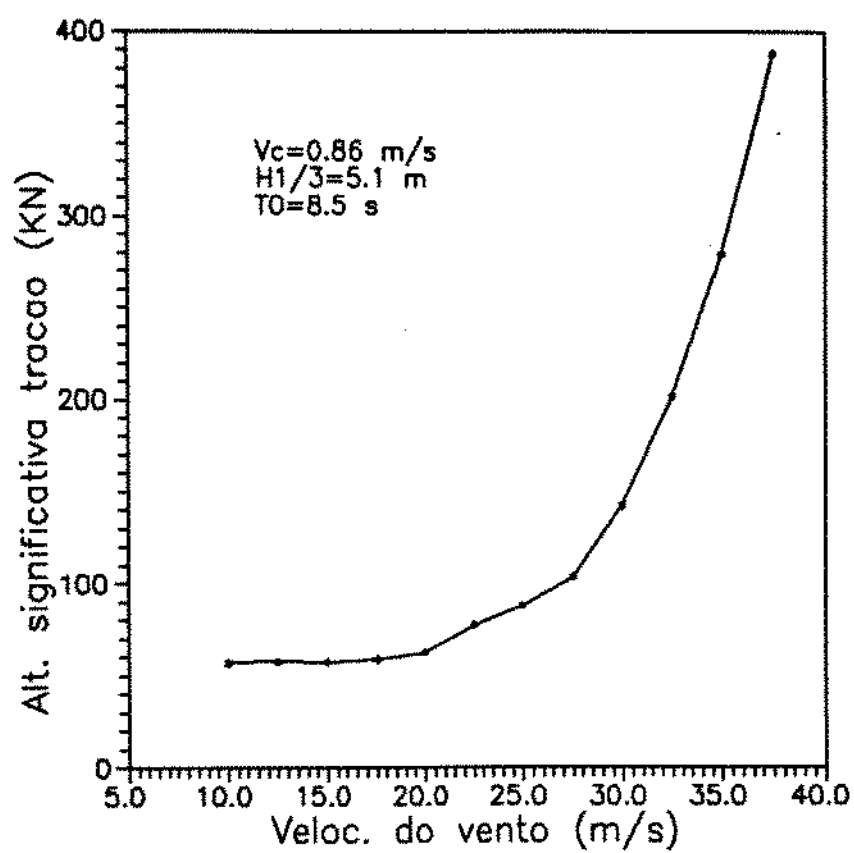


Figura 4.14: Altura significativa e período médio da tração em função da velocidade do vento

O comportamento do movimento de sway médio, máximo e mínimo em função da altura significativa e do período médio da onda são apresentados nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 respectivamente. Observa-se que os valores do movimento de sway médio apresentam um comportamento crescente com a altura significativa da onda. Verifica-se, também, que para um mesmo valor da altura significativa da onda o movimento de sway médio aumenta com a diminuição do período médio da onda. É importante notar que para pequenos valores da altura significativa da onda o movimento de sway médio converge para um valor no qual os efeitos de vento e correnteza são predominantes em relação aos efeitos de onda. Na Figura 4.18 é apresentado o sway médio em função do quadrado da altura significativa e do período médio da onda, onde nota-se uma variação aproximadamente linear.

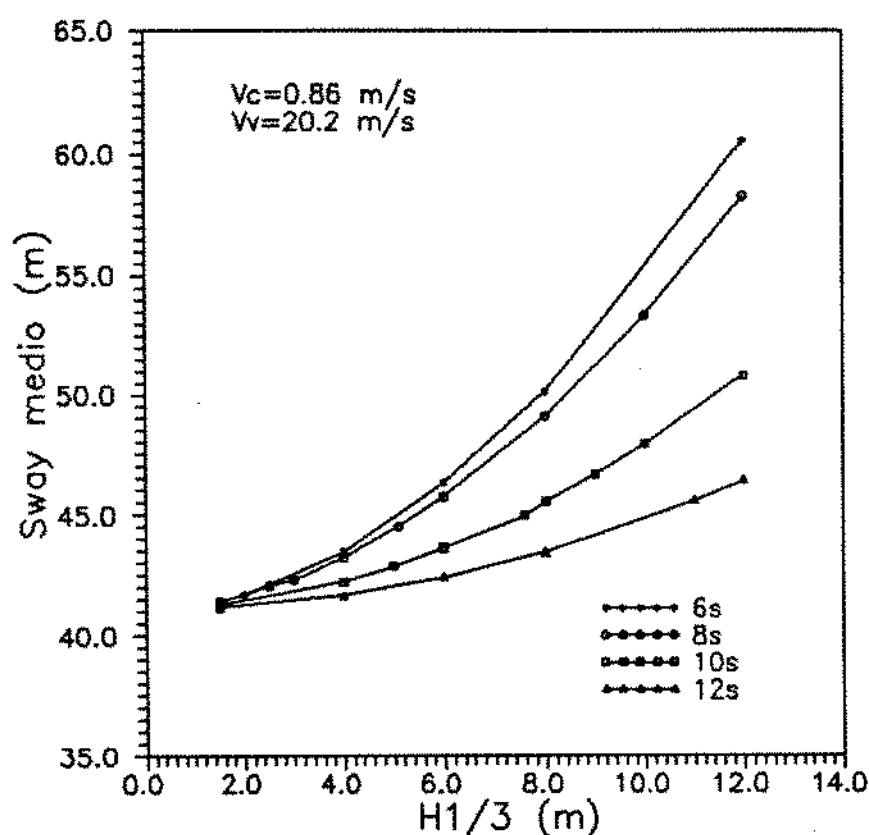


Figura 4.15: Movimento de sway médio em função da altura significativa e do período médio da onda

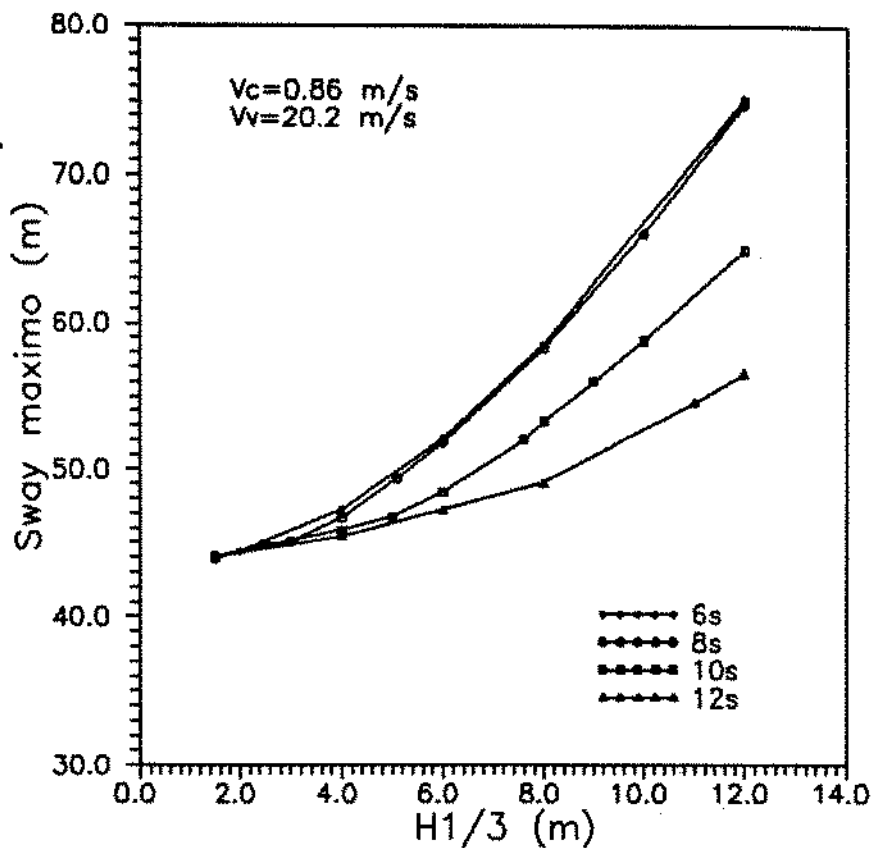


Figura 4.16: Movimento de sway máximo em função da altura significativa e do período médio da onda

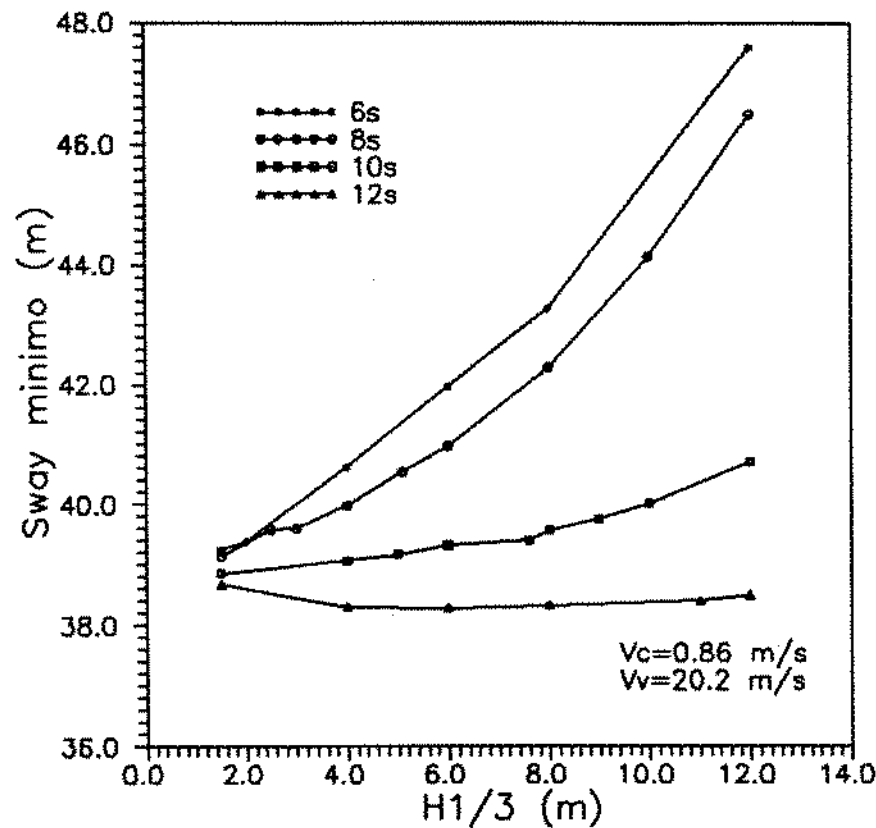


Figura 4.17: Movimento de sway mínimo em função da altura significativa e do período médio da onda

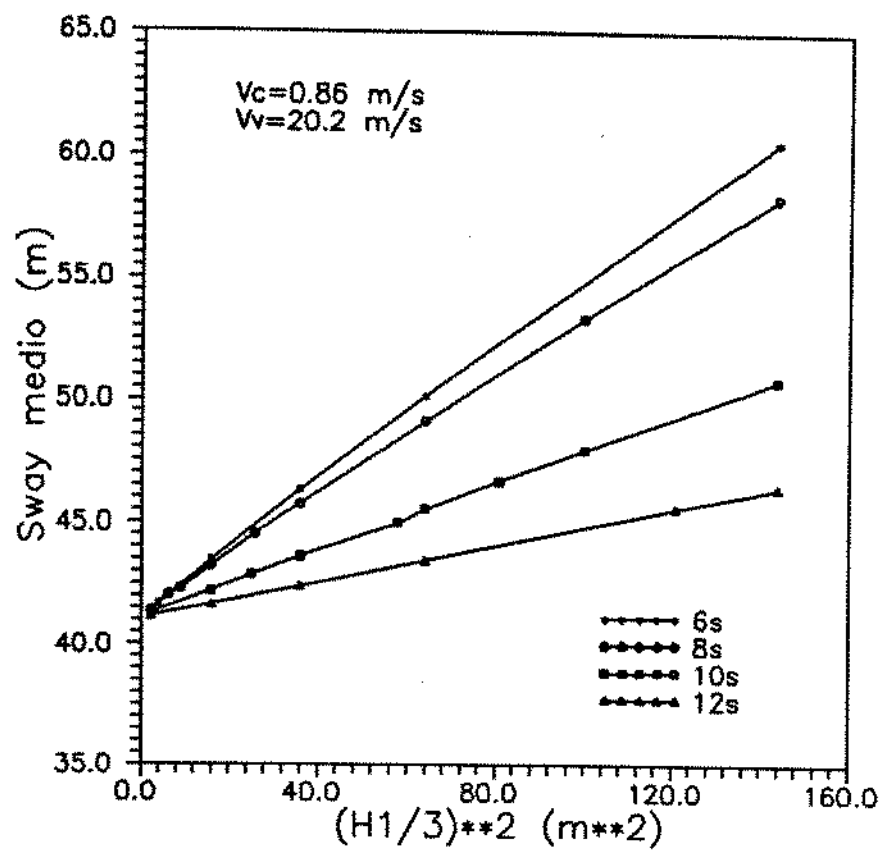


Figura 4.18: Movimento de sway médio em função do quadrado da altura significativa e do período médio da onda

A relação entre a altura significativa e o período médio do movimento de sway em função da altura significativa e do período médio da onda são mostrados na Figura 4.19. Nota-se que ao contrário do movimento de sway médio a altura significativa do movimento de sway apresenta uma variação menor com o período médio da onda concentrando os valores em uma determinada região.

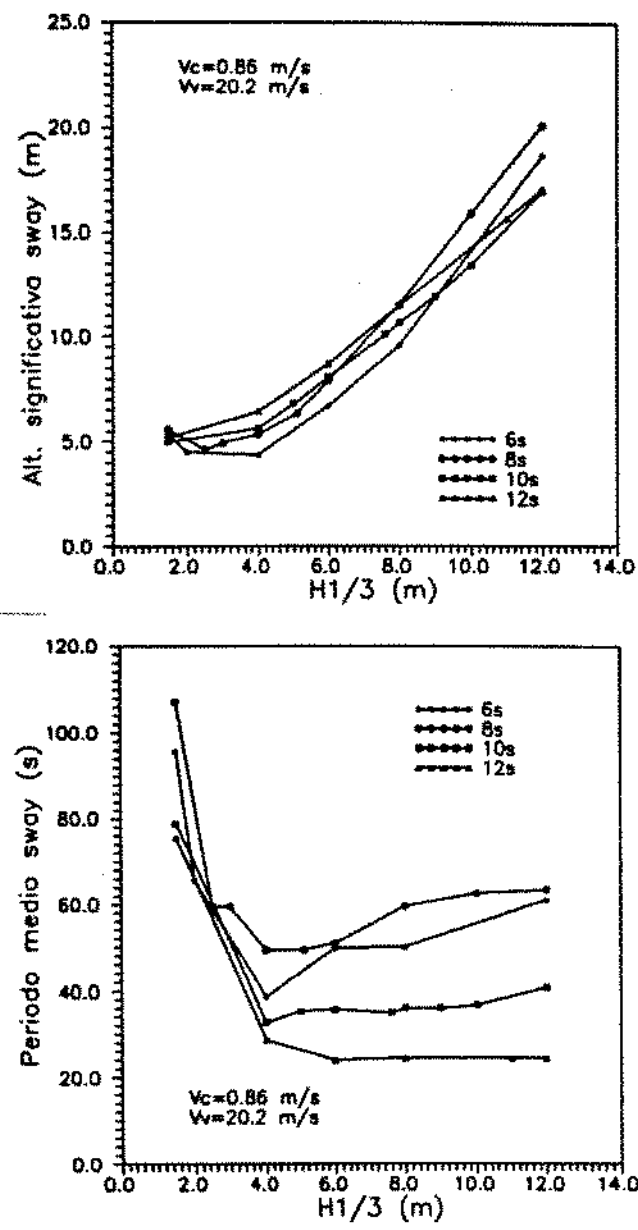


Figura 4.19: Altura significativa e período médio de sway em função da altura significativa e do período médio da onda

Os efeitos da altura significativa e do período médio da onda na tração média, máxima e mínima da linha 2 são representados nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22, assim como na Figura 4.23 são mostrados os efeitos de tais parâmetros na altura significativa e no período médio da tração. Observa-se que para o esforço de tração na linha 2 um comportamento semelhante ao comportamento do movimento de sway em função da altura significativa e do período médio da onda.

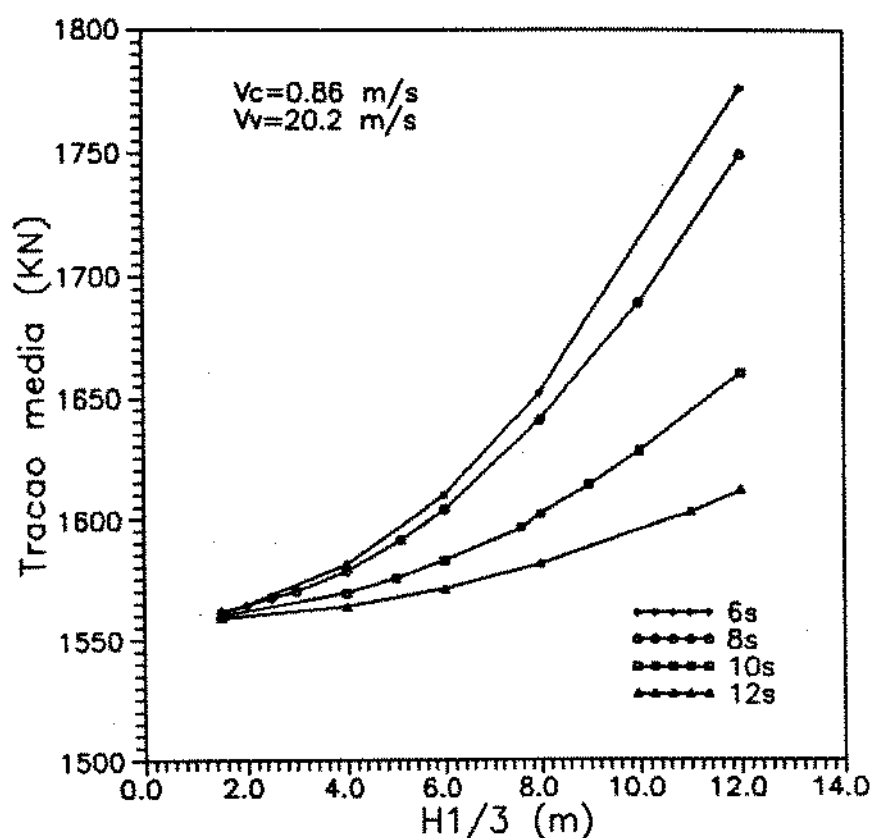


Figura 4.20: Tração média em função da altura significativa e do período médio da onda

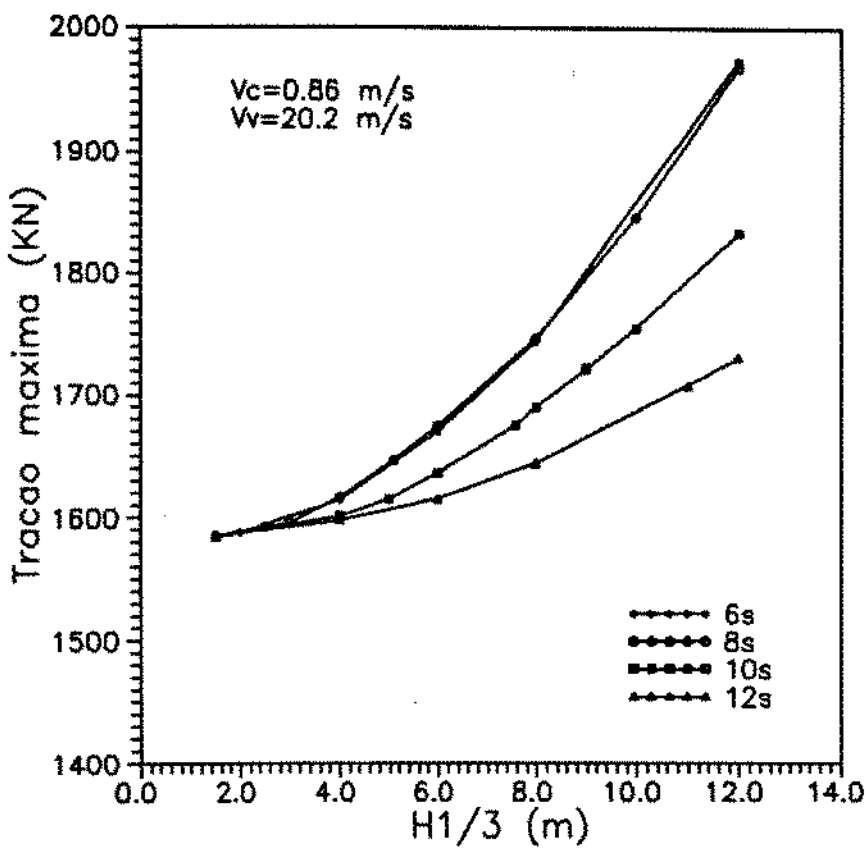


Figura 4.21: Tração máxima em função da altura significativa e do período médio da onda

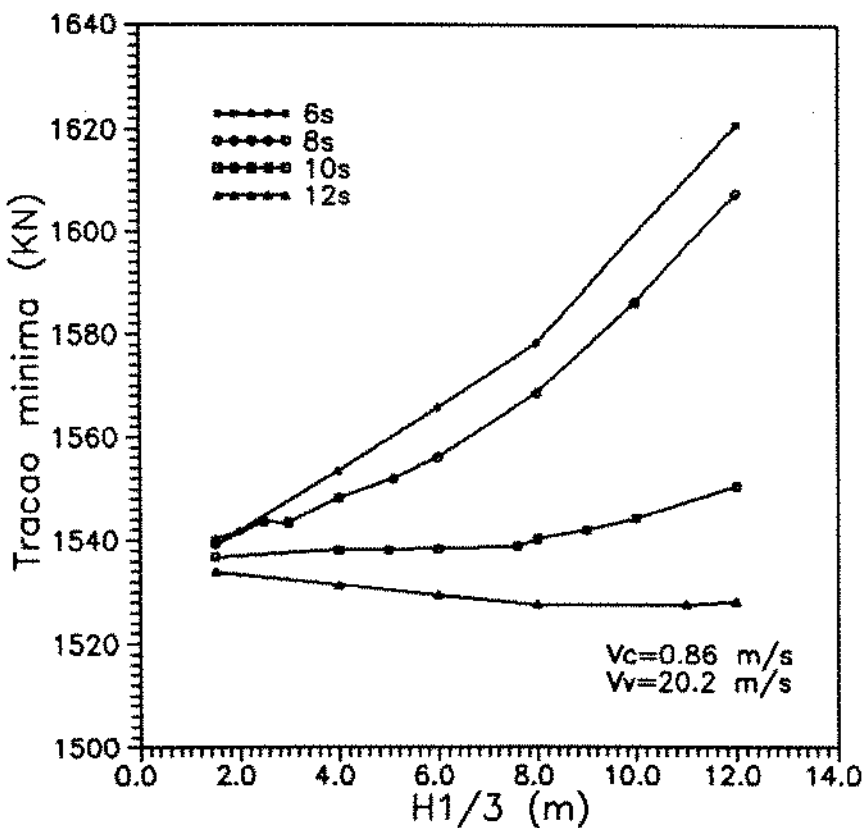


Figura 4.22: Tração mínima em função da altura significativa e do período médio da onda

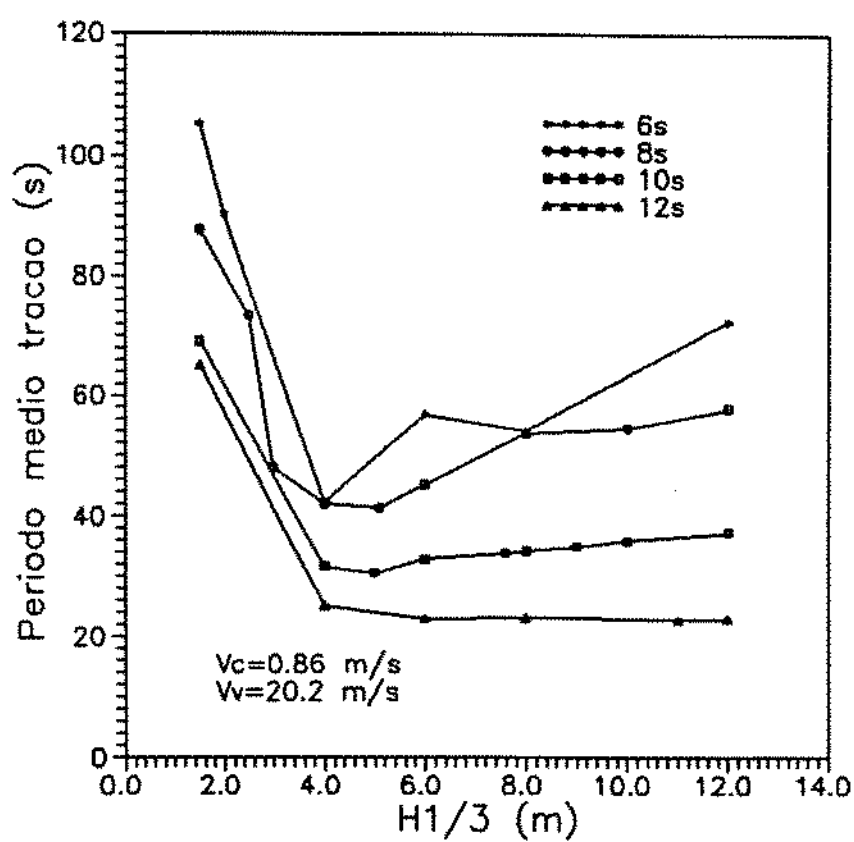
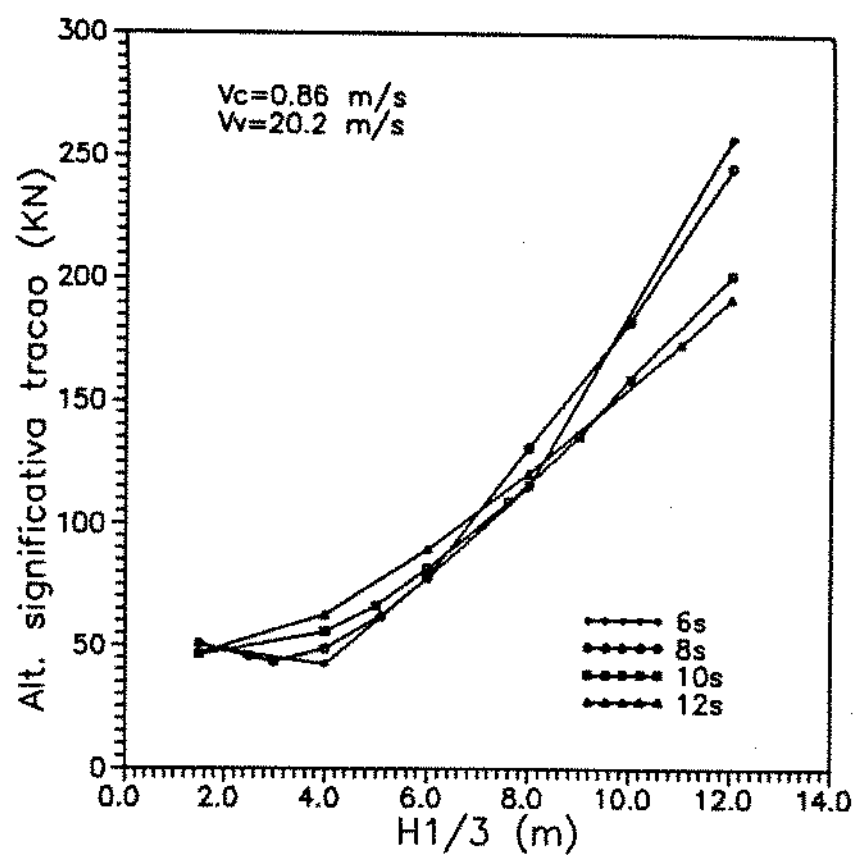


Figura 4.23: Altura significativa e período médio da tração em função da altura significativa e do período médio da onda

A influência da velocidade da correnteza nos movimentos de sway e na tração da linha 2 são apresentados na Figura 4.24. Na Figura 4.25 tem-se o comportamento da altura significativa e do período médio da tração na linha em função da velocidade da correnteza.

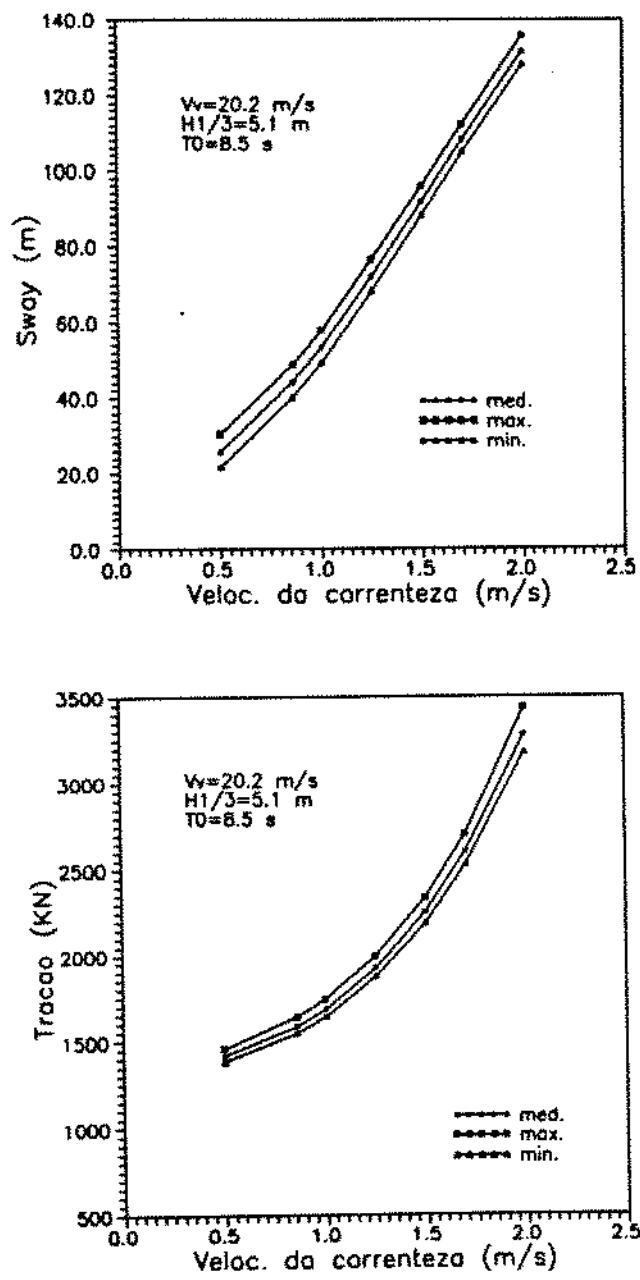


Figura 4.24: Movimento de sway e tração na linha 2 em função da velocidade da correnteza

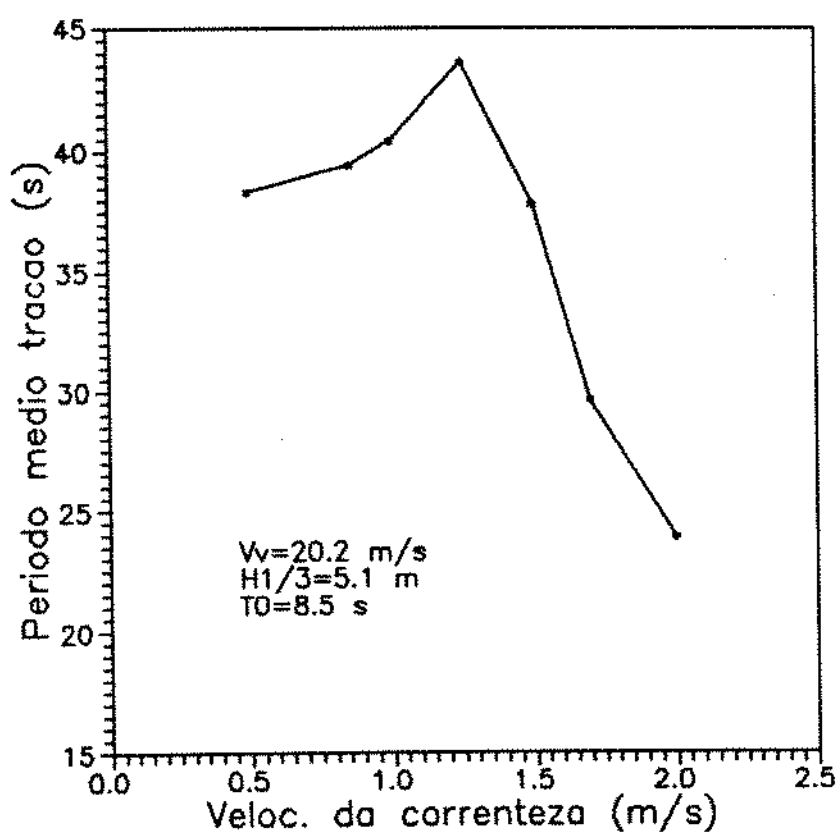
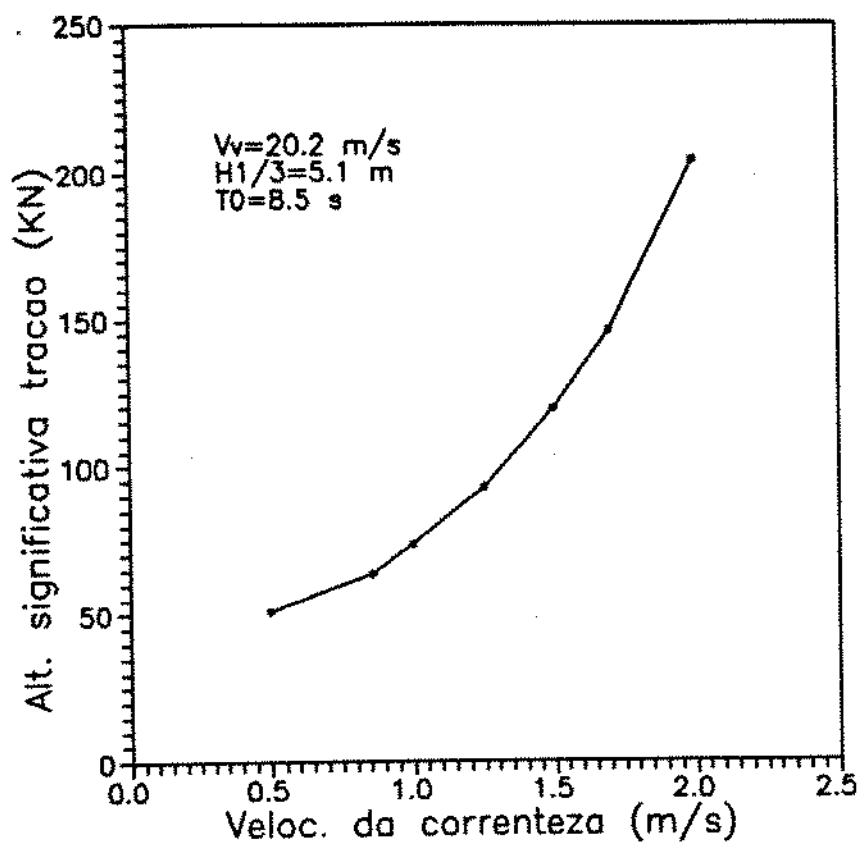


Figura 4.25: Altura significativa e período médio da tração em função da velocidade da correnteza

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

É apresentado um procedimento para o estudo dos movimentos de uma plataforma semi-submersível no domínio do tempo onde são considerados os efeitos não lineares devido ao vento, onda, correnteza, sistema de ancoragem e riser. Assim sendo, a influência dos esforços ambientais e sistema de ancoragem nos movimentos da semi-submersível podem ser avaliadas de forma mais realista permitindo, inclusive estudar o sistema de ancoragem para situações mais críticas, como por exemplo na ruptura de uma das linhas.

As principais conclusões obtidas da realização deste trabalho são :

1. Este procedimento de simulação é uma ferramenta importante para o projeto da operação de unidades flutuantes na prospecção do petróleo.
2. Os movimentos de período longo são resultantes da ação das ondas e do vento, sendo que os esforços de vento provocam movimentos de período médio maior que os movimentos resultantes dos esforços de onda.
3. Através das simulações para várias condições de vento, correnteza e onda verificou-se que o valor médio do movimento de sway (deriva constante) em função da altura significativa da onda para uma dada velocidade de vento e correnteza aumenta com a diminuição do período médio da onda. Já no entanto, os valores significativos do movimento de sway (movimento oscilatório) função da altura significativa da onda apresentam uma pequena variação com o período médio da onda.
4. Analisando os resultados das simulações observou-se que a relação entre a deriva média total e o quadrado da altura significativa da onda para uma dada condição de velocidade do vento e correnteza é aproximadamente linear.

5. O método para o cálculo dos esforços de vento através da discretização da superfície da semi-submersível por painéis apresenta valores para os esforços de vento maiores que os obtidos experimentalmente, sendo em parte os efeitos de sombra e esteira responsáveis por esta diferença.

Como recomendações para a continuação deste trabalho tem-se :

1. A realização de ensaios em tanque de provas e tunel de vento para verificação dos resultados obtidos e ajuste do modelo principalmente na avaliação dos coeficientes de arrasto para determinação dos esforços de vento e correnteza.
2. Incluir no modelo os efeitos de sustentação devido ao vento e correnteza.
3. Analisar a influência, nas simulações dos movimentos da plataforma, das aproximações utilizadas na avaliação das funções de memória e dos métodos de integração da equação do movimento.
4. Utilizar um modelo único para calcular concomitantemente os esforços de onda, vento e correnteza. Obviamente a implantação deste procedimento requer um esforço computacional muito grande necessitando computadores de alta velocidade de processamento e otimização dos algoritmos envolvidos.

Referências

- [1] W. E. Cummings *The Impulse Response Function and Ship Motions*. Schiffstechnik, vol. 47, n.9, 1962.
- [2] T. F. Ogilvie *Recent Progress toward the Understanding and Prediction of Ship Motions*. Fifth Symposium on Naval Hydrodynamics - Bergen - 1964.
- [3] G. van Oortmerssen *The Motions of a Moored Ships in Waves*. Publication n.510 NSRDC - Wageningen, 1976.
- [4] M. Takagi e K. Saito *Memory Effect Function and Time Domain Simulation for Motions of a Moored Marine Structures*. J. Kansai Soc. of Naval Architects of Japan, 1984.
- [5] M. D. A. S. Ferreira *Simulação do Comportamento de Plataformas Semi-submersíveis*. 13o Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval, Vol. II, 1990.
- [6] L. J. Tick *The Estimation of the "Transfer Functions" of Quadratic Systems*. Technometrics, vol. 3, n.4, 1961.
- [7] J. F. Dalzell *Application of the Functional Polynomial Model to the Ship Added Resistance Problem*. 11th Symposium on Naval Hydrodynamics - University College - London - 1976.
- [8] S. K. Chakrabarti (1987). *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Computational Mechanics Publications.
- [9] J. N. Newman (1978) *Marine Hydrodynamics*. MIT Press.
- [10] G. van Oortmerssen *Some Aspects of Very Large Offshore Structures*. Proc. ONR Ninth Symposium on Naval Hydrodynamics - 1972.

- [11] C. J. Garrison *Hydrodynamic Loading of Large Offshore Structures, Three-Dimensional Source Distribution Methods*. Numerical Methods in Offshore Engineering, John Wiley & Sons, 1978.
- [12] C. C. Mei *Numerical Methods in Water-Wave Diffraction and Radiation*. Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 10, 1978.
- [13] J. A. Pinkster *Low Frequency Second Order Wave Exciting Forces on Floating Structures*. Netherlands Ship Model Basin Publication n.650, 1980.
- [14] G. E. Hearn, S. M. Lau e K. C. Tong *Wave Drift Damping Influences Upon the Time Domain Simulations of Moored Structures*. OTC 5632 - 1988.
- [15] J. A. Pinkster e R. H. M. *The Low Frequency Motions of a Semi-submersible in Waves*. Proc. 3rd Internat. Conf. on Behaviour of Offshore Structures (BOSS), MIT, 1982.
- [16] O. M. Faltinsen e A. E. Løken *Slow Drift Oscillations of a Ship in Irregular Waves*. Applied Ocean Research, Vol. 1, n.1 - 1979.
- [17] J. N. Newman *Second-Order Slowly Varying Forces on Vessels in Irregular Waves*. Proc. Internat. Symp. on Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves - Univ. Coll. London - 1974.
- [18] F. H. Hsu e K. A. Blenkarn *Analysis of Peak Mooring Force Caused by Slow Vessel Drift Oscillation in Random Seas*. OTC 1159 - 1970.
- [19] T. F. Ogilvie *Second-Order Hydrodynamic Effects on Ocean Platforms*. Workshop on Ship and Platform Motions - Berkeley, Calif - 1983.
- [20] American Bureau of Shipping (ABS) *Rules for Building and Classing Offshore Mobile Drilling Units* (1980).

- [21] Det norske Veritas (DnV) *Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures*, Appendix A,B (1977).
- [22] H. Maeda, K. Nishimoto e S. Eguchi *A Study of Components of Wind and Current Loads on Semisubmersibles*. J. Kansai Soc. of Naval Architects of Japan, vol. 156, 1984.
- [23] G. F. M. Remery e G. Oortmerssen *The Mean Wave, Wind and Current Forces on Offshore Structures and Their Role in the Design of Mooring Systems*. OTC 1741 - 1973.
- [24] S. Takezawa e T. Hirayama *Safety on Moored Semi-submersible Platform under Extreme Complex External Loads*. Fifth Internat. Offshore Mechanics and Artic Engineering Symposium, vol. 3, 1986.
- [25] S. Takezawa, T. Hirayama e C. K. Morooka *A Practical Calculation Method of a Moored Semi-submersible Rig Motion in Waves (on the Effects of Moored Water Depth and Mooring Systems)*. J. Soc. of Naval Architects of Japan, vol. 155, 1984.
- [26] S. K. Chakrabarti e D. C. Cotter *First and Second Order Interaction of Waves with Large Offshore Structures*. Proceedings of the 2nd International OMAE Symposium, 1982.
- [27] OCIMF (1977) *Prediction of Wind and Current Loads on VLCC's*.
- [28] W. L. Wood *Some Transient and Coupled Problem A State-of-Art Review Numerical Methods for Transient and Coupled Problems*. John Wiley, 1987.
- [29] C. K. Morooka *Dynamic Behavior of Floating Type Offshore Structures in Multidirectional Ocean Waves*. Ph. D. Dissertation, University of Tokyo, December 1986.
- [30] S. Amui *Análise do Sistema de Ancoragem Convencional de uma Unidade Flutuante através da Utilização de Parâmetros Generalizados*. Seminário sobre Tecnologia de Engenharia de Perfuração e Produção no Mar, vol. 1, 1976 PETROBRAS.

6 APÊNDICE A

DESCRIÇÃO DO MÉTODO PARA O CÁLCULO DOS ESFORÇOS DE VENTO E CORRENTEZA

Como visto no Capítulo 2 para o cálculo dos esforços de vento e correnteza utiliza-se uma formulação em que é necessário se conhecer os coeficientes de arrasto e a área projetada de cada elemento da semi-submersível na direção do vento ou correnteza. Os coeficientes de arrasto podem ser obtidos através das regras do ABS [20], já a determinação das áreas projetadas de cada elemento é mais complexa, pois as áreas variam conforme a posição da plataforma em cada instante. Assim para resolver este problema dividiu-se a superfície da semi-submersível em painéis retangulares ou triangulares, conforme mostra a Figura A.1.

Conforme mostra a Figura A.2 para o cálculo dos esforços de vento e correnteza foram definidos os seguintes sistemas de referência :

- sistema $oxyz$ fixo na estrutura e com origem no ponto "o" localizado na linha de centro na metade da semi-submersível;
- sistema $O'XYZ$ com origem no ponto "O'" localizado no plano de linha d'água e com eixos paralelos aos eixos do referencial $OXYZ$ fixo na cabeça do poço conforme definido no Capítulo 2;
- sistema $O'x'y'z'$ fixo na estrutura no ponto "O'" e com eixos paralelos ao sistema $oxyz$.

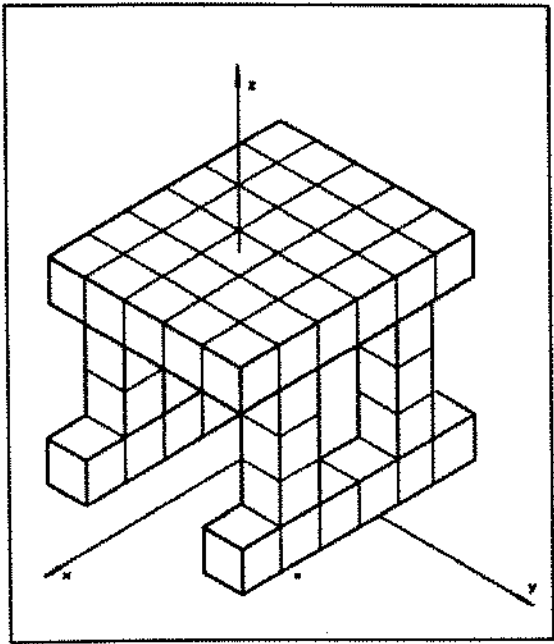


Figura A.1: Discretização da plataforma

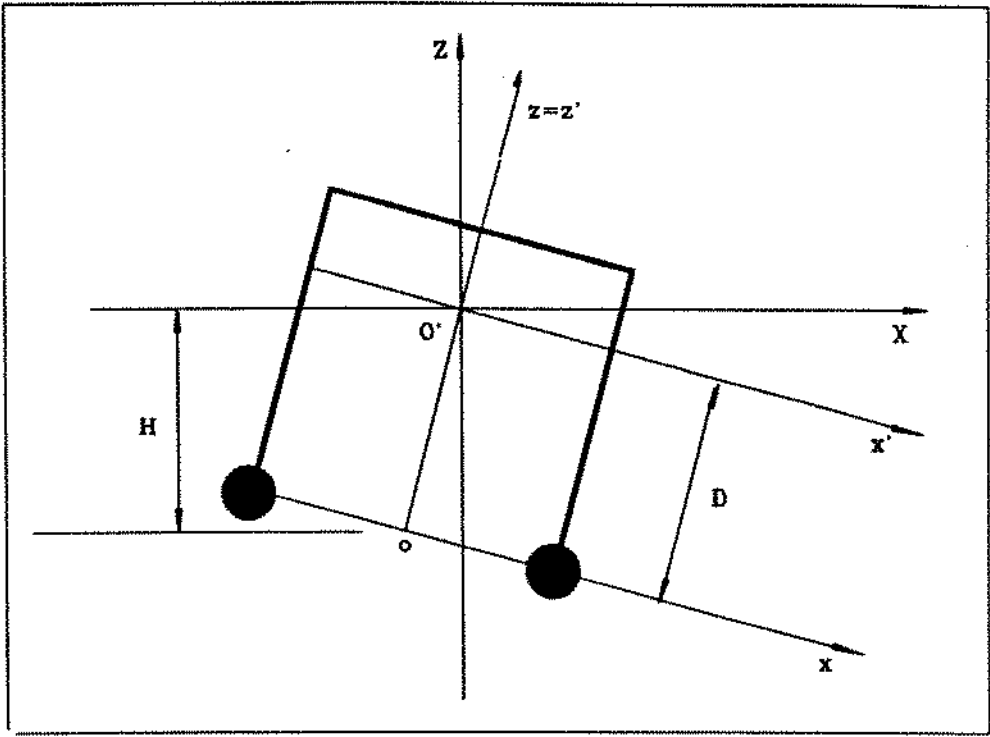


Figura A.2: Definição dos sistemas de coordenadas

Descrevendo as coordenadas dos vértices dos painéis em relação ao referencial $oxyz$ para se determinar a área emersa exposta ao vento e a área imersa sujeita à ação da correnteza deve-se definir o plano médio da linha d'água a cada instante de tempo. Além disso é preciso definir, também, no referencial $oxyz$ a direção do vetor velocidade de vento ou correnteza para se obter a direção da projeção da área.

Para se determinar o plano de linha d'água e o vetor velocidade no referencial $oxyz$ define-se a matriz de transformação ou rotação entre o referencial $O'XYZ$ e o referencial $O'x'y'z'$, sendo que as rotações ϕ , ψ e ϑ definidas segundo a regra da mão direita são os movimentos de rotação x_4 , x_5 e x_6 respectivamente da semi-submersível. Assim

$$\{X\}_{O'XYZ} = [R]\{x\}_{O'x'y'z'}$$

onde

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos\vartheta\cos\psi & \cos\vartheta\sin\psi\sin\phi - \sin\vartheta\cos\phi & \sin\vartheta\sin\phi + \cos\vartheta\sin\psi\cos\phi \\ \sin\vartheta\cos\psi & \cos\vartheta\cos\phi + \sin\vartheta\sin\psi\sin\phi & \sin\vartheta\sin\psi\cos\phi - \cos\vartheta\sin\phi \\ -\sin\psi & \cos\psi\sin\phi & \cos\psi\cos\phi \end{bmatrix}$$

Portanto sendo θ a direção do vento ou correnteza em relação ao referencial $O'XYZ$ e fazendo a hipótese do vetor velocidade ser paralelo à superfície do mar pode-se escrever o versor do vetor velocidade como

$$\{\vec{v}\}_{O'XYZ} = (\cos\theta; \sin\theta; 0)$$

Lembrando que $[R]^{-1} = [R]^t$ para transformações de sistemas triortogonais tem-se :

$$\{\vec{v}\}_{O'x'y'z'} = [R]^{-1}\{\vec{v}\}_{O'XYZ}$$

logo

$$\begin{aligned}\vec{v} = & (\cos\vartheta\cos\psi\cos\theta + \sin\vartheta\cos\psi\sin\theta)\vec{i} + \\ & [(\cos\vartheta\sin\psi\sin\phi - \sin\vartheta\cos\phi)\cos\theta + (\cos\vartheta\cos\phi + \sin\vartheta\sin\psi\sin\phi)\sin\theta]\vec{j} + \\ & [(\sin\vartheta\sin\phi + \cos\vartheta\sin\psi\cos\phi)\cos\theta + (\sin\vartheta\sin\psi\cos\phi - \cos\vartheta\sin\phi)\sin\theta]\vec{k}\end{aligned}\quad (\text{A.1})$$

Como os referenciais $oxyz$ e $O'x'y'z'$ possuem eixos paralelos o versor obtido pela expressão (A.2) também representa a direção do vento no referencial $oxyz$. Este versor é o versor normal ao plano em que serão projetados os painéis.

O versor normal ao plano de linha d'agua no referencial $O'XYZ$ é dado por $(0,0,1)$. A direção deste versor no referencial $O'x'y'z'$ pode ser obtida através da matriz de rotação definida anteriormente. Portanto sendo os referenciais $oxyz$ e $O'x'y'z'$ paralelos a direção do versor normal ao plano de linha d'agua no sistema $O'x'y'z'$ é a mesma do referencial $oxyz$ e é dada por :

$$\vec{w} = -\sin\psi\vec{i} + \cos\psi\sin\phi\vec{j} + \cos\psi\cos\phi\vec{k} \quad (\text{A.2})$$

Para se definir todos os parâmetros do plano de linha d'agua no sistema $oxyz$ além do versor normal dado pela expressão A.2 é necessário definir onde o plano de linha d'agua e o eixo oz se encontram. Assim definindo o vetor $\vec{H}$ no referencial $oxyz$ por

$$\vec{H} = H(-\sin\psi\vec{i} + \cos\psi\sin\phi\vec{j} + \cos\psi\cos\phi\vec{k})$$

onde H é o calado da semi-submersível pode-se com o auxílio da Figura A.2 obter a seguinte expressão para a distância "D" :

$$D = \frac{H}{\cos\psi\cos\phi}$$

Logo o plano de linha d'agua no sistema $oxyz$ é definido pela seguinte equação

$$- \sin\psi x + \cos\psi \sin\phi y + \cos\psi \cos\phi z + \frac{H}{\cos\psi \cos\phi} = 0 \quad (\text{A.3})$$

Desta forma dada a equação do plano de linha d'agua é possível identificar os painéis que estão acima ou abaixo da linha d'agua, assim como calcular as distâncias dos centros das áreas projetadas ao plano de linha d'agua necessárias para o cálculo dos momentos.

Assim definidos o versor da velocidade e o plano da linha d'agua as áreas projetadas dos vários painéis em um plano perpendicular à velocidade do vento podem ser obtidas através das seguintes etapas :

- determinar o versor normal $\vec{n}$ do plano definido pelos vértices do painel através da seguinte expressão

$$\vec{n} = \frac{\vec{N}}{|\vec{N}|}$$

$$\begin{aligned} \vec{N} = & [(y_2 - y_1)(z_4 - z_1) - (y_4 - y_1)(z_2 - z_1)]\vec{i} + \\ & [(z_2 - z_1)(x_4 - x_1) - (z_4 - z_1)(x_2 - x_1)]\vec{j} + \\ & [(x_2 - x_1)(y_4 - y_1) - (x_4 - x_1)(y_2 - y_1)]\vec{k} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

onde x_1, y_1, z_1 ; x_2, y_2, z_2 e x_4, y_4, z_4 são as coordenadas x,y e z dos vértices 1,2 e 4 do painel numerados de forma que o vetor $\vec{n}$ sempre aponte para fora da superfície da semi-submersível;

- através da equação do plano da linha d'agua verifica-se se o painel está imerso, emerso ou é interceptado pelo plano de linha d'agua;
- caso o painel seja interceptado pelo plano de linha d'agua este painel é dividido de forma a gerar novos painéis triangulares ou retangulares;

- projeta-se o painel em um plano cujo versor normal é definido pelo versor velocidade $\vec{v}$ e calcula-se a área e o centro da área do painel.
- com o centro da área e o plano de linha d'água a distância para o cálculo dos momentos em relação ao eixo que é perpendicular à direção do vetor velocidade e pertence ao plano $O'XY$ é dada por

$$b = \left| -\sin\psi x_{cp} + \cos\psi \sin\phi y_{cp} + \cos\psi \cos\phi z_{cp} - \frac{H}{\cos\psi \cos\phi} \right| \quad (\text{A.5})$$

onde x_{cp} , y_{cp} e z_{cp} são as coordenadas do centro da área projetada;

- além do momento em relação ao eixo definido anteriormente tem-se o momento definido em relação ao eixo $O'Z$ cujo braço é definido pela seguinte expressão

$$b_z = [R_{21}\cos\theta - R_{11}\sin\theta]x_{cp} + [R_{22}\cos\theta - R_{12}\sin\theta]y_{cp} + [R_{23}\cos\theta - R_{13}\sin\theta]z_{cp} \quad (\text{A.6})$$

onde R_{ij} são os elementos da matriz de rotação definida anteriormente

Assim a força devido ao vento ou correnteza é dada pela seguinte expressão :

$$F = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^N C_{di} C_{hi} A_{pi} V^2$$

onde

ρ é a massa específica da água ou ar;

C_{di} é o coeficiente de arrasto do painel i ;

C_{hi} é o coeficiente de altura definido no Capítulo 2 para o painel i ;

A_{pi} é a área projetada para o painel i ;

V é a velocidade do vento.

Os braços da parte emersa (b_e) e da parte imersa (b_i) são obtidos da seguinte forma :

$$b_e = \frac{\sum_1^{N_e} b'_i A_{pi}}{\sum_1^{N_e} A_{pi}}$$

$$b_i = \frac{\sum_1^{N_i} b'_i A_{pi}}{\sum_1^{N_i} A_{pi}}$$

onde

N_e é o número de painéis emersos;

N_i é o número de painéis imersos;

b'_i são os braços definidos pelas expressões (A.5) e (A.6) dependendo se o cálculo do momento é feito em relação ao eixo $O'Z$ ou em relação ao eixo perpendicular à direção do vento.

Assim para o cálculo dos momentos devido à ação do vento considerou-se o braço do momento como a soma dos braços da parte emersa e da parte imersa conforme sugerido pelas regras do ABS [20]. Para o cálculo do momento devido à ação da correnteza considerou-se apenas o braço da parte imersa. Portanto tem-se :

$$M_v = F(b_e + b_i)$$

$$M_c = F b_i$$

onde M_v e M_c são os momentos devido ao vento e a correnteza respectivamente.

Portanto através do procedimento descrito anteriormente obtém-se :

- a força na direção do vento ou correnteza (F);

- o momento em relação a um eixo perpendicular a direção do vento ou correnteza (M);
- o momento na direção do eixo $O'Z$ (MZ).

Assim decompondo estes esforços na direção dos eixos do referencial $O'XYZ$ tem-se :

$$F_X = F \cos \theta$$

$$F_Y = F \sin \theta$$

$$M_X = -M \sin \theta$$

$$M_Y = M \cos \theta$$

$$M_Z = MZ$$

Estes esforços, porém, estão aplicados em um sistema com origem no ponto "O" pertencente ao plano de linha d'água e para o cálculo dos movimentos, conforme visto no Capítulo 2, é necessário que os esforços sejam determinados em relação ao centro de gravidade. Para isto as seguintes transformações são necessárias :

$$F_{Xcg} = F_X$$

$$F_{Ycg} = F_Y$$

$$M_{Xcg} = M_X - F_Y Z_{O'cg}$$

$$M_{Y_{cg}} = M_Y + F_X Z_{O'_{cg}}$$

$$M_{Z_{cg}} = M_Z - F_X Y_{O'_{cg}} + F_Y X_{O'_{cg}}$$

onde $X_{O'_{cg}}$, $Y_{O'_{cg}}$ e $Z_{O'_{cg}}$ são as coordenadas do centro de gravidade da semi-submersível em relação ao sistema $O'XYZ$. Estas distâncias podem ser determinadas descrevendo as coordenadas do centro de gravidade em relação ao referencial $O'x'y'z'$ e aplicando a matriz de rotação definida anteriormente.

7 APÊNDICE B

EQUAÇÕES PARA A DETERMINAÇÃO DA TRACÇÃO EM UMA LINHA DE ANCORAGEM

As seguintes equações da catenária foram aplicadas no estudo das linhas de ancoragem, sendo que considerou-se apenas o caso de linhas simples, ou seja, apenas cabo de aço ou apenas corrente, e linhas não retesadas. A Figura B.1 apresenta um esquema de uma linha de ancoragem, onde aparecem definidos os parâmetros envolvidos nas formulações .

$$S = \sqrt{Z\left(\frac{2T}{W} - Z\right)}$$

$$\delta = \frac{T - WZ}{W} \cosh^{-1}\left(\frac{T}{T - WZ}\right)$$

$$T^2 = V^2 + H^2$$

$$H = T - WZ$$

$$V = WZ$$

$$\lambda = \delta - S + Z$$

onde

S é o comprimento da catenária;

Z é a lâmina d'água;

W é o peso linear da linha imersa na água;

δ é a projeção horizontal da catenária suspensa;

H é a componente horizontal da tração ;

V é a componente vertical da tração ;

T é a tração na linha de ancoragem;

λ é o deslocamento em relação a linha completamente frouxa.

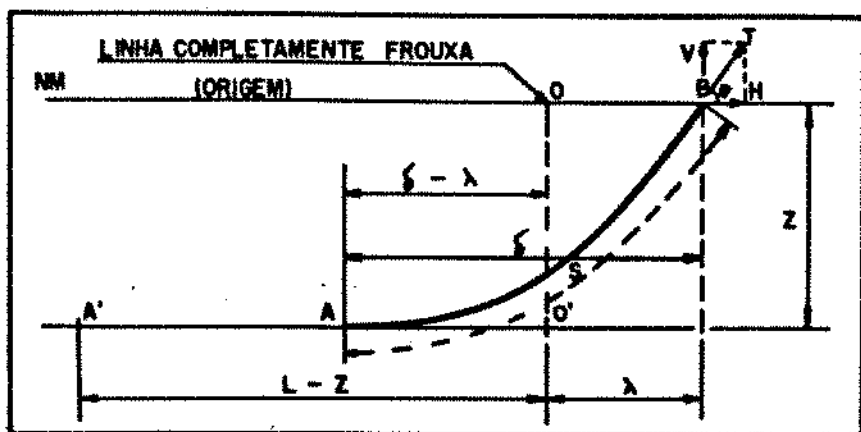


Figura B.1: Esquema de uma linha de ancoragem

Conforme a referência [30] definindo-se o seguinte parâmetro adimensional

$$K_T = \frac{T}{WZ}$$

e com as equações apresentadas anteriormente consegue-se obter a seguinte relação :

$$\frac{\lambda}{Z} = 1 + (K_T - 1) \left[\cosh^{-1} \left(\frac{K_T}{K_T - 1} - \frac{\sqrt{2K_T - 1}}{K_T - 1} \right) \right] \quad (B.1)$$

Esta equação relaciona um parâmetro de deriva adimensional com um parâmetro de tração axial também adimensional independente da lâmina d'agua, do peso linear e da tração inicial aplicada á linha. Assim é possível obter o gráfico da Figura B.2 válido para qualquer linha de ancoragem e muito útil em termos computacionais para o cálculo das trações nas linhas de ancoragem a cada instante. Deve-se observar, no entanto, que a relação apresentada na equação (B.1) é válida apenas para as condições em que a linha de ancoragem não esteja retesada.

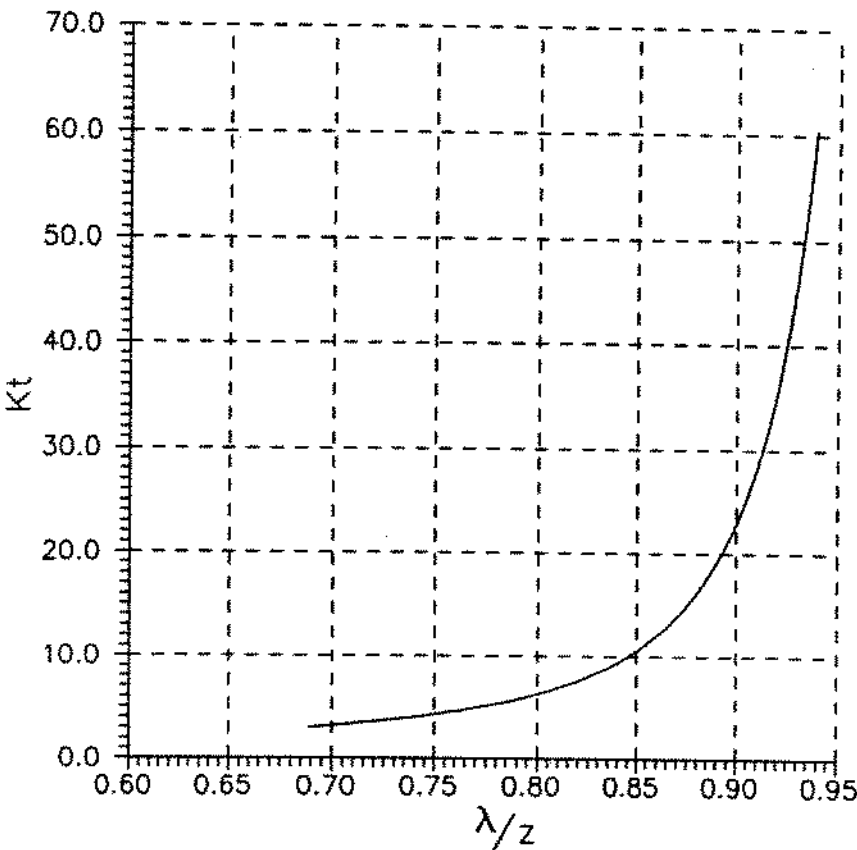


Figura B.2: Gráfico genérico da catenária

8 APÊNDICE C

OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES DA FUNÇÃO DE MEMÓRIA E MASSA ADICIONAL INDEPENDENTE DA FREQUÊNCIA

Neste apêndice são reproduzidos alguns passos para a dedução das expressões e função de memória e massa adicional independente da frequência extraídos da referência [3].

Admitindo-se um pulso de deslocamento Δx_j na direção j de uma estrutura flutuando em águas paradas e sendo a velocidade da estrutura constante durante o período de duração do pulso (Δt) tem-se :

$$\Delta x_j = V_j \Delta t$$

Assumindo que o potencial de velocidades do escoamento durante o período Δt é proporcional à velocidade da estrutura pode-se escrever :

$$\Phi = \sum_{j=1}^6 V_j \psi_j$$

Este pulso de deslocamento provoca uma elevação na superfície do fluido irá se propagar na superfície dissipando-se após um certo tempo. pode-se escrever o potencial desta perturbação como sendo proporcional ao deslocamento da estrutura da seguinte forma :

$$\Phi = \sum_{j=1}^6 \chi_j(t) \Delta x_j$$

Quando uma estrutura flutuante realiza um movimento qualquer tal movimento pode ser descrito como uma sucessão de pequenos pulsos de deslocamento. O

potencial de velocidades em um dado instante t_n será obtido, então, pela soma do potencial ψ_j no instante t_n , do potencial χ_j devido ao distúrbio provocado pelo deslocamento no instante t_n e mais os potenciais χ_j resultantes dos deslocamentos provocados nos instantes anteriores a t_n . Portanto

$$\Phi = \sum_{j=1}^6 \{ [V_{jn} \psi_j + \sum_1^n \chi_j [t_n + (n-i)\Delta t] V_{ij} \Delta t] \}$$

No limite para $\Delta t \rightarrow 0$ tem-se

$$\Phi = \sum_{j=1}^6 [\dot{x}_j \psi_j + \int_{-\infty}^t \chi_j(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau] \quad (C.1)$$

Assim obtido o potencial de velocidades, o campo de pressões ao redor da estrutura pode ser determinado utilizando a equação de Bernoulli linearizada :

$$p(x, y, z, t) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

Substituindo C.1 na equação anterior obtem-se

$$p(x, y, z, t) = -\rho \sum_{j=1}^6 [\dot{x}_j \psi_j + \int_{-\infty}^t \frac{\partial}{\partial t} \chi_j(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau]$$

Integrando o campo de pressão ao redor da estrutura obtem-se a reação hidrodinâmica. Assim

$$\begin{aligned} R_k &= - \int \int_S p n_k ds \\ &= \sum_{j=1}^6 [\rho \dot{x}_j \int \int_S \psi_j n_k ds + \rho \int \int_S n_k ds \int_{-\infty}^t \frac{\partial \chi_j(t-\tau)}{\partial t} \dot{x}_j(\tau) d\tau] \end{aligned} \quad (C.2)$$

onde

n_k é o versor normal à superfície da estrutura;

S é a superfície imersa da estrutura.

Definindo

$$m_{kj} = \rho \int \int_S \psi_j n_k ds$$

$$K_{kj} = \rho \int \int_S \frac{\partial \chi_j(t)}{\partial t} n_k ds$$

a equação (C.3) pode ser escrita da seguinte forma :

$$R_k = \sum_{j=1}^6 [m_{kj} \ddot{x}_j + \int_{-\infty}^t K_{kj}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau] \quad (C.3)$$

Assim obtida a reação hidrodinâmica através da expressão anterior e considerando os esforços devido a reação hidrostática da estrutura determina-se, aplicando a Lei de Newton, a equação do movimento no domínio do tempo descrita no Capítulo 2 e dada por :

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{ij} + m_{ij}) \ddot{x}_j + \int_{-\infty}^t K_{ij}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + C_{ij} x_j] = F_i(t), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (C.4)$$

Esta equação é válida para qualquer tipo de movimento e em particular é válida para um movimento harmônico do tipo

$$x_j = \eta_j e^{-i(\omega t + \varepsilon_j)} \quad (C.5)$$

onde

η é a amplitude do movimento na direção j ;

ε é a fase do movimento na direção j .

Um movimento deste tipo corresponde a uma estrutura sendo excitada por uma onda regular (senoidal) cuja equação do movimento no domínio da frequência é dada por :

$$\sum_{j=1}^6 [-\omega^2 (M_{ij} + a_{ij}) \text{sen}(\omega t + \epsilon_j) + b_{ij} \omega \cos(\omega t + \epsilon_j) + C_{ij} \text{sen}(\omega t + \epsilon_j)] \eta_i = F_i \text{sen}(\omega t + \delta_j), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (\text{C.6})$$

onde

a_{ij} é o coeficiente de massa adicional;

b_{ij} é o coeficiente de amortecimento potencial;

F_i é a força de excitação da onda;

ϵ_j e δ_j são ângulos de fase.

Substituindo (C.5) na (C.4) e tomando-se a parte real obtém-se

$$\sum_{j=1}^6 \left\{ -\omega^2 [M_{ij} + m_{ij} - \frac{1}{\omega} \int_0^\infty K_{ij}(\tau) \text{sen}(\omega \tau) d\tau] \text{sen}(\omega t + \epsilon_j) + [\omega \int_0^\infty K_{ij}(\tau) \cos(\omega \tau) d\tau] \cos(\omega t + \epsilon_j) + C_{ij} \text{sen}(\omega t + \epsilon_j) \right\} \eta_i = F_i \text{sen}(\omega t + \delta_j), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (\text{C.7})$$

Comparando equações (C.6) e (C.7) conclui-se que os coeficientes de massa adicional (a_{ij}) e amortecimento potencial (b_{ij}) dependentes da frequência estão relacionados com o coeficiente m_{ij} e com a função resposta ao impulso K_{ij} através das seguintes expressões

$$a_{ij} = m_{ij} - \frac{1}{\omega} \int_0^\infty K_{ij}(\tau) \text{sen}(\omega \tau) d\tau \quad (\text{C.8})$$

$$b_{ij} = \int_0^{\infty} K_{ij}(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau \quad (C.9)$$

Logo a função de resposta ao impulso ou função de memória pode ser obtida através da transformada inversa de Fourier da equação (C.9) da seguinte forma :

$$K_{ij} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{ij}(\omega) \cos \omega t d\omega$$

O coeficiente m_{ij} é constante e pode ser obtido através da equação (C.8) para um valor qualquer de frequência . Assim conhecida a massa adicional para um valor de frequência tem-se :

$$m_{ij} = a_{ij}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} K_{ij}(t) \operatorname{sen} \omega t dt$$

9 APÊNDICE D

DISCRETIZAÇÃO DAS PLATAFORMAS "A" E "B"

plataforma "A" : 152 pontos e 176 painéis

ponto	x(m)	y(m)	z(m)	ponto	x(m)	y(m)	z(m)
1	57.5	22.5	0.0	2	57.5	37.5	0.0
3	57.5	37.5	8.0	4	57.5	22.5	8.0
5	-57.5	22.5	0.0	6	-57.5	37.5	0.0
7	-57.5	37.5	8.0	8	-57.5	22.5	8.0
9	57.5	-37.5	0.0	10	57.5	-22.5	0.0
11	57.5	-22.5	8.0	12	57.5	-37.5	8.0
13	-57.5	-37.5	0.0	14	-57.5	-22.5	0.0
15	-57.5	-22.5	8.0	16	-57.5	-37.5	8.0
17	36.0	30.0	36.3	18	38.744	27.257	36.3
19	41.487	30.0	36.3	20	38.744	32.744	36.3
21	33.257	32.744	36.3	22	30.513	30.0	36.3
23	33.257	27.257	36.3	24	36.0	30.0	8.0
25	38.744	27.257	8.0	26	41.487	30.0	8.0
27	38.744	32.744	8.0	28	33.257	32.744	8.0
29	30.513	30.0	8.0	30	33.257	27.257	8.0
31	-36.0	30.0	36.3	32	-33.257	27.257	36.3
33	-30.513	30.0	36.3	34	-33.257	32.744	36.3
35	-38.744	32.744	36.3	36	-41.487	30.0	36.3
37	-38.744	27.257	36.3	38	-36.0	30.0	8.0
39	-33.257	27.257	8.0	40	-30.513	30.0	8.0

ponto	x(m)	y(m)	z(m)	ponto	x(m)	y(m)	z(m)
41	-33.257	32.744	8.0	42	-38.744	32.744	8.0
43	-41.487	30.0	8.0	44	-38.744	27.257	8.0
45	36.0	-30.0	36.3	46	38.744	-32.744	36.3
47	41.487	-30.0	36.3	48	38.744	-27.257	36.3
49	33.257	-27.257	36.3	50	30.513	-30.0	36.3
51	33.257	-32.744	36.3	52	36.0	-30.0	8.0
53	38.744	-32.744	8.0	54	41.487	-30.0	8.0
55	38.744	-27.257	8.0	56	33.257	-27.257	8.0
57	30.513	-30.0	8.0	58	33.257	-32.744	8.0
59	-36.0	-30.0	36.3	60	-33.257	-32.744	36.3
61	-30.513	-30.0	36.3	62	-33.257	-27.257	36.3
63	-38.744	-27.257	36.3	64	-41.487	-30.0	36.3
65	-38.744	-32.744	36.3	66	-36.0	-30.0	8.0
67	-33.257	-32.744	8.0	68	-30.513	-30.0	8.0
69	-33.257	-27.257	8.0	70	-38.744	-27.257	8.0
71	-41.487	-30.0	8.0	72	-38.744	-32.744	8.0
73	12.0	30.0	36.3	74	14.2	27.257	36.3
75	16.4	30.0	36.3	76	14.2	32.744	36.3
77	9.8	32.744	36.3	78	7.6	30.0	36.3
79	9.8	27.257	36.3	80	12.0	30.0	8.0
81	14.2	27.257	8.0	82	16.4	30.0	8.0
83	14.2	32.744	8.0	84	9.8	32.744	8.0
85	7.6	30.0	8.0	86	9.8	27.257	8.0
87	-12.0	30.0	36.3	88	-9.8	27.257	36.3
89	-7.6	30.0	36.3	90	-9.8	32.744	36.3

ponto	x(m)	y(m)	z(m)	ponto	x(m)	y(m)	z(m)
91	-14.2	32.744	36.3	92	-16.4	30.0	36.3
93	-14.2	27.257	36.3	94	-12.0	30.0	8.0
95	-9.8	27.257	8.0	96	-7.6	30.0	8.0
97	-9.8	32.744	8.0	98	-14.2	32.744	8.0
99	-16.4	30.0	8.0	100	-14.2	27.257	8.0
101	12.0	-30.0	36.3	102	14.2	-32.744	36.3
103	16.4	-30.0	36.3	104	14.2	-27.257	36.3
105	9.8	-27.257	36.3	106	7.6	-30.0	36.3
107	9.8	-32.744	36.3	108	12.0	-30.0	8.0
109	14.2	-32.744	8.0	110	16.4	-30.0	8.0
111	14.2	-27.257	8.0	112	9.8	-27.257	8.0
113	7.6	-30.0	8.0	114	9.8	-32.744	8.0
115	-12.0	-30.0	36.3	116	-9.8	-32.744	36.3
117	-7.6	-30.0	36.3	118	-9.8	-27.257	36.3
119	-14.2	-27.257	36.3	120	-16.4	-30.0	36.3
121	-14.2	-32.744	36.3	122	-12.0	-30.0	8.0
123	-9.8	-32.744	8.0	124	-7.6	-30.0	8.0
125	-9.8	-27.257	8.0	126	-14.2	-27.257	8.0
127	-16.4	-30.0	8.0	128	-14.2	-32.744	8.0
129	41.487	-32.744	36.3	130	41.487	32.744	36.3
131	41.487	32.744	43.0	132	41.487	-32.744	43.0
133	-41.487	-32.744	36.3	134	-41.487	32.744	36.3
135	-41.487	32.744	43.0	136	-41.487	-32.744	43.0
137	6.500	-6.500	43.0	138	6.500	-2.500	43.0
139	6.500	2.500	43.0	140	6.500	6.500	43.0

ponto	x(m)	y(m)	z(m)	ponto	x(m)	y(m)	z(m)
141	2.500	6.500	43.0	142	-2.500	6.500	43.0
143	-6.500	6.500	43.0	144	-6.500	2.500	43.0
145	-6.500	-2.500	43.0	146	-6.500	-6.500	43.0
147	-2.500	-6.500	43.0	148	2.500	-6.500	43.0
149	2.500	-2.500	93.0	150	2.500	2.500	93.0
151	-2.500	2.500	93.0	152	-2.500	-2.500	93.0

painéis	C_d	painéis	C_d
1 2 3 4	1.0	2 6 7 3	1.0
6 5 8 7	1.0	5 1 4 8	1.0
4 3 7 8	1.0	5 6 2 1	1.0
9 10 11 12	1.0	10 14 15 11	1.0
13 16 15 14	1.0	13 9 12 16	1.0
9 13 14 10	1.0	11 15 16 12	1.0
18 23 30 25	0.5	18 25 26 19	0.5
19 26 27 20	0.5	20 27 28 21	0.5
21 28 29 22	0.5	22 29 30 23	0.5
23 18 17 17	0.0	18 19 17 17	0.0
19 20 17 17	0.0	20 21 17 17	0.0
21 22 17 17	0.0	22 23 17 17	0.0
25 30 24 24	0.0	26 25 24 24	0.0
27 26 24 24	0.0	28 27 24 24	0.0
29 28 24 24	0.0	30 29 24 24	0.0
79 86 81 74	0.5	74 81 82 75	0.5

painéis	C_d	painéis	C_d
75 82 83 76	0.5	76 83 84 77	0.5
77 84 85 78	0.5	78 85 86 79	0.5
79 74 73 73	0.0	74 75 73 73	0.0
75 76 73 73	0.0	76 77 73 73	0.0
77 78 73 73	0.0	78 79 73 73	0.0
81 86 80 80	0.0	82 81 80 80	0.0
83 82 80 80	0.0	84 83 80 80	0.0
85 84 80 80	0.0	86 85 80 80	0.0
93 100 95 88	0.5	88 95 96 89	0.5
89 96 97 90	0.5	90 97 98 91	0.5
91 98 99 92	0.5	92 99 100 93	0.5
93 88 87 87	0.0	88 89 87 87	0.0
89 90 87 87	0.0	90 91 87 87	0.0
91 92 87 87	0.0	92 93 87 87	0.0
95 100 94 94	0.0	96 95 94 94	0.0
97 96 94 94	0.0	98 97 94 94	0.0
99 98 94 94	0.0	100 99 94 94	0.0
37 44 39 32	0.5	32 39 40 33	0.5
33 40 41 34	0.5	34 41 42 35	0.5
35 42 43 36	0.5	36 43 44 37	0.5
37 32 31 31	0.0	32 33 31 31	0.0
33 34 31 31	0.0	34 35 31 31	0.0
35 36 31 31	0.0	36 37 31 31	0.0
39 44 38 38	0.0	40 39 38 38	0.0
41 40 38 38	0.0	42 41 38 38	0.0
43 42 38 38	0.0	44 43 38 38	0.0

painéis	C_d	painéis	C_d
51 58 53 46	0.5	46 53 54 47	0.5
47 54 55 48	0.5	48 55 56 49	0.5
49 56 57 50	0.5	50 57 58 51	0.5
51 46 45 45	0.0	46 47 45 45	0.0
47 48 45 45	0.0	48 49 45 45	0.0
49 50 45 45	0.0	50 51 45 45	0.0
53 58 52 52	0.0	54 53 52 52	0.0
55 54 52 52	0.0	56 55 52 52	0.0
57 56 52 52	0.0	58 57 52 52	0.0
107 114 109 102	0.5	102 109 110 103	0.5
103 110 111 104	0.5	104 111 112 105	0.5
105 112 113 106	0.5	106 113 114 107	0.5
107 102 101 101	0.0	102 103 101 101	0.0
103 104 101 101	0.0	104 105 101 101	0.0
105 106 101 101	0.0	106 107 101 101	0.0
109 114 108 108	0.0	110 109 108 108	0.0
111 110 108 108	0.0	112 111 108 108	0.0
113 112 108 108	0.0	114 113 108 108	0.0
121 128 123 116	0.5	116 123 124 117	0.5
117 124 125 118	0.5	118 125 126 119	0.5
119 126 127 120	0.5	120 127 128 121	0.5
121 116 115 115	0.0	116 117 115 115	0.0
117 118 115 115	0.0	118 119 115 115	0.0
119 120 115 115	0.0	120 121 115 115	0.0
123 128 122 122	0.0	124 123 122 122	0.0
125 124 122 122	0.0	126 125 122 122	0.0

painéis	C_d	painéis	C_d
127 126 122 122	0.0	128 127 122 122	0.0
65 72 67 60	0.5	60 67 68 61	0.5
61 68 69 62	0.5	62 69 70 63	0.5
63 70 71 64	0.5	64 71 72 65	0.5
65 60 59 59	0.0	60 61 59 59	0.0
61 62 59 59	0.0	62 63 59 59	0.0
63 64 59 59	0.0	64 65 59 59	0.0
67 72 66 66	0.0	68 67 66 66	0.0
69 68 66 66	0.0	70 69 66 66	0.0
71 70 66 66	0.0	72 71 66 66	0.0
129 130 131 132	1.0	130 134 135 131	1.0
134 133 136 135	1.0	133 129 132 136	1.0
132 131 135 136	1.0	129 133 134 130	1.0
147 148 149 152	0.5	138 139 150 149	0.5
141 142 151 150	0.5	144 145 152 151	0.5
149 150 151 152	0.5	140 137 146 143	0.5
148 137 149 149	0.5	137 138 149 149	0.5
139 140 150 150	0.5	140 141 150 150	0.5
142 143 151 151	0.5	143 144 151 151	0.5
145 146 152 152	0.5	146 147 152 152	0.5

plataforma "B" : 156 pontos e 162 painéis

ponto	x(m)	y(m)	z(m)	ponto	x(m)	y(m)	z(m)
1	49.5	-37.50	33.65	2	49.5	37.50	33.65
3	49.5	37.50	41.65	4	49.5	-37.50	41.65
5	-49.5	-37.50	33.65	6	-49.5	37.50	33.65
7	-49.5	37.50	41.65	8	-49.5	-37.50	41.65
9	47.5	30.75	6.3	10	51.212	24.322	6.3
11	54.923	30.75	6.3	12	51.212	37.179	6.3
13	43.789	37.179	6.3	14	40.077	30.75	6.3
15	43.789	24.322	6.3	16	47.5	30.75	33.65
17	51.212	24.322	33.65	18	54.923	30.75	33.65
19	51.212	37.179	33.65	20	43.789	37.179	33.65
21	40.077	30.75	33.65	22	43.789	24.322	33.65
23	0.0	30.75	6.3	24	3.712	24.322	6.3
25	7.423	30.75	6.3	26	3.712	37.179	6.3
27	-3.712	37.179	6.3	28	-7.423	30.75	6.3
29	-3.712	24.322	6.3	30	0.0	30.75	33.65
31	3.712	24.322	33.65	32	7.423	30.75	33.65
33	3.712	37.179	33.65	34	-3.712	37.179	33.65
35	-7.423	30.75	33.65	36	-3.712	24.322	33.65
37	-47.5	30.75	6.3	38	-43.789	24.322	6.3
39	-40.077	30.75	6.3	40	-43.789	37.179	6.3

ponto	x(m)	y(m)	z(m)	ponto	x(m)	y(m)	z(m)
41	-51.212	37.179	6.3	42	-54.923	30.75	6.3
43	-51.212	24.322	6.3	44	-47.5	30.75	33.65
45	-43.789	24.322	33.65	46	-40.077	30.75	33.65
47	-43.789	37.179	33.65	48	-51.212	37.179	33.65
49	-54.923	30.75	33.65	50	-51.212	24.322	33.65
51	47.5	-30.75	6.3	52	51.212	-37.179	6.3
53	54.923	-30.75	6.3	54	51.212	-24.322	6.3
55	43.789	-24.322	6.3	56	40.077	-30.75	6.3
57	43.789	-37.179	6.3	58	47.5	-30.75	33.65
59	51.212	-37.179	33.65	60	54.923	-30.75	33.65
61	51.212	-24.322	33.65	62	43.789	-24.322	33.65
63	40.077	-30.75	33.65	64	43.789	-37.179	33.65
65	0.0	-30.75	6.3	66	3.712	-37.179	6.3
67	7.423	-30.75	6.3	68	3.712	-24.322	6.3
69	-3.712	-24.322	6.3	70	-7.423	-30.75	6.3
71	-3.712	-37.179	6.3	72	0.0	-30.75	33.65
73	3.712	-37.179	33.65	74	7.423	-30.75	33.65
75	3.712	-24.322	33.65	76	-3.712	-24.322	33.65
77	-7.423	-30.75	33.65	78	-3.712	-37.179	33.65
79	-47.5	-30.75	6.3	80	-43.789	-37.179	6.3
81	-40.077	-30.75	6.3	82	-43.789	-24.322	6.3
83	-51.212	-24.322	6.3	84	-54.923	-30.75	6.3
85	-51.212	-37.179	6.3	86	-47.5	-30.75	33.65
87	-43.789	-37.179	33.65	88	-40.077	-30.75	33.65
89	-43.789	-24.322	33.65	90	-51.212	-24.322	33.65

ponto	x(m)	y(m)	z(m)	ponto	x(m)	y(m)	z(m)
91	-54.923	-30.75	33.65	92	-51.212	-37.179	33.65
93	57.5	-39.25	0.0	94	57.5	-22.25	0.0
95	44.6	-22.25	0.0	96	37.5	-22.25	0.0
97	29.5	-22.25	0.0	98	29.5	-25.5	0.0
99	-29.5	-25.5	0.0	100	-29.5	-22.25	0.0
101	-37.5	-22.25	0.0	102	-44.6	-22.25	0.0
103	-57.5	-22.25	0.0	104	-57.5	-39.25	0.0
105	-29.5	-39.25	0.0	106	-29.5	-36.0	0.0
107	29.5	-36.0	0.0	108	29.5	-39.25	0.0
109	57.5	-39.25	6.3	110	57.5	-22.25	6.3
111	44.6	-22.25	6.3	112	37.5	-22.25	6.3
113	29.5	-22.25	6.3	114	29.5	-25.5	6.3
115	-29.5	-25.5	6.3	116	-29.5	-22.25	6.3
117	-37.5	-22.25	6.3	118	-44.6	-22.25	6.3
119	-57.5	-22.25	6.3	120	-57.5	-39.25	6.3
121	57.5	22.25	0.0	122	57.5	39.25	0.0
123	29.5	39.25	0.0	124	29.5	36.0	0.0
125	-29.5	36.0	0.0	126	-29.5	39.25	0.0
127	-57.5	39.25	0.0	128	-57.5	22.25	0.0
129	-44.6	22.25	0.0	130	-37.5	22.25	0.0
131	-29.5	22.25	0.0	132	-29.5	25.5	0.0
133	29.5	25.5	0.0	134	29.5	22.25	0.0
135	37.5	22.25	0.0	136	44.6	22.25	0.0
137	57.5	22.25	6.3	138	57.5	39.25	6.3
139	29.5	39.25	6.3	140	29.5	36.0	6.3

ponto	x(m)	y(m)	z(m)	ponto	x(m)	y(m)	z(m)
141	-29.5	36.0	6.3	142	-29.5	39.25	6.3
143	-57.5	39.25	6.3	144	-57.5	22.25	6.3
145	-44.6	22.25	6.3	146	-37.5	22.25	6.3
147	-29.5	22.25	6.3	148	-29.5	25.5	6.3
149	29.5	25.5	6.3	150	29.5	22.25	6.3
151	37.5	22.25	6.3	152	44.6	22.25	6.3
153	-29.5	-39.25	6.3	154	-29.5	-36.0	6.3
155	29.5	-36.0	6.3	156	29.5	-39.25	6.3

painéis	C_d	painéis	C_d
1 2 3 4	1.0	3 2 6 7	1.0
7 6 5 8	1.0	5 1 4 8	1.0
4 3 7 8	1.0	1 5 6 2	1.0
15 10 17 22	0.5	17 10 11 18	0.5
18 11 12 19	0.5	19 12 13 20	0.5
20 13 14 21	0.5	21 14 15 22	0.5
10 15 9 9	0.0	11 10 9 9	0.0
12 11 9 9	0.0	13 12 9 9	0.0
14 13 9 9	0.0	15 14 9 9	0.0
22 17 16 16	0.0	17 18 16 16	0.0
18 19 16 16	0.0	19 20 16 16	0.0
20 21 16 16	0.0	21 22 16 16	0.0
36 29 24 31	0.5	31 24 25 32	0.5

painéis	C_d	painéis	C_d
32 25 26 33	0.5	33 26 27 34	0.5
34 27 28 35	0.5	35 28 29 36	0.5
24 29 23 23	0.0	25 24 23 23	0.0
26 25 23 23	0.0	27 26 23 23	0.0
28 27 23 23	0.0	29 28 23 23	0.0
36 31 30 30	0.0	31 32 30 30	0.0
32 33 30 30	0.0	33 34 30 30	0.0
34 35 30 30	0.0	35 36 30 30	0.0
50 43 38 45	0.5	45 38 39 46	0.5
46 39 40 47	0.5	47 40 41 48	0.5
48 41 42 49	0.5	49 42 43 50	0.5
38 43 37 37	0.0	39 38 37 37	0.0
40 39 37 37	0.0	41 40 37 37	0.0
42 41 37 37	0.0	43 42 37 37	0.0
50 45 44 44	0.0	45 46 44 44	0.0
46 47 44 44	0.0	47 48 44 44	0.0
48 49 44 44	0.0	49 50 44 44	0.0
64 57 52 59	0.5	59 52 53 60	0.5
60 53 54 61	0.5	61 54 55 62	0.5
62 55 56 63	0.5	63 56 57 64	0.5
52 57 51 51	0.0	53 52 51 51	0.0
54 53 51 51	0.0	55 54 51 51	0.0
56 55 51 51	0.0	57 56 51 51	0.0
59 60 58 58	0.0	60 61 58 58	0.0
61 62 58 58	0.0	62 63 58 58	0.0
63 64 58 58	0.0	64 59 58 58	0.0

painéis	C_d	painéis	C_d
78 71 66 73	0.5	73 66 67 74	0.5
74 67 68 75	0.5	75 68 69 76	0.5
76 69 70 77	0.5	77 70 71 78	0.5
67 66 65 65	0.0	68 67 65 65	0.0
69 68 65 65	0.0	70 69 65 65	0.0
71 70 65 65	0.0	66 71 65 65	0.0
73 74 72 72	0.0	74 75 72 72	0.0
75 76 72 72	0.0	76 77 72 72	0.0
77 78 72 72	0.0	78 73 72 72	0.0
92 85 80 87	0.5	87 80 81 88	0.5
88 81 82 89	0.5	89 82 83 90	0.5
90 83 84 91	0.5	91 84 85 92	0.5
81 80 79 79	0.0	82 81 79 79	0.0
83 82 79 79	0.0	84 83 79 79	0.0
85 84 79 79	0.0	80 85 79 79	0.0
87 88 86 86	0.0	88 89 86 86	0.0
89 90 86 86	0.0	90 91 86 86	0.0
91 92 86 86	0.0	92 87 86 86	0.0
93 94 110 109	1.0	94 95 111 110	1.0
96 97 113 112	1.0	97 98 114 113	1.0
98 99 115 114	1.0	99 100 116 115	1.0
100 101 117 116	1.0	102 103 119 118	1.0
103 104 120 119	1.0	104 105 153 120	1.0
105 106 154 153	1.0	106 107 155 154	1.0
107 108 156 155	1.0	108 93 109 156	1.0
109 110 113 156	1.0	114 115 154 155	1.0

painéis	C_d	painéis	C_d
116 119 120 153	1.0	94 93 108 97	1.0
106 99 98 107	1.0	104 103 100 105	1.0
121 122 138 137	1.0	122 123 139 138	1.0
123 124 140 139	1.0	124 125 141 140	1.0
125 126 142 141	1.0	126 127 143 142	1.0
127 128 144 143	1.0	128 129 145 144	1.0
130 131 147 146	1.0	131 132 148 147	1.0
132 133 149 148	1.0	133 134 150 149	1.0
134 135 151 150	1.0	136 121 137 152	1.0
137 138 139 150	1.0	149 140 141 148	1.0
147 142 143 144	1.0	122 121 134 123	1.0
125 124 133 132	1.0	131 128 127 126	1.0
95 136 152 111	1.0	112 111 152 151	1.0
96 112 151 135	1.0	95 96 135 136	1.0
101 130 146 117	1.0	146 145 118 117	1.0
102 118 145 129	1.0	101 102 129 130	1.0